Travail de diplôme

Binaires interférométriques et spectroscopiques en tant qu'étalons de distance : le cas d'Atlas dans les Pléiades

N. Zwahlen
Sous la direction de P. North,
Laboratoire d'Astrophysique de l'EPFL

17 mars 2004

Résumé

La technique de déconvolution spectrale de P. Hadrava a été utilisée pour obtenir la courbe de vitesses radiales de l'étoile binaire Atlas des Pléiades. Combinés avec l'orbite visuelle obtenue par interférométrie par Pan *et al*, ces résultats donnent la distance de l'étoile et donc de l'amas des Pléiades, distance qui est sujette à controverse depuis que les mesures de parallaxe d'Hipparcos contredisent les résultats de la méthode classique d'ajustement de séquence principale. Des résultats provisoires indiquent une préférence pour la distance classique.

1 Introduction

1.1 Problématique

La distance des Pléiades est à la source d'une controverse depuis 1997. Il y a un conflit entre la distance traditionnelle (132 ± 4 pc) basée sur la méthode d'ajustement de séquence principale, et la distance donnée par les parallaxes d'Hipparcos (118 ± 4 pc). Une différence de 14 pc (environ 10%) subsiste entre les deux mesures, qui reste inexpliquée. (Un article à ce sujet est paru dans le numéro de décembre de Ciel et Espace [10].)

Il y a donc un problème soit au niveau de la méthode d'ajustement de séquence principale et de ses hypothèses (métallicité ou abondance de He des Pléiades), soit au niveau du satellite Hipparcos (biais sur la parallaxe moyenne, lié à la présence de corrélations, ou erreur systématique due à l'orbite excentrique du satellite).

Il faut donc mesurer à nouveau cette distance par une méthode indépendante et aussi directe que possible. L'étoile Atlas, qui est l'une des plus brillante de l'amas et une binaire interférométrique et spectroscopique, permet de le faire.

1.2 Méthode de mesure

L'orbite visuelle d'Atlas a été déterminée précisément par Pan *et al* [1] par interférométrie. Le demi-grand axe angulaire est donc connu, avec une précision meilleure que 1%, ainsi que l'inclinaison. La période et l'excentricité de la binaire sont également bien connues. Il suffit de mesurer par spectroscopie le demi-grand axe linéaire pour obtenir la distance par simple division.

Atlas est une binaire spectroscopique à doubles raies (SB2) mais les raies sont toujours mélangées (blended). Il s'agit donc de résoudre l'orbite en utilisant la technique de séparation spectrale de P. Hadrava [12, 13] pour obtenir les vitesses radiales. Celles-ci permettent ensuite d'obtenir le demi-grand axe, connaissant la période.

1.3 But du travail

Au début du travail, seulement quelques spectres d'Atlas sont disponibles (7 spectres ÉLODIE). D'autres spectres ont été pris entre novembre et janvier 2004 ; une demande de temps de téléscope a été déposée à l'OHP pour observer Atlas en mars et en août 2004 avec ÉLODIE [9]. Il faut donc développer des outils informatiques qui permettront de traiter ces spectres aussi rapidement que possible, au fur et à mesure de leur arrivée.

L'arrivée progressive des données permettra d'observer l'amélioration de la parallaxe d'Atlas en fonction du nombre de spectres disponibles ; le but étant d'arriver à une précision de quelques pourcent.

1.4 Principe de `korel`

Le but du programme `korel` (pour optimization of **c**omponant spectra and **or**bital **el**ements ; voir [12]) est la séparation de spectres composites. Cette technique utilise la transformée de Fourier. Les vitesses radiales cherchées sont traitées comme des fonctions du temps et des paramètres orbitaux, et sont ajustées par la méthode des moindres carrés.

Cette méthode suppose que les étoiles n'ont aucune variabilité intrinsèque (telles que pulsations, ou rotation d'inhomogénéités de surface). La solution obtenue peut dépendre des conditions initiales et n'est pas forcément la meilleure solution (puisque on fait une minimisation lors de la recherche des moindres carrés, on peut tomber sur un minimum local au lieu du minimum global recherché).

Ce principe ressemble à la technique de corrélation croisée (cross-correlation), mais il fonctionne sans référence extérieure (masque standard au thorium par exemple). Il s'agit donc plutôt d'une auto-corrélation ; cela signifie en outre que la vitesse du centre de masse de la binaire n'apparaît pas.

2 Atlas et les Pléiades

2.1 Les Pléiades

L'amas des Pléiades (M45, NGC1432 ; Subaru chez les japonais) est l'un des plus proches amas ouverts, avec une distance un peu supérieure à 100 pc. Sa magnitude V vaut 1.6, sa dimension apparente 110 minutes d'arc, le rougissement est de 0.03 mag et la métallicité serait solaire. Avec un âge d'environ 100 millions d'années c'est un amas assez jeune (log(age) = 8.13).

	d (pc)	π (mas)	$M - m$ (mag)	réf.
Séq. principale	132 ± 4	7.7 ± 0.2	5.60 ± 0.04	[5]
Pan *et al.*	135 ± 2	7.4 ± 0.1		[1]
Parallaxe au sol	131 ± 7	7.64 ± 0.43	5.59 ± 0.12	[8]
Hipparcos	118 ± 4	8.61 ± 0.23	5.32 ± 0.06	[7]

Tab. 1 – Parallaxes et modules de distances des Pléiades

2.2 Atlas

Atlas est une binaire interféromettrique et spectroscopique. La primaire est une géante B8 [1] et la secondaire une naine B8. La nature binaire d'Atlas est connue depuis son occultation par la lune en 1974. Le tableau 2 en donne les principales caractéristiques. Les vitesses de rotation ($v \sin i$) sont importantes : approximativement 40 km/s pour l'une et 200 km/s pour l'autre (d'après des estimations grossières sur les spectres ÉLODIE).

Atlas étant une des étoiles les plus massives de l'amas, il est probable qu'elle en occupe le centre plutôt que le halo. La distance d'Atlas est donc une bonne approximation de la distance du centre de masse de l'amas. Plus précisément, la distance angulaire entre Atlas et le centre de l'amas est de 0.50 degrés. Si on considère que la distance radiale est du même ordre de grandeur que la distance tangentielle, alors la distance d'Atlas correspond à la distance du centre des Pléiades à moins de 1% près.

Noms	Atlas, 27 Tau, HD23850, HR1178
RA(J2000)	03 : 49 : 09.47
Dec(J2000)	+24 : 03 : 12.3
Type spectral	B8 III
Mag V	3.62
Rotation	$v \sin i \sim 200$ km/s

Tab. 2 – Caractéristiques d'Atlas

2.2.1 Orbite interférométrique

Pan, Shao et Kulkarni [1] ont observé Atlas avec le Mark III Stellar Interferometer entre 1989 et 1992 et avec le Palomar Testbed Interferometer entre 1996 et 1999. Ils ont accumulé 19 mesures en dix ans. Le tableau 3 donne un résumé de leurs paramètres orbitaux, et la figure 1 montre leur orbite visuelle.

On dispose en plus de 7 positions de C. Hummel (Navy Prototype Optical Interferometer, communication privée). Ces données sont en bon accord avec celles de Pan *et al.*, malgré une différence de 180 degrés dans la définition des angles θ, ce qui est dû à un autre choix de modèle interférométrique et qui a été corrigé. Ces mesures ont également été reportées sur la figure 1.

Période	$P = 290.81 \pm 0.06$ jours
Époque du périastre	$T_o = 2450582.8 \pm 1.5$ JD
Demi-grand axe	$a'' = 12.94 \pm 0.11$ mas
Excentricité	$e = 0.246 \pm 0.006$
Inclinaison	$i = 108.5 \pm 0.5\,°$
Longitude du périastre	$\omega = 332.1 \pm 1.4\,°$
Angle de la ligne des nœuds	$\Omega = 155.0 \pm 0.6\,°$
Vitesses attendues	$K_1 = 27$ km/s
	$K_2 \approx 36$ km/s
Rapport de masse	$q = 0.72$

TAB. 3 – Paramètres orbitaux de Pan *et al*

2.2.2 L'argument de Pan *et al.*

Pan *et al.* obtiennent une distance pour l'amas des Pléiades, bien qu'ils n'aient pas les vitesses radiales. Voici leur argument :

- La troisième loi de Kepler donne la distance à partir de la masse totale, de la période et du demi-grand-axe apparent. Il faut donc trouver la masse totale d'Atlas.
- La différence des magnitudes ΔV, qui est connue, donne le rapport des luminosités L_2/L_1.
- Ensuite, la relation masse-luminosité de sur l'isochrone des Pléiades donne la masse totale et le rapport des masses : $L \propto M^\beta$ avec $\beta \approx 3.8$.

Cette démarche nécessite l'intervention d'un modèle (la relation masse-luminosité). A partir de leur modèle, Pan *et al.* déduisent une amplitude $K_1 = 27$ km/s.

La méthode de déconvolution spectrale donne les vitesses radiales, donc le demi-grand-axe géométrique ou, de manière équivalente, la masse totale, sans passer par les modèles.

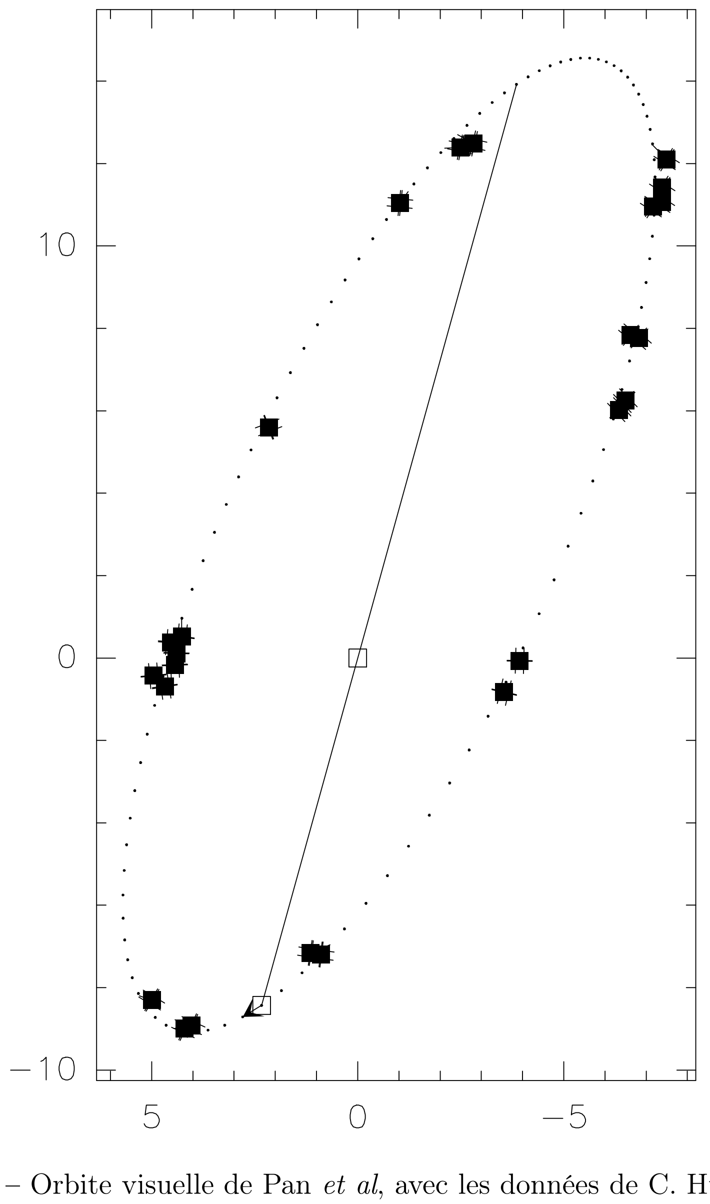

FIG. 1 – Orbite visuelle de Pan *et al*, avec les données de C. Hummel

3 Spectres

Les spectres que j'ai utilisés pour ce travail proviennent des spectrographes ÉLODIE et CORALIE et ont été fournis au format ascii, échantillonnés linéairement en longueurs d'onde.

Deux paramètres décrivent la qualité d'un spectre : la qualité en longueur d'onde est déterminée par la résolution, qui vaut

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 42000$$

pour ÉLODIE, et 50000 pour CORALIE. Le pouvoir de résolution dépend de la longueur d'onde, mais il ne varie pas d'un spectre à l'autre : $\Delta\lambda = 0.1$ Å à 4000 Å et $\Delta\lambda = 0.16$ Å à 6800 Å. La qualité en flux est déterminée par le rapport signal sur bruit (voir paragraphe 3.1.2), qui varie d'un spectre à l'autre et qui est moins bon dans le bleu.

Ces spectres, bien que dépouillés au préalable par P. North, doivent être un peu travaillés avant d'être utilisables :

- il faut faire la *normalisation* au continu
- la *correction barycentrique* ou *recentrage* sert à compenser la révolution (et dans une moindre mesure la rotation) de la terre. Cette correction qui varie selon la date et la direction d'observation est définie par

  $$V_{\text{bary}} = V_{\text{obs}} + \text{BERV} \quad \text{soit} \quad \lambda = \lambda_{\text{obs}} \left(1 + \frac{\text{BERV}}{c}\right) \tag{1}$$

  La valeur BERV (pour Barycentric Earth Revolution Velocity) se trouve dans les descripteurs des spectres au format s2d, ou dans les headers des spectres au format FITS.
  L'effet maximal de cette correction est d'environ 0.5 Å à 5000 Å, la vitesse de révolution de la terre autour du soleil étant d'environ 30 km/s. Pour effectuer la correction j'ai utilisé le script `bervcorr` (voir en page 31).
- les *cosmiques* simulent des raies en émission très fines. Ils sont donc facilement identifiables et doivent être supprimés.
- les *raies telluriques* (qui proviennent de l'atmosphère terrestre) polluent certaines régions spectrales. L'information initiale des raies stellaires est perdue et la région en question ne peux pas être utilisée. Il est donc important d'identifier ces raies telluriques.

La calibration en longueur d'onde a été vérifiée sur des raies telluriques (qui ne sont affectées ni par le mouvement de l'étoile, ni par le mouvement de la terre). Elle est précise au centième d'Ångström, soit une erreur inférieure au km/s.

3.1 Spectres d'archive

Les spectres disponibles dès le départ sont 4 spectres d'archive ÉLODIE pris par Y. Debernardi (Laboratoire d'astrophysique de l'EPFL) entre 1995 et 2001 à l'OHP. Ils ont été téléchargés depuis l'archive ÉLODIE [21] déjà normalisés, bien que la normalisation ne soit pas partout parfaite ; elle a été améliorée où nécessaire.

En principe, la correction barycentrique peut être effectuée par le pipeline de l'archive lorsqu'on télécharge le spectre ; mais il s'est avéré que cette option ne fonctionne pas.

Ces spectres ont été échantillonnés par pas de 0.05 Å.

	Nom	Date HJD -2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
1	n19951108	50030.47250	7.041	342	.101
2	n20001110	51859.53723	5.492	181	.390
3	n20001114	51863.56415	3.361	175	.404
4	n20010804	52126.62648	28.227	$198^{(a)}$	.309

TAB. 4 – Les spectres d'archive. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit et ϕ la phase. *(a)* d'après l'archive ÉLODIE S/N = 30, ce qui est probablement une erreur, voir paragraphe 3.1.2 page 9

3.1.1 Identification de raies

La figure **??** page **??** montre le domaine spectral complet, de 4000 à 6800 Å, pour les 4 spectres d'archive.

Pour identifier les raies on utilise des spectres synthéthiques [22] d'étoiles B5V et A0V. Atlas étant une B8, elle se trouve environ entre les deux.

Certaines raies ont pu être clairement identifiées, et pourront être utilisées par la suite pour la déconvolution (on leur a alors assigné une lettre) :

- Les quatre raies de Balmer de l'hydrogène sont bien visibles (à 4102, 4340, 4861 et 6563 Å).
- Un groupe de raies intéressantes se trouve près de 4480 Å. Il s'agit de raies de l'hélium I à 4471.5 et 4471.7 Å, ainsi que de raies du magnésium II à 4481.1 et 4481.3 Å (raies f, voir figure 5a page 17). La raie de MgII est représentée sur la figure 2, où on aperçoit bien les deux profils.
- Deux raies, d'hélium I et de fer II, se trouvent respectivement à 4921.9 et 4923.9 Å (raies g, voir figure 5b page 17).
- Une raie de silicium II se trouve à 5056.0 Å (raie h, voir figure 6a page 18).

– Deux autres raies de silicium II se trouvent à 6347.1 et 6371.4 Å (raies k, voir figure 6b page 18).

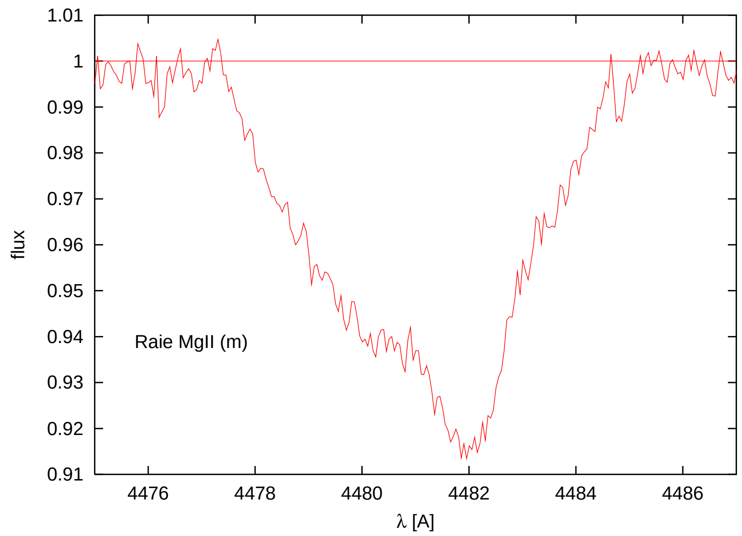

FIG. 2 – Raie MgII pour le spectre 1. On distingue les deux profils.

D'autres raies posent plus de problèmes :

– Une raie profonde se trouve à 6278 Å. Elle ne se trouve pas dans les spectres synthétiques, c'est donc peut-être une raie tellurique. Mais les raies telluriques ont une largeur qui correspond à la résolution du spectrographe ; or celle d'ÉLODIE est de $R = 42000$ donc $\Delta\lambda = 0.15$ Å à 6278 Å, mais cette raie a une largeur d'environ 1.4 Å. C'est peut-être un groupe de raies telluriques d'O_2 superposées, ou plutôt un effet d'une procédure automatique de nettoyage des raies telluriques de l'archive. (Dans les spectres hors-archive, cette raie est aussi présente, mais avec une largeur qui correspond à la résolution, et dans une forêt de raies telluriques.)
– Une autre raie profonde se trouve à 5896 Å. Elle n'apparaît pas non plus dans les spectres synthétiques et elle n'a pas pu être identifiée à une raie tellurique. (Dans les spectres hors-archive, cette raie est aussi présente, mais elle est également plus fine.)

Ces régions du spectre devront donc être évitées lors de la déconvolution.

3.1.2 Estimation du rapport signal/bruit

D'après l'archive ÉLODIE, le spectre 4 a un signal/bruit de 30, ce qui est visiblement trop peu d'après la qualité du spectre. Il a donc été décidé de refaire la mesure de ce rapport.

Le signal/bruit est défini par

$$S/N = \frac{\bar{x}}{\sigma} \qquad \text{où} \qquad \sigma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N-1}$$

et x_i étant le flux à la longueur d'onde λ_i et $\bar{x}$ la moyenne du flux dans l'intervalle considéré.

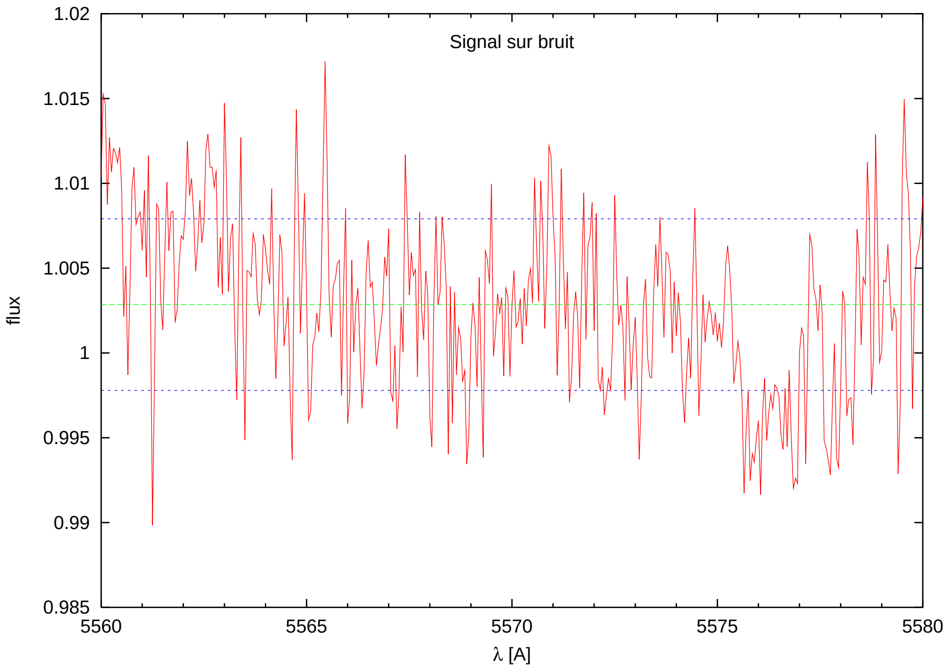

FIG. 3 – Rapport signal/bruit pour le spectre 4. En traits horizontaux, la moyenne $\bar{x}$ et l'intervalle $\bar{x} \pm \sigma$.

Ce calcul doit être fait dans un intervalle de longueurs d'ondes où le signal est dans le continu. Les S/N de l'archive ÉLODIE sont calculés à 5500 Å. Ici le calcul a été fait entre 5560 et 5580 Å, une région qui ne contient pas de raies et où le signal est assez plat. (voir script `ssb.gpl` page 30.)

Pour vérifier la pertinence du calcul on l'a effectué sur tous les spectres. Comme on peut le voir dans le tableau 5 la mesure est bonne (sauf pour le premier spectre dont le signal n'est pas très plat dans la région considérée). Les petites variations viennent du fait que les deux mesures ne sont pas faites exactement au mêmes endroits. On peut donc admettre que le spectre 4 a un S/N de l'ordre de 200.

Spectre	S/N ÉLODIE	S/N recalculé
1	342	269
2	181	181
3	175	171
4	30	198

TAB. 5 – Rapports signal/bruit

3.2 Spectres de septembre 2003

Trois autres spectres d'Atlas ont été pris les 10, 11 et 14 septembre 2003 par Christel Vuissoz (Laboratoire d'Astronomie de l'EPFL).

	Nom	Date HJD −2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
5	n20030910	52893.658	28.0215	173	.946
6	n20030911	52894.669	27.8391	199	.950
7	n20030914	52897.693	27.3723	255	.960

TAB. 6 – Spectres de septembre. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit mesuré et ϕ la phase.

Ces spectres étaient originalement en 6 morceaux non normalisés et non recentrés, échantillonnés par pas de 0.03 Å.

Ils ont été corrigés pour éliminer les rayons cosmiques et autres défauts avec la procédure `sunew` puis normalisés au continu avec la macro `normew`. Puis les morceaux ont été recollés.

La figure 4 page 12 représente la raie de Balmer H_α. Sur le spectre 7 on voit une forêt de raies telluriques de vapeur d'eau qui ne se retrouvent pas sur le spectre 2, où elles ont apparemment été corrigées par une procédure automatique.

3.3 Spectres d'octobre 2003

Un spectre a été pris à travers les nuages la nuit du 8 octobre par Y. Debernardi (Laboratoire d'Astronomie de l'EPFL). On peut donc s'attendre à des raies telluriques bien présentes. Le signal sur bruit ne vaut que 120, mais la phase est proche de la quadrature (vitesses radiales maximales).

Les données m'ont été communiquées au format `.bdf` ordre par ordre, elles ont été converties en ASCII, normalisées et corrigées des cosmiques.

Pour une raison inconnue, les ordres 61 à 67 sont vides, ce qui veut dire qu'il n'y a pas d'information à partir de 6325 Å. Certaines raies utiles par la

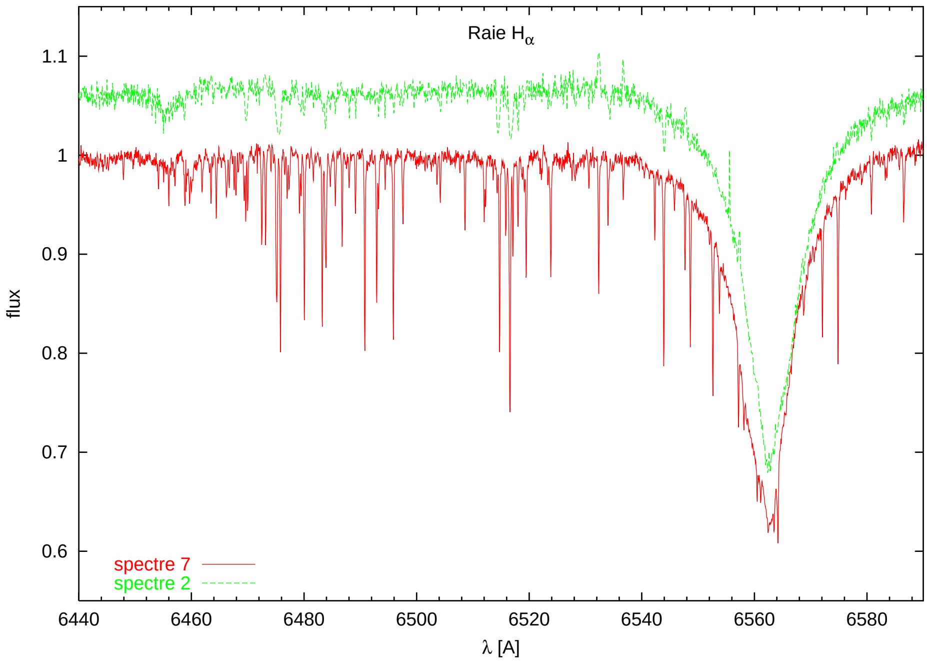

FIG. 4 – Raie H_α pour les spectres 2 (phase 0.39) et 7 (phase 0.96), avec une forêt de raies telluriques dans le 7 ; pour le spectre 2, ces raies telluriques ont été corrigées par une procédure automatique de l'archive ÉLODIE. Le spectre 2 est décalé vers le haut.

suite ne sont donc pas présentes sur ce spectre.

3.4 Spectres de novembre 2003

Deux spectres ont été pris dans la nuit du 14 novembre, à quelques minutes d'intervalle, et un autre dans la nuit du 17, par B. Pernier (Observatoire de Genève). Ces spectres sont échantillonnés par pas de 0.03 Å. Comme les spectres de septembre, ils ont été corrigés des cosmiques et recentrés.

	Nom	Date HJD -2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
9	n20031114a	52958.444	4.0671	198	0.169
10	n20031114b	52958.460	4.0273	291	0.169
11	n20031117	52961.441	2.5074	381	0.179

Tab. 7 – Spectres de novembre. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit et ϕ la phase.

La figure **??** page **??** représente le domaine spectral complet pour les trois spectres de novembre.

3.5 Spectres de décembre 2003

Cinq spectres ont été pris avec CORALIE par M. Groenewegen (Institut d'astronomie de l'université de Leuven), du 11 au 20 décembre.

Quatre autres ont été pris par J-P. Sivan (Observatoire de Haute-Provence) avec ÉLODIE, un le 22 et trois le 23, à moins d'une heure d'intervalle. Ces trois spectres ont été sommés en un seul (spectre 18) dans le but d'augmenter leur rapport signal sur bruit.

On a donc 7 spectres en décembre, mais la plupart ont un signal sur bruit assez mauvais.

3.6 Spectres de janvier 2004

Deux spectres ont été pris en janvier par R. Monier (GRAAL, Université de Montpellier) avec un excellent signal sur bruit (plus de 300), mais pour diverses raisons techniques, ils ne sont pas encore disponibles à l'heure où je termine ce travail.

3.7 Résumé des spectres

En date du 17 mars 2004 on dispose donc de 18 spectres, dont 8 ont un signal sur bruit de 200 ou plus.

Les phases concernées par ces spectres sont assez bien réparties entre 0.9 et 0.4 ; par contre il n'y a encore aucune donnée pour les phases de 0.4 à 0.9.

	Nom	Date HJD -2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
12	n20031211	52985.650	-10.151	223	0.263
13	n20031214	52988.631	-11.593	148	0.273
14	n20031216	52990.647	-12.621	127	0.280
15	n20031218	52992.621	-13.519	166	0.287
16	n20031220	52994.629	-14.499	169	0.294
17	n20031222	52996.391	-15.266	117	0.300
	n20031223a	52997.358	-15.651	131	0.303
	n20031223b	52997.371	-15.681	122	0.303
	n20031223c	52997.385	-15.714	134	0.303
18	n20031223	52997.371	-15.681	176	0.303

Tab. 8 – Spectres de décembre. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit et ϕ la phase.

N°	Nom	Date HJD -2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
1	n19951108	50030.47250	7.041	342	0.101
2	n20001110	51859.53723	5.492	181	0.390
3	n20001114	51863.56415	3.361	175	0.404
4	n20010804	52126.62648	28.227	198	0.309
5	n20030910	52893.65800	28.021	173	0.946
6	n20030911	52894.66900	27.839	199	0.950
7	n20030914	52897.69300	27.372	255	0.960
8	n20031008	52921.48030	20.940	120	0.042
9	n20031114a	52958.44280	4.067	198	0.169
10	n20031114b	52958.46010	4.027	291	0.169
11	n20031117	52961.44050	2.507	381	0.179
12	n20031211	52985.65028	-10.151	223	0.263
13	n20031214	52988.63117	-11.593	148	0.273
14	n20031216	52990.64686	-12.621	127	0.280
15	n20031218	52992.62079	-13.519	166	0.287
16	n20031220	52994.62921	-14.499	169	0.294
17	n20031222	52996.39110	-15.266	117	0.300
18	n20031223	52997.37136	-15.681	176	0.303

Tab. 9 – Récapitulatif de tous les spectres. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit et ϕ la phase.

3.8 Spectres à venir

Une demande de temps de téléscope [9] a été déposée à l'OHP pour prendre des spectres d'Atlas en mode d'observation de service, pendant les mois de mars et août 2004. Cette demande a été acceptée. On peut, d'une manière réaliste, espérer une vingtaine de spectres pendant ces deux mois. Ces observations devraient donc doubler le nombre de données disponibles.

Le mois de mars correspond à des phases autour de 0.6, et le mois d'août à des phases autour de 0.12. Les spectres du mois de mars seront donc particulièrement utiles puisque situés près du minimum de la courbe de vitesse radiale de la primaire (à la quadrature), dans une une région où il n'y a pas encore de données (voir figure 7 page 22).

4 Déconvolution

Une fois les spectres préparés et les raies utiles identifiées, on peut passer à la déconvolution. Celle-ci se fait en deux étapes : la première avec le programme `prekor`, la seconde avec `korel` (voir page 3).

4.1 Préparation

Le code `prekor` sert de préparation à `korel`. Il rééchantillonne les spectres dans les domaines de longueur d'onde choisis (voir [13] et le fichier `prekor.lst` à la page 31). C'est avec ce programme qu'il faut choisir les raies qui doivent être déconvoluées par `korel`. Pour que la déconvolution se passe bien il est important que les bords des régions spectrales choisies soient dans le continu.

4.1.1 Raies utilisées

Le tableau 10 donne une liste des raies qui peuvent être utilisées, avec la manière de les choisir dans `prekor`. Pour éviter toute confusion j'ai nommé les spectres par un nombre et les raies par une lettre.

Label	Raie	λ_o [Å]	ordres	λ_{ini} [Å]	RV/bin [km/s]
a	H_α	6562.8	64	6530.0	6.0
b	H_β	4861.3	31, 32	4830.0	7.0
c	H_γ	4340.5	16, 17	4310.0	7.5
d	H_δ	4101.7	8, 9	4070.0	8.0
f	HeI, MgII	4471.6, 4481.2	20, 21	4460.0	4.5
g	HeI, FeII	4921.9, 4923.9	33	4910.0	3.0
h	SiII	5056.0	36	5045.0	2.3
k	SiII (2 raies)	6347.1, 6371.4	61	6335.0	4.5

Tab. 10 – Liste des raies utilisées. Les ordres indiqués sont ceux d'Élodie. Les deux dernières colonnes sont les paramètres a passer à `prekor` pour que les bords soient bien dans le continu. La résolution d'Élodie est d'environ 7 km/s, ce qui veut dire que les raies de Balmer ne sont pas très bien échantillonnées.

Les figures 5 et 6 représentent ces raies (sauf celles de Balmer) pour un choix de spectres bien répartis en phase. Sur ces figures le continu est placé d'après la phase du spectre, ce qui permet de suivre le déplacement des raies. Les traitillés verticaux indiquent la position au repos des raies.

Certains éléments peuvent peut-être nuire à la déconvolution : la raie f par exemple se trouve à cheval sur deux ordres Élodie ; dans la raie h se trouvent de nombreuses raies telluriques ; c'est aussi le cas de la raie k, mais dans une moindre mesure.

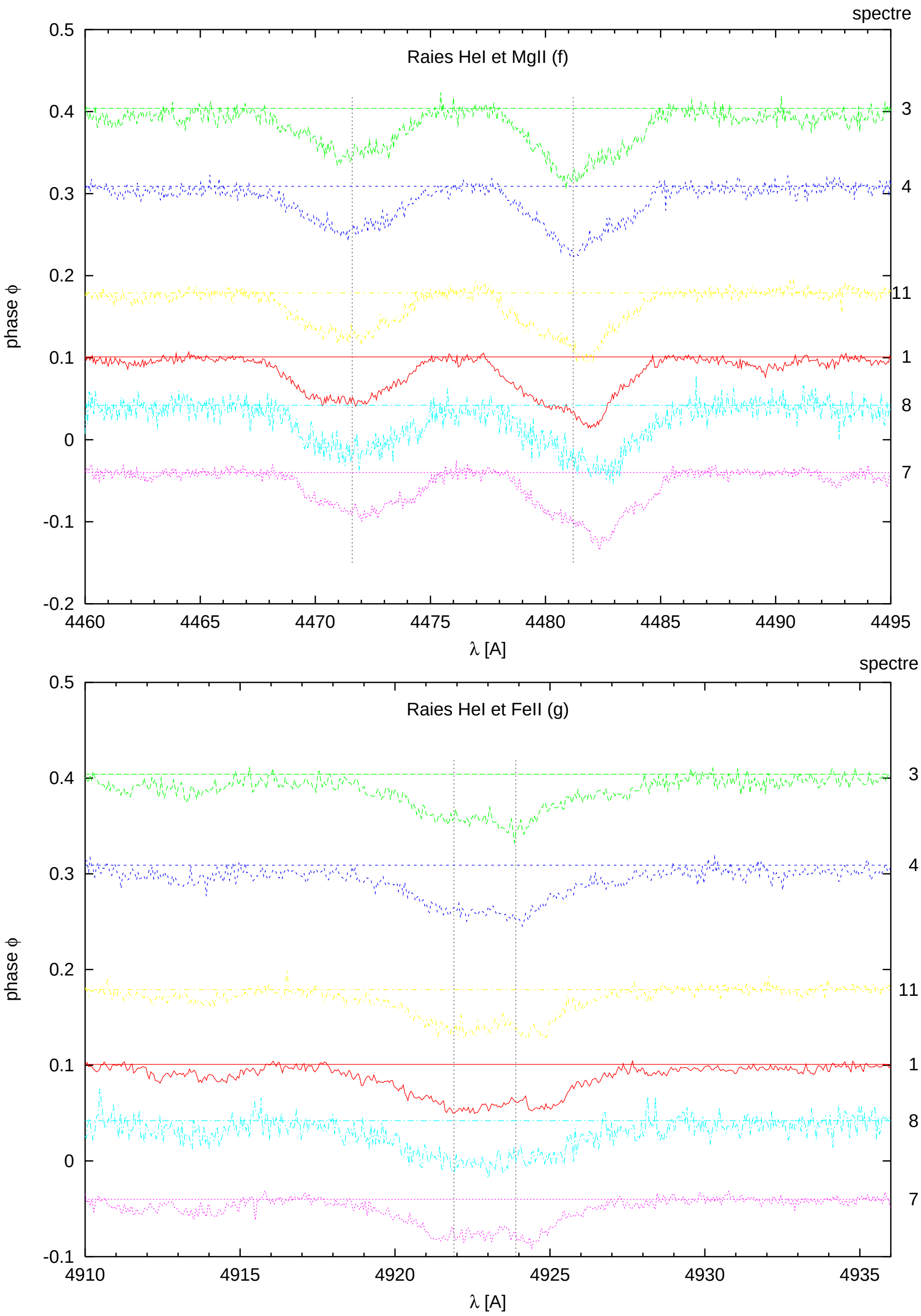

FIG. 5 – Raies f et g pour un choix de spectres

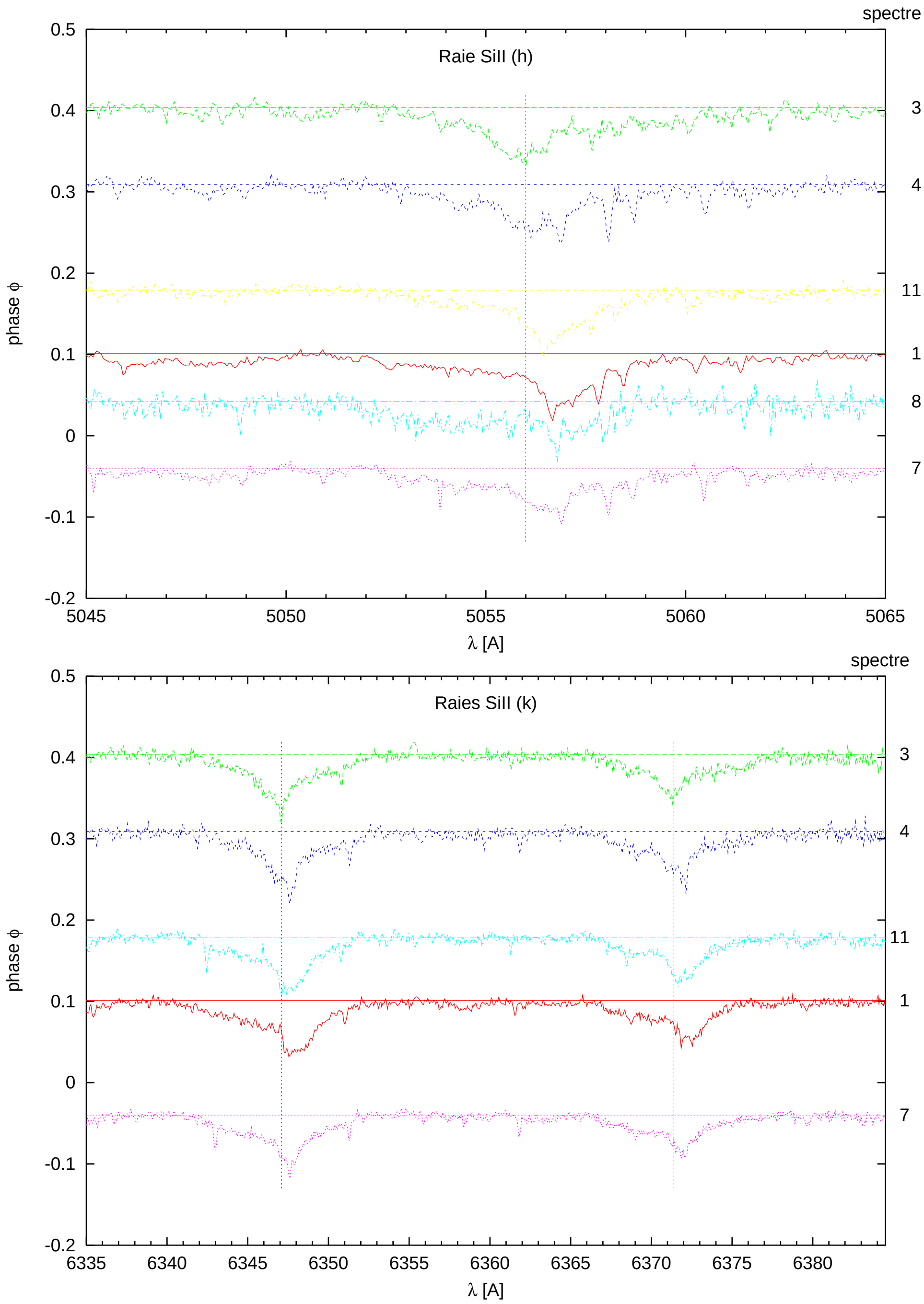

FIG. 6 – Raies h et k pour un choix de spectres

En pratique, les raies de Balmer n'ont pas été utilisées (ou ont donné de très mauvais résultats). Il y a plusieurs raisons à cela, qui viennent toutes de la grande largeur de ces raies (une trentaine d'Ångström, contre 7 à 10 pour les raies f-k) :

- elles se trouvent presque toutes sur plusieurs ordres, d'où des problèmes de raccordement ;
- à cause de leur largeur, il est difficile de les normaliser de la même manière pour chaque spectre ;
- le décalage Doppler est faible par rapport à la largeur de la raie ;
- elles ne peuvent pas être assez bien échantillonées par `prekor`.

4.1.2 Limitations de `prekor`

Le programme `prekor` a certaines limitations :

- il ne tourne que sous Windows (pour des raison d'affichage graphique).
- le domaine spectral que `prekor` peut lire d'un coup est limité à 4100 points, ce qui représente 200 Å si le spectre est échantilloné par pas de 0.05 Å, ou environ 125 Å s'il l'est par pas de 0.03 Å.
  Cela oblige à découper les spectres en morceaux avant de pouvoir les utiliser avec `prekor`.
- la syntaxe du fichier `prekor.lst` est très restrictive, voir à la page 31.
- on ne peut combiner que des spectres qui sont échantillonnés de la même manière (qui ont les mêmes λ_i). Deux groupes de spectres échantillonnés avec un pas différent, par exemple, nécessitent deux runs séparés de `prekor`, dont les sorties devront être concaténées par la suite.

Toutefois, le code source (en FORTRAN) est disponible sur le site de Hadrava et pourrait être adapté pour UNIX.

4.1.3 Sorties de `prekor`

La sortie de `prekor` est un fichier `PREKOR.OUT` qu'il faut utiliser en tant que `korel.dat` avec `korel`.

Dans ce travail, j'ai renommé ces fichiers de sortie d'après le label de la raie qu'ils contiennent, suivi des numéros des spectres inclus. Par exemple, le fichier `a567.out` contient la raie H_α pour les spectres de septembre. Cette approche permet de choisir à volonté le contenu du fichier d'entrée de `korel`. Par exemple, pour utiliser les raies f et g avec tous les spectres, on utilisera la commande

```
cat f*.out g*.out > korel.dat
```

4.2 Korel

La déconvolution proprement dite se fait avec `korel`. Ce logiciel a besoin de deux fichiers d'entrée : le fichier `korel.dat` qu'on forme à partir des sorties de `prekor` et le fichier `korel.par` (voir page 32) qui contient les valeurs initiales des éléments orbitaux ainsi que les instructions pour l'ajustement.

La sortie est principalement constituée du fichier `korel.res`. Ce fichier contient bout à bout tous les résultats de la déconvolution, aussi bien les éléments orbitaux que les vitesses radiales ou les spectres déconvolués.

4.2.1 Calculs de distance et parallaxe

A partir des amplitudes des courbes de vitesses radiales K_i de `korel`, on obtient le demi-grand axe projeté

$$a \sin i = (K_1 + K_2) \frac{P}{2\pi} \sqrt{1 - e^2} \tag{2}$$

ce qui donne le demi-grand axe a puisqu'on connaît l'inclinaison i. La distance s'obtient (en parsec) par

$$d = \frac{a}{a''} \tag{3}$$

et la parallaxe (en arcsec) par

$$\pi = \frac{1}{d} \tag{4}$$

Enfin la somme des masses (en masses solaires) se calcule par Kepler,

$$M_{tot} = \frac{a^3}{P^2} \tag{5}$$

En combinant les équations 3, 4 et 5, on obtient la parallaxe dynamique

$$\pi = \frac{a''}{(P^2 M_{tot})^{\frac{1}{3}}} \tag{6}$$

4.2.2 Le script `zkor.pl`

Dans le but d'automatiser au maximum le processus de traitement des données, j'ai écrit le script `zkor.pl` qui figure en page 33. Ce script en perl lance le programme `korel` puis traite les informations de sortie qui se trouvent dans le fichier `korel.res`. Les arguments à passer à la commande sont les lettres des raies à utiliser, séparées par des espaces. Le script cherche tous les fichiers `*.out` dont le nom commence par les lettres données et les concatène dans `korel.dat`. Les options suivantes sont reconnues par le programme :

-v : mode bavard. La sortie de `korel` s'affiche normalement à l'écran (plus lent).

-np : n'affiche pas les graphiques. (On peut les engendrer après en exécutant les scripts `gnuplot` correspondants.)

-ns : n'affiche pas les graphiques des spectres individuels.

Par exemple, la commande `zkor.pl -ns f g k` lancera une déconvolution à partir des raies f, g et k avec tous les spectres disponibles, sans afficher les spectres déconvolués.

Les différentes étapes du processus sont :
- créer `korel.dat` à partir des arguments.
- exécuter `korel`.
- extraire le nombre de spectres utilisés par `korel`. Ce nombre est nécessaire pour le calcul du résidu.
- extraire les vitesses radiales et les écrire dans un fichier à part (`vitrad.data`).
- extraire les éléments orbitaux et les afficher à l'écran.
- calculer le résidu de l'ajustement d'après les valeurs O–C des vitesses radiales. Les résidus σ_i sont calculés pour les deux étoiles selon

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum(V_{oi} - V_{ci})^2}{N-1} \tag{7}$$

  où O signifie observé et C calculé. N est le nombre de spectres.
- calcul de distance, parallaxe, somme des masses.
- affichage des courbes de vitesses et des vitesses radiales obtenues dans un graphique `gnuplot`. Cela permet de vérifier la qualité de l'ajustement. Le même graphique est écrit dans le fichier `vitrad.eps`.
- copie de certaines valeurs dans le fichier `allfits.data` (voir tableau 11 pour les détails).
- reformattage des résultats pour `orbit`. Les vitesses radiales sont écrites dans le fichier `atlas.orbit.dat` pour être ensuite utilisées avec le logiciel `orbit`.
- extraction et affichage des spectres individuels (un graphique par raie, voir figure 10).

1	date et heure	8	q convergé
2	labels des raies	9	parallaxe π (arcsec)
3	nombre de spectres	10	distance d (pc)
4	K_1 initial (km/s)	11	masse totale ($M_\odot$)
5	q initial	12	résidu σ_1 (km/s)
6	nombre d'itérations	13	résidu σ_2 (km/s)
7	K_1 convergé (km/s)	14	incertitude sur d (pc)

TAB. 11 – Colonnes de `allfits.data`. q est le rapport des masses.

5 Résultats

5.1 Critères de qualité

Il est important de vérifier les solutions obtenues avec `korel`, car ce programme donne parfois des résultats qui semblent convaincants au niveau de l'ajustement des vitesses radiales, mais qui sont en fait totalement incohérents pour ce qui est de la masse par exemple.

Plusieurs critères permettent de vérifier la qualité de l'ajustement.

5.1.1 Résidus

Le premier critère est basé sur les résidus calculés par la formule (7) (page 21) à partir des valeurs O−C (observé − calculé) des vitesses radiales. La figure 7 donne la courbe de vitesse radiale, avec en traits pleins les courbes calculées avec les paramètres orbitaux résultants de `korel`, en points les vitesses obtenues aves les diverses raies des différents spectres, et des barres d'erreur représantant le résidu σ_i pour chaque étoile.

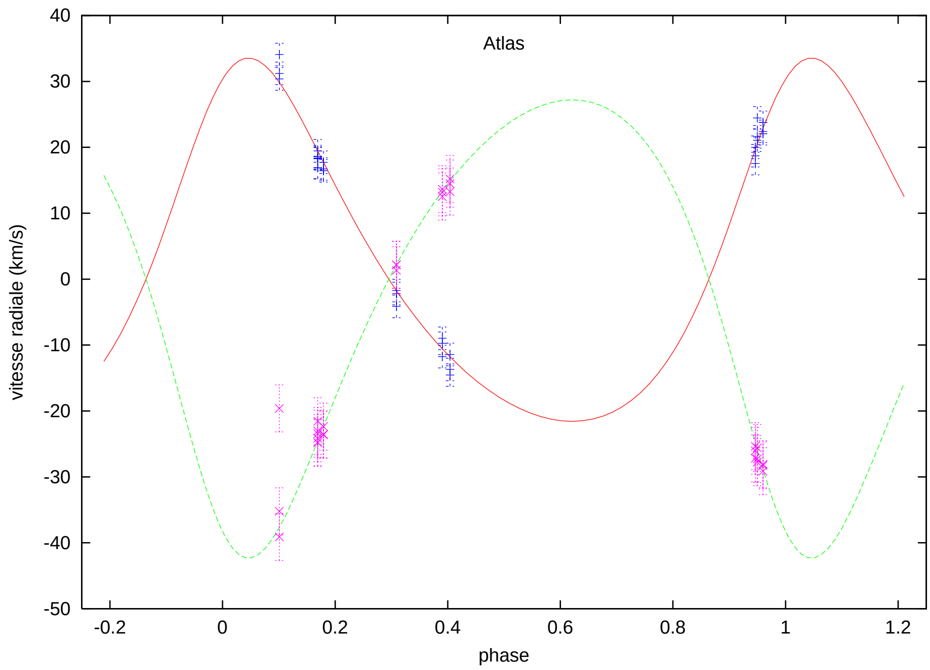

FIG. 7 – Courbe de vitesses radiales

Le résidu total est obtenu par $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$. Sur un graphe parallaxe – résidu, on peut s'attendre à un minimum du résidu pour la bonne parallaxe.

5.1.2 Convergence de K_1

Un autre critère est la convergence de K_1. Le raisonnement est le suivant : si la déconvolution est bonne, alors le paramètre libre K_1 va toujours converger vers la même valeur finale, quelle que soit sa valeur initiale dans un intervalle raisonnable.

On peut tester cette convergence en effectuant plusieurs dizaines de runs de `korel` en changeant uniquement la valeur initiale de K_1. La figure 8 montre les valeurs de K_1 obtenues par une centaines de runs, avec des valeurs initiales aléatoires distribuées uniformément entre 15 et 30 km/s. (La valeur q du rapport de masse n'est pas fixée : elle est ajustée par `korel` comme K_1. C'est la valeur initiale de q qui est fixée.)

5.1.3 Spectres individuels déconvolués

La qualité des spectres individuels est également un critère. Il s'agit, pour chaque région spectrale utilisée, du dernier spectre de la liste (selon le fichier `prekor.lst`), déconvolué par `korel`.

L'interprétation de ces spectres est délicate, car la normalisation est souvent mauvaise, parfois au point qu'il est difficile de distinguer les raies du continu. Citons P. Hadrava [13, page 9] :

> "It must be hold in mind, that the values of continua of individual components are unknown, so that the depths of lines are normalized with respect to the sum [of] all continua. The number 1.0 is added to each component spectrum to prevent the negative values in absorption profiles."

Néanmoins, si les raies sont distinguables, on peut alors tenter d'évaluer leur largeur équivalente et leur élargissement (dû à la rotation de l'étoile), et comparer avec ce que l'on sait de la binaire au niveau de la rotation et des types spectraux.

5.2 Discussion

Après quelques runs de `korel` il paraît clair que les résidus seuls ne sont pas un critère suffisant. Par exemple, en utilisant la raie h seule, on obtient les deux résidus inférieurs à 1 km/s, soit une excellente courbe de vitesse ; par contre la masse totale déduite est de 15 masses solaires (alors qu'elle devrait se trouver entre 5.5 et 9 masses solaires), la parallaxe est de 6 mas, soit une distance de 165 pc, ce qui est énorme et irréaliste. Des résultats similaires sont obtenus avec les autres raies seules.

Par contre, dès qu'on utilise plusieurs raies, les résidus deviennent plus grands, mais la distance devient plus réaliste.

5.2.1 Approche statistique

D'autre part, on remarque que `korel` est très sensible aux conditions initiales : une petite variation de la valeur initiale de K_1 peut donner un résultat très différent.

Pour s'affranchir de ce problème, on peut soit choisir une valeur initiale aussi réaliste que possible (en se basant sur d'autres techniques) et obliger le programme à rester aussi proche que possible de cette valeur, soit adopter une approche statistique : faire tourner le programme quelques centaines de fois en lui donnant des valeurs initiales réparties aléatoirement dans un intervalle raisonnable, puis choisir les solutions réalistes. Dans les deux cas, il y a un choix à faire. La seconde solution permet en plus de tester la convergence de K_1 (voir paragraphe 5.1.2).

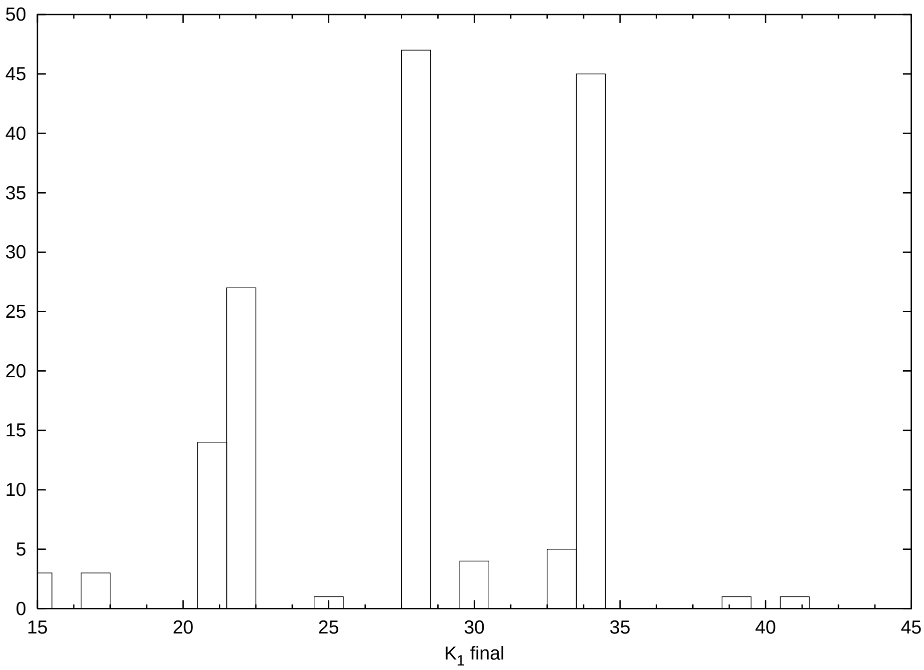

FIG. 8 – Histogramme de convergence de K_1

Dans ce but, j'ai fait 250 runs de `korel` à partir des raies f, g et k (la raie h est exclue car trop polluée par des telluriques), avec tous les spectres disponibles. La valeur initiale de K_1 a été prise aléatoirement et uniformément entre 15 et 30 km/s. La valeur initiale du rapport de masse est fixée à $q = 0.72$.

La figure 8 représente les valeurs finales de K_1. On remarque trois signaux très nets, dont un à 28 km/s. C'est le seul pic réaliste ; les deux autres correspondent à des distances beacoup trop proches ou beaucoup trop lontaines. Ils sont peut-être dûs à un effet de minima locaux évoqués en page 3. La convergence est donc bonne, même si elle n'est pas unique. Les résidus sont de l'ordre de 4 km/s. On remarque par ailleurs que la convergence se fait vers le haut : les valeurs finales sont systématiquement plus grandes que les valeurs initiales. Il faut donc de préférence choisir des valeurs initiales plus petites que la valeur attendue afin de gagner du temps de calcul.

Cette valeur de 28 km/s est très proche de celle annoncée par Pan *et al.* de $K_1 = 27$ km/s [1].

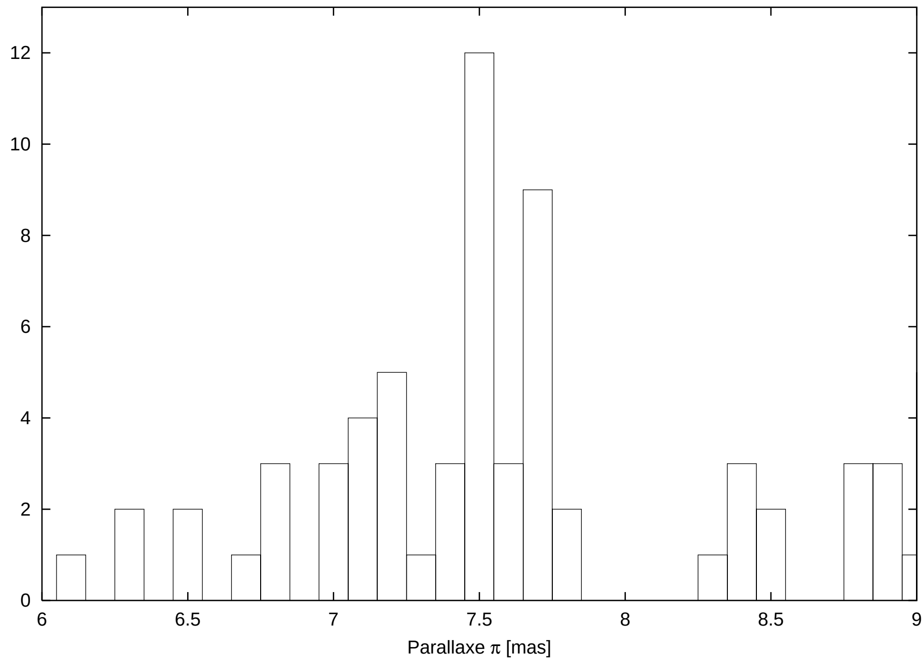

FIG. 9 – Distribution de parallaxe

La figure 9 montre la distribution de parallaxe qui correspond à ce pic de K_1. La distribution est moins piquée que celle de K_1 : cela vient du fait que la parallaxe dépend aussi du deuxième paramètre libre, le rapport des masses, et pas seulement de K_1. La valeur finale de q se trouve répartie entre 0.7 et 0.9.

On remarque un signal plus intense vers 7.5 et 7.7 mas. Ces valeurs sont très proches de celle obtenue par l'ajustement de séquence principale.

Le bruit au-delà de 8.0 mas vient du pic à 22 km/s de la figure 8.

5.2.2 Spectres déconvolués

La figure 10 en page 27 montre deux exemples de spectres individuels. Malgré la très mauvaise normalisation (qui n'a pas été retouchée), on reconnaît les raies de la primaire et de la secondaire. Un fait reste troublant : les raies de la secondaire semblent dans certains cas plus larges et même plus profondes que celles de la primaire, ce qui est étonnant vu la différence de magnitude entre les deux compagnons. On peut se demander si il n'y a pas eu, à ce niveau, une mauvaise attribution des spectres entre les deux composantes de la binaire (peut-être une ambiguïté de 180 degrés dans la définition de la longitude du périastre ω ?).

Toutefois, on se souviendra que P. Hadrava recommande la plus grande prudence avec les spectres déconvolués [13, page 9], surtout au niveau de la normalisation.

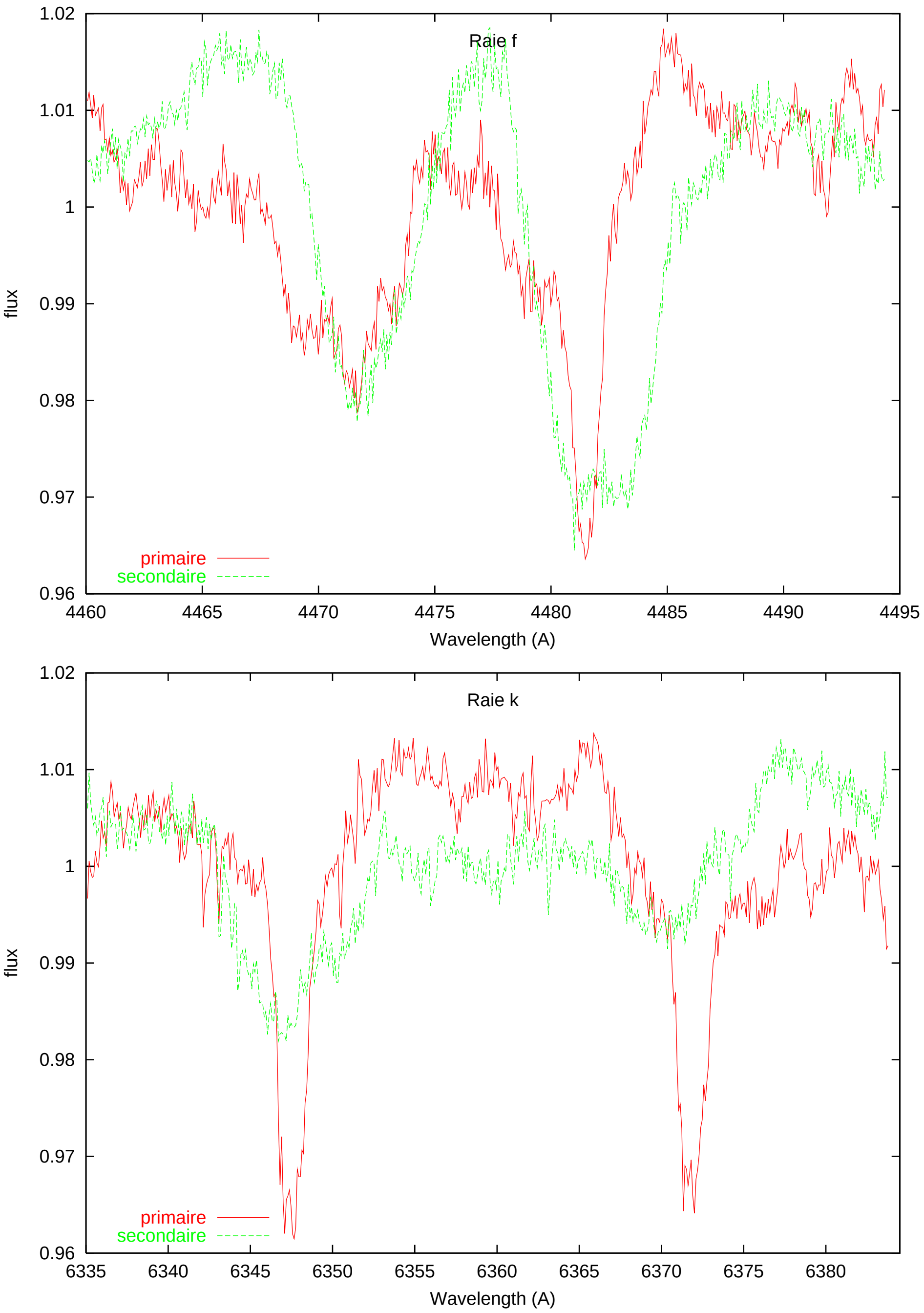

FIG. 10 – Raies f et k déconvoluées

6 Conclusion

Au vu des résultats obtenus dans la section précédante, il paraît clair que le but de ce travail n'a pas vraiment pu être atteint pour l'instant : aucune courbe de vitesses radiales définitive, aucune distance précise ne peuvent être données dans l'état actuel des mesures.

La déconvolution des spectres d'Atlas s'est révélée être une tâche plus ardue qu'on ne l'espérait au début. Le peu de raies disponibles et la faible profondeur de celles-ci exigent une grande quantité de spectres avant d'obtenir de bonnes solutions. Avec les spectres actuellement disponibles, la solution orbitale est instable et varie passablement avec la quantité et la qualité des spectres utilisés.

Toutefois, la vitesse radiale K_1 converge dans tous les cas vers une valeur comprise entre 27 et 28 km/s, ce qui confirme les résultats de Pan *et al.*

Il est certes frustrant de ne pouvoir donner ici que des résultats aussi provisoires. Cependant, certains buts du travail ont été atteints : des outils informatiques ont été développés et sont prêts pour traiter les données qui arriveront ces prochains mois.

Ce travail m'a en outre permis de découvrir le langage de programmation `perl` et de faire d'importants progrès avec les logiciels `emacs` et `gnuplot`, ainsi qu'avec l'environnement LaTeX.

Ce qu'il reste à faire

Ce travail est loin d'être terminé. Voici quelques possibilités pour la suite :

- Incorporer les nouveaux spectres de mars et août 2004
- Ecrire une version UNIX de `prekor` pour une meilleure automatisation du traitement des données
- Refaire la démarche de déconvolution avec le programme `FDBinary` de S. Ilijic et comparer les résultats avec ceux de `korel`. Ce programme, plus récent que `korel`, est décrit dans [11, chap. 4]. Son principe est analogue à celui de `korel`, mais avec un format d'entrée différent, ce qui nécessite un rééchantillonage des spectres (en $\log \lambda$). Les sorties sont équivalentes à celles de `korel`.
- Créer des masques de raies telluriques pour soustraire ces raies là où elles gênent la déconvolution (raie h par exemple), ce qui permettrait d'utiliser plus de raies.
- Un autre objet, HD 107700, est également une binaire spectroscopique et interférométrique, mais appartient à l'amas Coma Ber. Des spectres d'archive ÉLODIE sont disponibles pour cette étoile. Il s'agit d'une binaire SB1 : la courbe de vitesse radiale existe, mais seulement pour la primaire. Il reste à établir la courbe de vitesse du compagnon, et à chercher son spectre. Voir l'annexe C en page 39.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier Pierre North pour toute l'aide qu'il m'a apportée pendant ce travail.

J'aimerais remercier ensuite toutes les personnes qui ont observé et pris les spectres : Christel Vuissoz, Yves Debernardi, Bernard Pernier, Martin Groenewegen et Richard Monnier.

Je remercie aussi Yves, Jean-Claude Mermilliod, Alexander, Christel (merci pour le thé), Caroline et Nab pour leur aide, leurs conseils et les discussions.

Sauverny, octobre 2003 – février 2004

Annexes

A Fichiers et scripts

A.1 Script ssb.gpl

```
reset
set xlabel 'lambda [A]'
set ylabel "flux"
set mxtics 5
set nokey

FIT_LIMIT = 1e-10; M=0.05
B=5560; T=5580
m(x) = 1.0+M
fit [B:T] m(x) 'ssb.data' via M

set terminal table
set output 'ecarts.data'
plot [B:T] 'ssb.data' using ($1):(($2-(1.0+M))*($2-(1.0+M)))
s(x) = S; FIT_LIMIT = 1e-8
fit [B:T] s(x) 'ecarts.data' via S
print 'SSB = ', (1.0+M)/sqrt(S)

set terminal x11 1
set title "Signal sur bruit" 0,-3
plot [B:T] 'ssb.data' using ($1):($2) w lines, m(x),\
     (m(x)+sqrt(S)), (m(x)-sqrt(S)) lt 3

set term postscript eps enhanced color
set output 'ssb.eps'
set xlabel "{/Symbol l} [A]"
replot
```

Ce script `gnuplot` calcule le rapport signal/bruit du spectre qui se trouve dans le fichier `ssb.data`.

Le calcul s'effectue entre les limites B et T. D'abord, le logiciel calcule la moyenne $1 + M$ du signal, puis l'utilise pour obtenir les écarts à cette moyenne, qu'il place dans le fichier `ecarts.data`.

Ensuite la moyenne S des écarts puis le signal sur bruit sont calculés, et un graphique analogue à celui de la figure 3 est affiché à l'écran pour vérifier le calcul. Finalement la même figure est créée au format eps.

A.2 Script bervcorr.sm

```
bervcorr 2      # correction berv
    erase
    data $1
    lines 0 0
    read {lambdaObs 1 fluxObs 2}

    echo "berv = "$2" km/s"
    set lambda0 = lambdaObs*(1.0 + $2/299792.45)
    spline lambda0 fluxObs lambdaObs fluxCorr
    echo "output file is "$1.corr
    print $1.corr '%4.4f\t%1.6f\n' {lambda0 fluxCorr}

    limits lambdaObs fluxCorr
    box
    connect lambdaObs fluxCorr
```

Ce script `SuperMongo` effectue la correction barycentrique d'après l'équation (1) (page 7) à l'aide d'une fonction spline cubique. Il se trouve sous `/home/vaud/zwahlen/macro/bervcorr`.

Les arguments d'entrée sont le nom du fichier contenant le spectre au format ASCII et la valeur BERV en km/s.

A.3 Fichier prekor.lst

```
norm0001.dat 50030.4725 1.000 0   0.000
norm0002.dat 51859.5372 1.000 0   0.000
norm0003.dat 51863.5642 1.000 0   0.000
norm0004.dat 52126.6265 1.000 0   0.000
norm0005.dat 52893.6580 1.000 0   0.000
norm0006.dat 52894.6690 1.000 0   0.000
norm0007.dat 52897.6930 1.000 0   0.000
norm0008.dat 52921.4803 1.000 0   0.000
norm0009.dat 52958.4438 1.000 0   0.000
norm0010.dat 52958.4601 1.000 0   0.000
norm0011.dat 52961.4405 1.000 0   0.000
```

Le format des colonnes doit être respecté au caractère près :

- la première colonne indique le nom du fichier qui contient le spectre. Ce nom doit être composé d'exactement 12 caractères, avec un seul point suivi d'une extension de 3 caractères (format Windows).
- la deuxième colonne donne la date en jours julien avec 5 chiffres avant le point et 4 après.
- la troisième est le poids du spectre avec 3 décimales. Un poids négatif permet d'ignorer le spectre.
- la quatrième donne le format du fichier : 0 pour un fichier ASCII, 5 pour un fichier FITS.
- la dernière colonne contient la correction en vitesse radiale à effectuer avec 3 décimales, en km/s. En principe, cette colonne permet de passer la valeur BERV pour faire la correction barycentrique dans `prekor`. Cependant, à cause d'un manque de clarté au niveau du signe de cette valeur, cette possibilité n'a pas été utilisée, et la correction a été faite au préalable.

Autre particularité, il ne faut pas laisser de ligne vide à la fin du fichier, sinon `prekor` renvoie une erreur de type *file name blank or missing.*

A.4 Fichier korel.par

```
1 1 0 0 0 1 0 2 1          | key(5), spectres, filtre, plot, print
1  0 1 0   290.81   0.0    | periode
2  0 1 0 50582.8    0.0    | temps au periastre
3  0 1 0      0.246 0.0    | eccentricite
4  0 1 0   332.1    0.0    | longitude periastre A
5 15 1 1    30.0    2.0    | amplitude K1
6 15 1 1    0.72    0.02   | rapport des masses
0 0 0 0 0 0                | fin du fichier
```

Dans la première ligne, les cinq premiers nombres indiquent le nombre d'étoiles présentes dans les spectres (ici deux étoiles), et les quatre autres nombres sont des options de sortie.

Les autres lignes contiennent les paramètres orbitaux et leurs paramètres d'ajustement. La première colonne identifie le paramètre, la deuxième indique le nombre d'itérations pour la convergence (avec 0, pas de convergence). La 3^e et la 4^e colonnes indiquent si les valeurs de l'élément et du pas doivent être lues, et les 5^e et 6^e sont les valeurs de l'élément et de son pas.

Pour Atlas, les seuls éléments qui ne sont pas connus sont les deux vitesses radiales (autrement dit, K_1 et le rapport des masses). Donc tous les éléments sont fixes, sauf ces deux qui sont ajustés avec 15 itérations ici.

A.5 Script zkor.pl

```
#!/usr/local/bin/perl
# Script by N. Zwahlen, 2003
$RES = "korel.res";
$gnuplot = ". /unige/obs/util/env/gnu.sh;gnuplot ";
$gnuplot .= "-background white -persist";
$ID = "star.id";
$PAR = "korel.par";
$verbose = 0; $noplot = 0; $nodsplot = 0;

# arguments ligne de commande
foreach $arg (@ARGV){
    if    ($arg eq "-v") {$verbose = -1}
    elsif ($arg eq "-np") {$noplot = -1}
    elsif ($arg eq "-ns") {$nodsplot = -1}
    else {
    $raies .= $arg . ",";
    $catr  .= $arg . "*.out ";
    }
}
chop $raies;
print "Cree korel.dat avec raies $raies\n";
system "cat $catr > korel.dat";

&runKorel($verbose);

# Trouver le nombre de spectres
$reshead = `head -1 $RES | cut -b 15-`;
@resheadVal = split(' ',$reshead);
$nSpectra=$resheadVal[0];
print "\nFound $nSpectra spectra\n";

# Extraire les vitesses radiales
print "Writing vitrad.data\n";
`tail -$nSpectra $RES > vitrad.data`;

# Extraire les elements orbitaux
print "Extracting orbital elements\n\n";
$Period = &nfix(3, &grepVal($RES, "'! PERIOD'", 3));
$Epoch  = &nfix(2, &grepVal($RES, "'EPOCH'", 4));
$Ecc    = &nfix(4, &grepVal($RES, "'! ECC'", 3));
$omega  = &nfix(2, &grepVal($RES, "'LONG'", 4));
```

```
$K1     = &nfix(3, &grepVal($RES, "'! K1'", 3));
$K2     = &nfix(3, &grepVal($RES, "'M2'", 5));
$M2M1   = &nfix(3, &grepVal($RES, "'M2'", 3));

$K1ini   = &grepVal($PAR, "'K1'", 4);
$M2M1ini = &nfix(3, &grepVal($PAR, "'rapport'", 4));

# Afficher les elements orbitaux
print "P     = $Period jours\n";
print "T     = $Epoch HJDr  \n";
print "e     = $Ecc         \n";
print "omega = $omega       \n";
print "K1    = $K1 km/s, initially $K1ini km/s \n";
print "K2    = $K2 km/s     \n";
print "M2/M1 = $M2M1, initially $M2M1ini \n\n";

# Calcul des residus
print "Calcul du residu\n";
$sig1 = 0.0; $sig2 = 0.0;
@data = `cat vitrad.data`;
foreach $lines (@data){
    chomp $lines;
    @line = split(' ',$lines);
    $sig1 += $line[2]**2;
    $sig2 += $line[4]**2;
}
$sig1 = &nfix(3,sqrt($sig1 / ($nSpectra - 1)));
$sig2 = &nfix(3,sqrt($sig2 / ($nSpectra - 1)));
$sig = &nfix(3,sqrt($sig1**2 + $sig2**2));
print "Sigma1 = $sig1 km/s\n";
print "Sigma2 = $sig2 km/s\n";

# Calcul de distance et parallaxe
print "\nDistance et parallaxe\n";
$pi = 3.14159;
# inclinaison en radians
$incl = &grepVal($ID, "'inclinaison:'", 1)*$pi/180.0;
# demi-grand axe en arcsec
$as   = &grepVal($ID, "'as:'", 1)*0.001;
# a sini en UA
$asini = ($K1 + $K2)*$Period*sqrt(1-$Ecc**2)/(2*$pi);
$asini *= (3600*24)/149597870;
# a geometrique en UA
$ageom = $asini/(sin($incl));
```

```
# distance en parsec
$distance = $ageom/$as;
# parallaxe en mas
$parallax = 1000.0/$distance;
# masse totale en masses solaires
$totalmass = (($ageom**3)*365**2)/($Period**2);
$deltadist = &nfix(3,$distance*$sig/($K1+$K2));
print "asini = ",&nfix(3,$asini)," AU\n";
print "masse totale M = ", &nfix(3,$totalmass)," solar masses\n";
print "distance d = ",&nfix(2,$distance)," +- $deltadist pc \n";
print "parallaxe = ",&nfix(4,$parallax)," mas\n\n";

# Ecrire les resultats du fit
$allfits = "allfits.data";
open $allfits, ">>$allfits";
select $allfits;
$date = `date '+%d/%m/%y,%H:%M:%S'`;
chomp $date;
$iter = &grepVal($PAR, "'K1'", 1);
print "$date $raies $nSpectra $K1ini $M2M1ini ";
print "$iter $K1 $M2M1 ", &nfix(3,$parallax)," ";
print &nfix(3,$distance)," ", &nfix(3,$totalmass);
print " $sig1 $sig2 $deltadist\n";
close $allfits; select STDOUT;

# Creer script gnuplot
$gplf = "vitrad.gpl";
print "Writing gnuplot script $gplf\n";
`rm $gplf`;
open $gplf, ">>vitrad.gpl";
select $gplf;
print "reset\nK1=$K1\nK2=-$K2\necc=$Ecc\n";
print "P=$Period\nT=$Epoch\nomega=$omega/180.0*pi\n";
print "gamma=0\nres1=$sig1\nres2=$sig2\n\n";
print "set title '", &grepVal($ID, "'starname:'", 1), "' 0, -3\n";
close $gplf; select STDOUT;
`cat $gplf.tail >> $gplf`;

unless ($noplot) {
    print "Plotting radial velocities\n";
    system "$gnuplot $gplf &";
    print "Plotting mass-distance graph\n";
    system "$gnuplot distmass.gpl &";
}
```

```
&writeOrbit($sig1, $sig2);
&plotDisentangledSpectra($raies, $noplot+$nodsplot);

# Menage
print "Cleaning temporary files\n";
if (-e "phg.out") {rename "phg.out", "phg.ps";};
`rm $orbitf`;
print "Done.\n\n";
#system "ls -F";
exit;

sub runKorel {
# lancer korel
    print "Running Korel ...\n";
    if ($_[0]) {
    system "./korel";
    }
    else {
    $korellogf = "korel.log";
    print "Korel output redirected to $korellogf\n";
    open $korellogf, ">$korellogf";
    printf $korellogf `./korel`;
    system "head -2 $korellogf";
    }
}

sub writeOrbit {
# Creer fichier pour orbit
    print "Writing orbit data file\n";
    @data = `cat vitrad.data`;
    $orbitf = "orbit.out";
    if (-e $orbitf) {`rm $orbitf`};
    open $orbitf, ">>$orbitf";
    select $orbitf;
    foreach $lines (@data){
    chomp $lines;
    @line = split(' ',$lines);
    print "VA(ELO)\t$line[0]\t$line[1]\t$_[0]\n";
    print "VB(ELO)\t$line[0]\t$line[3]\t$_[1]\n";
    }
    close $orbitf; select STDOUT;
    system "cat orbit.head $orbitf > atlas.orbit.dat";
}
```

```
sub plotDisentangledSpectra {
    @raies = split(',',$_[0]); $i = 2;
    print "Writing disentangled spectra scripts\n";
    $raiesID = "raies.id";
    @ranges = `cat $raiesID`;
    $plotcmd  = "reset\nset xlabel 'Wavelength (A)'";
    $plotcmd .= "\nset ylabel 'flux'\n";
    $plotcmd .= "set key bottom left\n";
    $plotcmd .= "set data style lines\n";
    foreach $raie (@raies) {
        # Trouver le domaine
        foreach $range (@ranges) {
        chomp $range;
        @rangeVal = split(' ',$range);
        if ($rangeVal[0] eq $raie) {
        $rangeMin = $rangeVal[1];
        $rangeMax = $rangeVal[2];
        }
    }
        # ecrire les spectres
    @spectra = `cat korel.res`;
    $fileout = "disent.spectra.$raie.data";
    open $fileout, ">$fileout"; select $fileout;
    foreach $lines (@spectra) {
        chomp $lines;
        @line = split(' ',$lines);
        if ($line[0] > $rangeMin){
        if ($line[0] < $rangeMax){
            print $lines,"\n";
        }
        }
    }
    print "\n";
        # ecrire le script gnuplot
    close $fileout; select STDOUT; $i++;
    $plotcmd .= "set title 'Raie $raie' 0, -3\n";
    $plotcmd .= "set terminal x11 $i\n";
    $plotcmd .= "plot [$rangeMin:$rangeMax] '$fileout'";
    $plotcmd .= " using 1:2 title 'primaire', ";
    $plotcmd .= "'' using 1:3 title 'secondaire'\n";
    $plotcmd .= "set term postscript eps color\n";
    $plotcmd .= "set output '$fileout.eps'\nreplot\n\n";
    }
```

```
    $plotf = "disent.spectra.gpl"; open $plotf, ">$plotf";
    printf $plotf $plotcmd; close $plotf;
    unless ($_[1]) {
    print "Plotting $plotf\n";
    system "$gnuplot $plotf &";
    }
}

sub nfix {
# args : number of decimals, value to fix
    return (int($_[1]*10**$_[0]))/10**$_[0];
}

sub grepVal {
# args : filename, grep key, split index
    $line = `grep $_[1] $_[0]`;
    @lineVal = split(' ',$line);
    return $lineVal[$_[2]];
}
```

Ce script en `perl` est une version améliorée du shellscript `korel.sh` qui se trouve dans [14].

B Graphes des spectres

Les figures **??** et **??** des pages suivantes donnent une vue d'ensemble d'un choix de spectres. On y reconnaît les raies de Balmer, les raies utilisées pour la déconvolution, ainsi que quelques défauts et rayon cosmiques et, dans le rouge, des forêts de raies telluriques. Les différences de signal sur bruit sont également bien visibles.

(NB : dans cette version online ces graphes ont été retirés pour des raisons de taille de fichier.)

C La binaire HD 107700

La binaire HD 107700 s'appelle aussi 12 Com ou HR 4707. Sa magnitude V est de 4.83 et son type spectral est F8p.

C.1 Orbite

Les paramètres orbitaux indiqués dans le tableau 12 proviennent de [20].

Période	$P = 396.567 \pm 0.047$ jours
Époque du périastre	$T_o = 2448472.4 \pm 2.8$ JD
Excentricité	$e = 0.61 \pm 0.01$
Longitude du périastre	$\omega = 101.3 \pm 1.7\,°$
Vitesse	$K_1 = 25.1 \pm 0.2$ km/s
Rapport de masse	$q \geq 0.89$

Tab. 12 – Paramètres orbitaux de HD107700

C.2 Spectres

Pour cette étoile, 7 spectres Élodie ont été téléchargés depuis l'archive. Ils sont échantillonnés par pas de 0.05 Å.

N°	Nom	Date HJD -2400000	BERV (km/s)	S/N	ϕ
1	n20001114	51863.7044	23.630	125	0.552
2	n20001209	51888.6943	27.243	261	0.615
3	n20010117	51927.6757	22.651	210	0.713
4	n20010202	51943.6995	17.408	240	0.753
5	n20010318	51987.5492	-1.694	279	0.864
6	n20010415	52015.5029	-13.897	188	0.934
7	n20010510	52040.4393	-21.998	188	0.997

Tab. 13 – Spectres de HD107700. Le nom indique la date d'observation, S/N est le rapport signal sur bruit et ϕ la phase.

Références

[1] X. Pan, M. Shao, S. Kulkarni : A distance of 133–137 parsecs to the Pleiades star cluster, Nature **427**, 326 (2004)

[2] B. Paczynski : A problem of distance, Nature **427**, 299 (2004)

[3] B. Paczynski : The Distance to Pleiades, Acta Astronomica **53**, 209 (astro-ph0306475) (2003)

[4] N. Robichon *et al* : Open Clusters with Hipparcos, A&A **345**, 471 (1999)

[5] M. Pinsonneault *et al* : The problem of Hipparcos distances to open clusters, ApJ **504**, 170 (1998)

[6] V. Makarov : Computing the parallax of the Pleiades from the Hipparcos intermediate astrometry data : an alternative approach, AJ **124**, 3299 (2002)

[7] F. van Leeuwen, C. Hansen Ruiz : The parallax of the Pleiades cluster, in Hipparcos Venice '97 (ESA SP-402), 689 (1997)

[8] G. Gatewood *et al* : The Pleiades, MAP-based trigonometric parallaxes of open clusters, ApJ **533**, 938 (2000)

[9] P. North, Y. Debernardi, A. Chelli : La distance des Pléiades par Atlas : le dernier mot ?, demande de temps de téléscope à l'OHP (2003)

[10] P. Henajeros : Tempête autour des Pléiades, Ciel et Espace **403**, 28 (2003)

[11] S. Ilijić : Spectral disentangling of close binary stars, thèse, University of Zagreb (2003)

[12] P. Hadrava : Orbital elements of multiple spectroscopic stars, A&AS **114**, 393 (1995)

[13] P. Hadrava : Korel user guide (2001)

[14] N. Zwahlen : Séparation spectrale des composantes de la binaire HD861, TP4 UNIL (2003)

[15] K. Torres *et al* : Study of the spectral disentangling code Korel in eclipsing triple systems. Application to RV Crt, University of Zagreb Workshop poster (2003).

[16] M. Kuenzli, P. North, R.L Kurucz, B. Nicolet, A&AS **122**, 51 (1997)

[17] D. Queloz : Recherches liées à la spectroscopie par corrélation croisée numérique, thèse UNIGE (1995)

[18] J. Beckers *et al* : High Resolution Spectral Atlas of Solar Irradiance, Vol. 2, AFGL (1976)

[19] W. Heintz : Double Stars, D. Reidel Publishing Company (1978)

[20] H. Abt, D. Willmarth, ApJ **521**, 682 (1999)

[21] `http://atlas.obs-hp.fr/elodie/index.html`

[22] `http://www.lsw.uni-heidelberg.de/cgi-bin/websynspec.cgi`

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux