Acquisition de la vitesse radiale avec GAIA

David Katz[1], Ana E. Gómez[2], Carme Jordi[3], Roger Cayrel [1], Virginie Sabas[2]

1. Observatoire de Paris-Meudon

D.A.S.G.A.L., 61, avenue de l'Observatoire, F75014, France

2. Observatoire de Paris-Meudon

D.A.S.G.A.L., F92195 Meudon CEDEX, France

3. Departament d'Astronomia i Meteorologia

Universitat de Barcelona, Avda. Diagonal 647, E08028, Barcelona, Spain

Abstract

La précision attendue sur les mesures de la vitesse radiale avec GAIA (à une époque donnée et sur toute la mission) est estimée à l'aide de simulations de Monte Carlo en prenant en compte plusieurs sources de bruit. Les étoiles simulées couvrent différentes valeurs de température effective, gravité, métallicité et $vsini$.

1 Introduction

L'acquisition de la vitesse radiale parallèlement aux données astrométriques de la mission GAIA s'avère nécessaire pour trois raisons principales: (1) la vitesse radiale fournit la troisième composante de la vitesse spatiale, donnée indispensable dans les études de cinématique et dynamique galactiques; (2) la mesure de la vitesse radiale à des époques différentes (environ 150 fois) permet de détecter et de caractériser les systèmes binaires et de contribuer à la détection des planètes extrasolaires; (3) à la précision astrométrique attendue avec GAIA, la vitesse radiale est nécessaire pour prendre en compte l'effet de l'accélération perspective (l'effet sur la position est supérieure à $0.1\,\mu$as pour les 65 % d'étoiles à moins de 50 pc du soleil, Arenou et Haywood 1998). Pour des objets brillants ($V \leq 15$) la précision requise dans les mesures individuelles de vitesses radiale est $\leq 1\,\mathrm{kms}^{-1}$, tandis que pour des objets plus faibles ($15 < V \leq 17$) une précision sur la vitesse radiale systémique (vitesse obtenue sur toute la mission) de $5\,\mathrm{kms}^{-1}$ est suffisante pour aborder les différentes études en cinématique et dynamique galactiques. À une magnitude apparente donnée, la précision sur la vitesse radiale dépend du type d'étoile (T_{eff}, log$g$, composition chimique, $vsini$, etc.).
Les caractéristiques du spectromètre à haute résolution sont données dans la Table 1. Le spectrographe n'a pas de fente et les spectres sont perpendiculaires à la direction de déplacement

de l'étoile dans le champ de vue. La résolution est d'environ 30000, ce qui correspond à une largeur à mi-hauteur (FWHM) de 0.29 Å. Le domaine spectral choisi est dans l'infrarouge, ce choix prend en compte le fait que la plus grande partie des étoiles à observer avec GAIA seront des étoiles rouges. La région est centrée sur le triplet du Ca II et contient aussi des raies de H I de la série de Paschen permettant ainsi de mesurer la vitesse radiale des étoiles chaudes.

Table 1: Spectromètre pour la mesure des vitesses radiales

	SPÉCIFICATION
Ouverture du télescope	750 x 700 mm^2
Champ de vue	1 deg x 1 deg
Domaine spectral	850 - 870 nm
Échantillonnage	1 pixel = 0.75 Å
Résolution spatiale	1 pixel = 1 sec d'arc
Magnitude apparente limite	~ 17
Taille du pixel	20 x 20 μm
Mode d'intégration	TDI
Temps d'intégration	30.4s (3650 pixels)

La vitesse radiale sera obtenue par la méthode de corrélation croisée, soit à l'aide d'un spectre du même type que celui de l'étoile en question, soit à l'aide d'un spectre synthétique.
Dans le présent travail, la précision sur la vitesse radiale pour différents types d'étoiles a été estimée à l'aide de simulations, aussi bien pour une observation individuelle (à une époque donnée) que pour l'ensemble des spectres de la mission (ici 100 spectres ont été considérés). Les spectres ont été calculés à partir des spectres synthétiques de Kurucz sans overshooting (Kurucz 1994, Van't Veer-Menneret et Mégessier 1996) à la résolution de 30000. Le domaine spectral est de 250 Å, entre 8490 et 8740 Å. Les spectres observés ont été simulés en dégradant les spectres calculés par différentes sources de bruit détaillées dans la section 2. Finalement, les spectres de comparaison utilisés pour mesurer la vitesse radiale par corrélation croisée ont été aussi calculés à partir des spectres synthétiques en adoptant un rapport S/B $= \infty$.
Deux types d'étoiles ont été simulés: une étoile chaude ($T_{eff} = 12500$ K; log$g = 4.0$, étoile naine et 2.5, étoile supergéante; $[Fe/H]$ solaire; $vsini = 5$, 100 et 200 kms^{-1}) et une étoile froide ($T_{eff} = 5500$ K; log$g = 4.5$, étoile naine et 2.5, étoile géante; $[Fe/H] = 0$, -1 and -2; $vsini = 5$ kms^{-1}). Une étoile naine de type F0 ($T_{eff} = 7500$ K; log$g = 4.5$, $[Fe/H]$ solaire, $vsini = 5$ kms^{-1}) a été aussi simulée.

2 Sources d'erreur

2.1 Échantillonnage des spectres

Afin de conserver toute l'information spectrale obtenue à la résolution de 30000, une taille de pixel de 0.15 Å (correspondant à 2 pixels par élément spectral) s'avère nécessaire. Cependant avec cet échantillonnage un spectre couvre 1700 pixels (ou 28.5 min d'arc) et la superposition des spectres devient trop importante. L'augmentation de la taille du pixel dégrade l'information spectrale mais permet de diminuer ces superpositions et en plus de réduire le bruit de lecture et la contribution du fond du ciel intégré sur tout le spectre. Un bon compromis semble être de choisir un pixel d'une taille comprise entre 0.75 et 1.5 Å. La Figure 1 montre le même spectre avec un échantillonnage inférieur à 0.15 Å par pixel et à 0.75 Å par pixel (valeur nominale, voir Table 1).

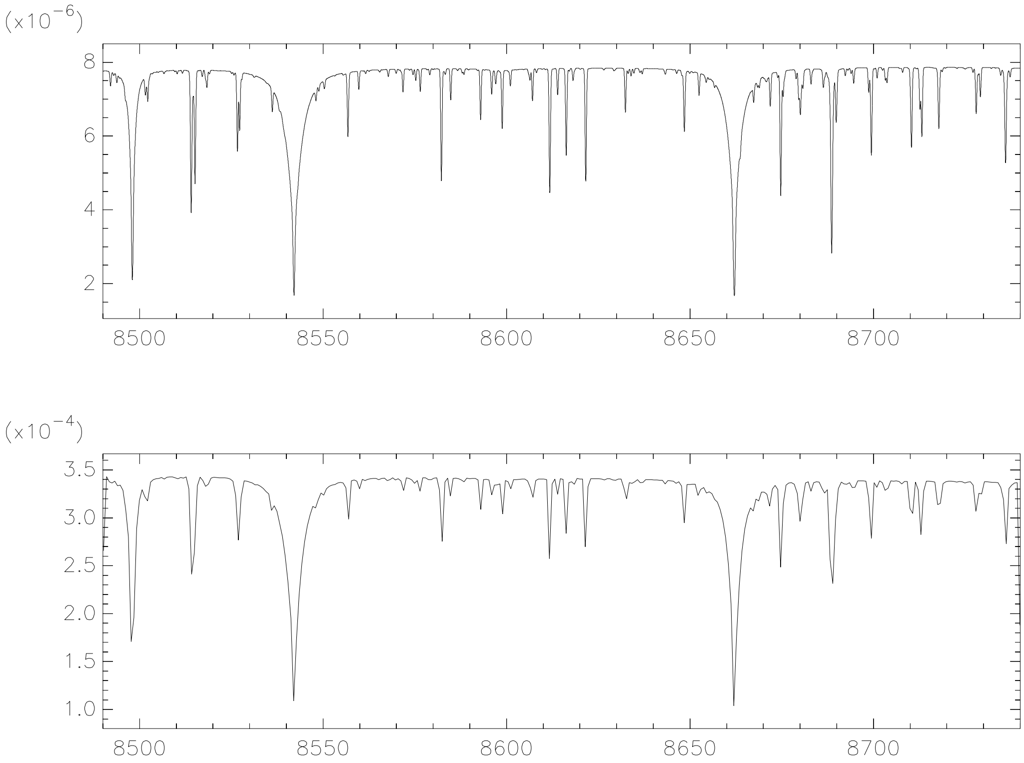

Figure 1: Spectres synthétiques: $T_{\rm eff} = 5500$ K, $\log g = 4.5$, échantillonnage < 0.15 Å par pixel (en haut) et échantillonnage $= 0.75$ Å par pixel (en bas)

Pour une même étoile, la position dans le champ de vue change d'un passage à un autre. En conséquene, chaque spectre individuel tombe de façon aléatoire sur les pixels du détecteur CCD et un même élément spectral peut être décalé de $\pm$ la moitié du pas d'échantillonnage. Ce décalage de la position de raies sur les pixels du CCD change la forme des raies: non seulement la précision de la vitesse radiale mesurée est dégradée, mais aussi un effet systématique peut apparaître. Afin de simuler cette source d'erreur, la longueur d'onde centrale du premier pixel (λ_0) a été choisie de la manière suivante: $\lambda_0 = \lambda_{min} + (\chi - \frac{1}{2}) * s$, $\lambda_{min} = 8490$ Å étant la longueur d'onde du début du spectre, χ un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 et s le pas d'échantillonnage adopté. La Figure 2 montre la variation du spectre d'une même étoile chaude ($T_{\rm eff} = 12500$ K, métallicité solaire, échantillonnage 0.15 Å par pixel). L'effet systématique sur la vitesse radiale est de 5 kms^{-1} environ pour une observation individuelle et disparaît quand l'on combine une centaine de spectres, tous décalés de façon aléatoire.

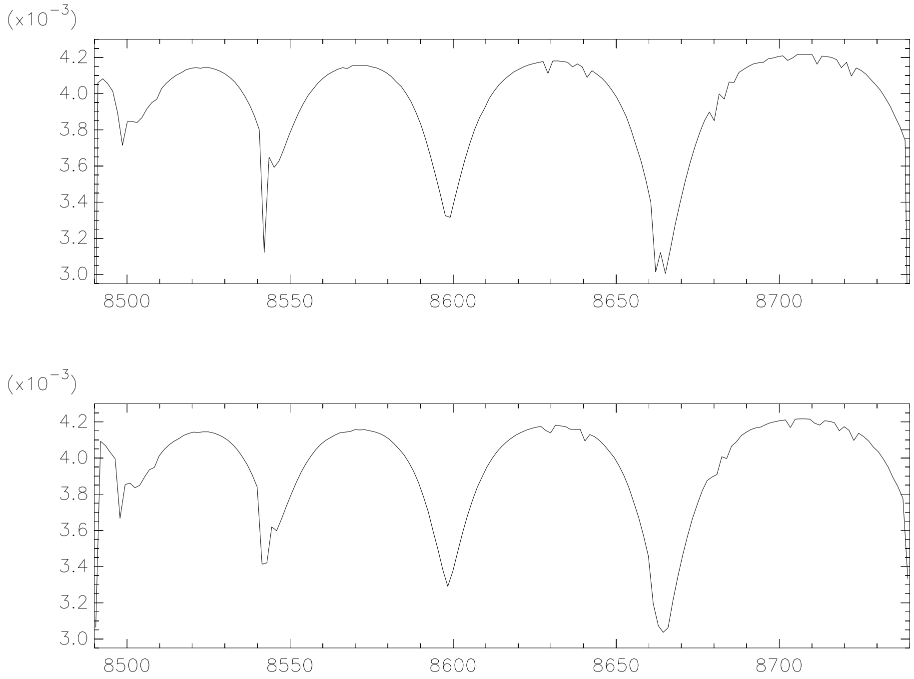

Figure 2: Spectres synthétiques: $T_{\mathrm{eff}} = 12500$ K, $\log g = 4$, échantillonnage = 0.15 Å par pixel, décalés par -0.4 Å (en haut) et par +0.4 Å (en bas)

2.2 Bruit de photons, bruit de lecture et contribution du fond du ciel

Les spectres synthétiques ont été d'abord normalisés à une magnitude apparente donnée. Ensuite le flux observé sur chaque pixel a été estimé à partir d'une distribution de Poisson ayant comme valeur moyenne celle correspondant au flux normalisé.
Le bruit de lecture a été simulé selon une distribution Gaussienne de valeur moyenne nulle et dispersion 3 e^- par pixel.
Dans un spectrographe à fente, la contribution du fond du ciel est due seulement à la partie du champ de vue où l'étoile est placée. Mais, dans le cas présent d'un spectrographe sans fente, la contribution provient de tout le champ de vue. Ainsi, chaque élément spectral reçoit autant de contribution du fond de ciel qu'il y a de pixels dans le spectre. Cet effet est le même pour tous les pixels et il n'y a pas de signature spectrale. En adoptant pour le fond du ciel une magnitude V = 22.5 mag.arcsec^{-2} et un échantillonnage de 0.75 Å par pixel (un spectre occupe 333 pixels), la contribution du fond de ciel est équivalente à celle d'une étoile de magnitude V = 16.2 mag. Dans les simulations, le fond du ciel a été estimé en utilisant une distribution de Poisson de moyenne 10.2 e^- par pixel correpondant à V = 22.5mag.arcsec^{-2}, un temps de pose de 30.4 s et des pixels de 1 arcsec^2. La contribution du fond du ciel constitue le facteur le plus limitant dans la précision de la vitesse radiale.

2.3 Adéquation entre spectre observé et spectre de comparaison

Dans la méthode par corrélation croisée, la non adéquation entre le spectre observé et celui de comparaison peut dégrader la précision de la vitesse radiale mesurée. La Figure 3 montre l'effet pour une étoile de 7500 K pour différentes magnitudes apparentes. L'effet est négligeable (voir section 4), mais pour des étoiles plus chaudes des simulations sont nécessaires.

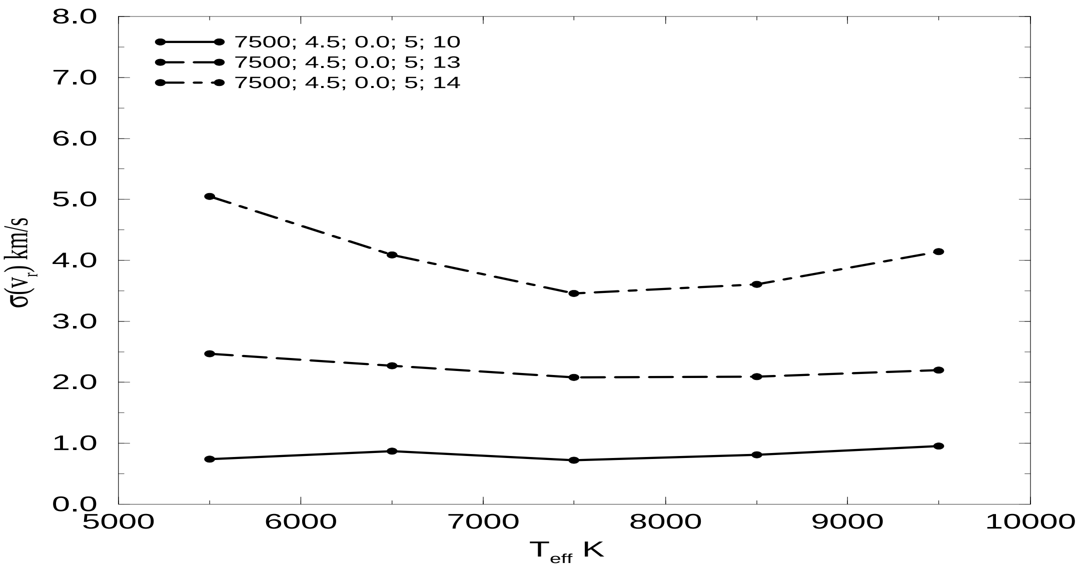

Figure 3: *Erreur quadratique moyenne sur la vitesse radiale en fonction de la* T_{eff} *du spectre de comparaison pour trois magnitudes apparentes V: 10 (trait plein), 13 (tirets longs) et 14 (tirets longs et courts). Objet: (7500, 4.5, 0, 5). Spectre de comparaison: (5500, 4.5, 0, 5); (6500, 4.5, 0, 5); (7500, 4.5, 0, 5); (8500, 4.5, 0, 5); (9500, 4.5, 0, 5). Entre paranthèses, par ordre:* T_{eff}, *logg*, $[Fe/H]$, *vsini. Dispersion: 0.75 Å par pixel*

Deux autres sources de bruit restent à prendre en compte. La première se produit quand le spectre tombe entre deux colonnes de pixels et non sur une seule. Dans le pire des cas la contribution du fond du ciel peut augmenter d'un **facteur 2 !** La deuxième source d'erreur est due aux distorsions du spectrographe.

3 Sommation des spectres

À la fin de la mission, chaque étoile aura été observée entre 100 et 150 fois. La sommation de tous les spectres va permettre d'obtenir des vitesses radiales systémiques précises. La façon de sommer les spectres peut jouer un rôle important dans la précision finale. Dans la section 4, la précision attendue pour une mesure individuelle est donnée en fonction de la magnitude apparente V. Les résultats montrent que tant que le signal domine les sources de bruit, la précision sur une mesure diminue lentement en fonction de la magnitude V. Par contre, dès que le bruit devient prépondérant par rapport au signal, la précision se dégrade très rapidement. L'estimation de la vitesse systémique comme la valeur moyenne des vitesses radiales individuelles est utilisable seulement dans le cas où le signal domine (l'amélioration de la précision est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'observations). Dans le cas où le bruit domine le signal, une méthode plus convenable consiste à interpoler à la même longueur d'onde les spectres individuels avant de les additionner. Cette méthode permet d'augmenter le rapport S/B et d'améliorer la précision de la vitesse radiale pour une magnitude donnée. Elle a été utilisée dans les simulations effectuées. La Figure 4 montre le spectre d'une étoile de magnitude 14 de type solaire après un passage et

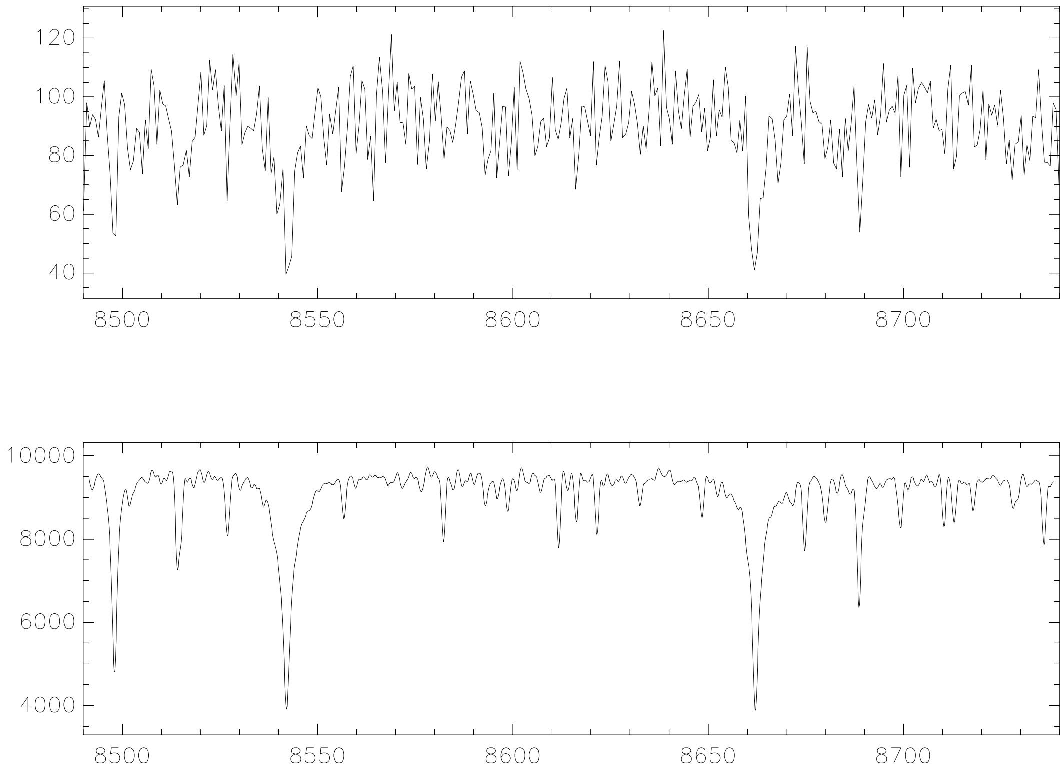

Figure 4: Spectres synthétiques: $T_{\rm eff} = 5500$ K, $\log g = 4.5$, dispersion = 0.75 Å , V = 14, 1 seul passage (en haut) et l'addition de 100 passages (en bas)

à la suite de l'addition de 100 spectres.
Finalement, étant donné que les spectres individuels sont décalés aléatoirement les uns par rapport aux autres, la sommation des spectres individuels peut permettre de récupérer en partie l'information spectrale perdue lors de l'échantillonnage. En utilisant dans l'interpolation un pas d'échantillonnage environ 6 fois plus petit, les premiers tests montrent que l'on peut attendre une amélioration de 20 % dans la précision de la vitesse radiale systémique.

4 Résultats

La stabilité de la méthode de Monte Carlo utilisée a été testée. Pour les magnitudes V plus brillantes que 14, 1000 itérations se sont avérées suffisantes tandis que pour les magnitudes plus faibles 2000 ont été nécessaires. L'influence sur la précision de la vitesse radiale est inférieure à 5 % pour des précisions $\leq 10\,{\rm km.s^{-1}}$ et peut attendre 15 à 20 % dans les autres cas. En raison du temps de calcul, dans les simulations pour additionner 100 spectres, seulement 250 itérations ont été réalisées.
Les principaux résultats sont présentés dans la Figure 5.
La partie a) montre la précision de la vitesse radiale individuelle en fonction de la magnitude apparente V en utilisant deux échantillonnages différents: le nominal (0.75 Å par pixel) et 1.5 Å par pixel. Pour l'étoile froide ($T_{eff} = 5500$ K; log$g = 4.5$; $[Fe/H]$ =0.0; $vsini = 5\,{\rm kms^{-1}}$), les résultats sont donnés en tirets longs et courts (cas nominal) et en traits pointillés (l'autre cas). Pour l'étoile chaude ($T_{eff} = 12500$ K; log$g = 4.0$; $[Fe/H]$ =0.0; $vsini = 5\,{\rm kms^{-1}}$), le trait plein correspond au cas nominal et les tirets longs à la dispersion de 1.5 Å par pixel. Dans le cas nominal,

pour l'étoile de type solaire la précision attendue est $< 1\,\mathrm{kms}^{-1}$ jusqu'à $V = 12$ et $< 4.5\,\mathrm{kms}^{-1}$ jusqu'à la magnitude 15. Dans l'autre cas (dispersion de 1.5 Å par pixel), la précision de la vitesse radiale diminue lentement jusqu'à $V = 13$, et atteint $7.5\,\mathrm{kms}^{-1}$ à la magnitude 15. Pour les magnitudes plus faibles que 15, la précision se dégrade rapidement car les sources de bruit, en particulier la contribution du fond du ciel, deviennent prédominantes par rapport au signal. Pour l'étoile chaude, dans le cas nominal, les précisions sont $2\,\mathrm{kms}^{-1}$ et $6\,\mathrm{kms}^{-1}$ aux magnitudes 10 et 12, respectivement. Les valeurs correspondant à la dispersion de 1.5 Å par pixel sont 5 et $11\,\mathrm{kms}^{-1}$.

Dans toutes les autres parties de la Figure 5, seule la dispersion nominale a été considérée. La partie b) donne la précision de la vitesse radiale individuelle en fonction de la magnitude V pour différentes gravités. Pour l'étoile froide ($T_{eff} = 5500\,\mathrm{K}$; $[Fe/H]$=0.0; $vsini = 5\,\mathrm{kms}^{-1}$) une naine ($\log g = 4.5$, tirets longs et courts) et une géante ($\log g = 2.5$, traits pointillés) ont été simulées. Dans le cas de l'étoile chaude ($T_{eff} = 12500\,\mathrm{K}$; $[Fe/H]$=0.0; $vsini = 5\,\mathrm{kms}^{-1}$), les résultats pour la naine ($\log g = 4.0$) et la supergéante ($\log g = 2.5$) sont représentés en trait plein et tirets longs, respectivement. Pour l'étoile de type solaire, la précision ne varie pas avec la gravité jusqu'à la magnitude 15, contrairement au cas de l'étoile chaude. La partie c) donne la même information que b), mais pour une étoile de type B ($T_{eff} = 20000$ K). Une précision d'environ 9 - $10\,\mathrm{kms}^{-1}$ est obtenue pour la supergéante ($\log g = 3.0$) à $V = 12$, tandis que pour la naine ($\log g = 4.5$) cette précision est attendue seulement à la magnitude 10.

Dans la partie d), les résultats montrent la variation de la précision de la vitesse radiale individuelle en fonction de la magnitude V pour différentes métallicités dans le cas de l'étoile naine froide ($T_{eff} = 5500\,\mathrm{K}$; $\log g = 4.5$). Trois valeurs de $[Fe/H]$ ont été considérées: 0.0 (trait plein), -1.0 (tirets longs) et -2.0 (traits pointillés). Jusqu'à la magnitude 14, la précision est $< 5\,\mathrm{kms}^{-1}$ dans les trois cas. À la magnitude 15, elle est d'environ $7\,\mathrm{kms}^{-1}$ pour $[Fe/H]$ = -1.0.

La partie e) présente la précision de la vitesse radiale individuelle en fonction du $vsini$ pour l'étoile naine chaude ($T_{eff} = 12500\,\mathrm{K}$; $\log g = 4.0$; $[Fe/H]$=0.0). La précision se dégrade très rapidement (cas $vsini = 100\,\mathrm{kms}^{-1}$ et $200\,\mathrm{kms}^{-1}$ représentés en tirets longs et traits pointillés, respectivement) par rapport à l'étoile à faible $vsini$ ($5\,\mathrm{kms}^{-1}$, trait plein).

Dans la partie f), les précisions, individuelle (1) et en additionnant 100 spectres (100), sont données pour les deux types d'étoiles considérés. Pour la naine froide ($T_{eff} = 5500\,\mathrm{K}$; $\log g = 4.5$; $[Fe/H]$=0.0; $vsini = 5\,\mathrm{kms}^{-1}$), les résultats pour une observation sont montrés en tirets longs et courts et pour les 100 observations en traits pointillés. Pour la naine chaude ($T_{eff} = 12500\,\mathrm{K}$; $\log g = 4.0$; $[Fe/H]$=0.0; $vsini = 5\,\mathrm{kms}^{-1}$), les mêmes résultats sont indiqués en trait continu et en tirets longs, respectivement. La précision sur la vitesse radiale systémique est de $\sim 6\mathrm{kms}^{-1}$ à $V = 18$ pour l'étoile de type solaire et de $4\,\mathrm{kms}^{-1}$ à la magnitude 15 pour l'étoile chaude.

References

[1] Arenou, F. et Haywood, M. (1998), Simulations of perspective acceleration for GAIA, SWG-OPM-001

[2] Kurucz, R.L. (1994), CD-ROM 13-14

[3] Van't Veer-Menneret, C. et Mégessier, C. (1996), Effective temperature of A and F stars from Balmer line profiles, and the infrared flux method, A&A, **309**, 879

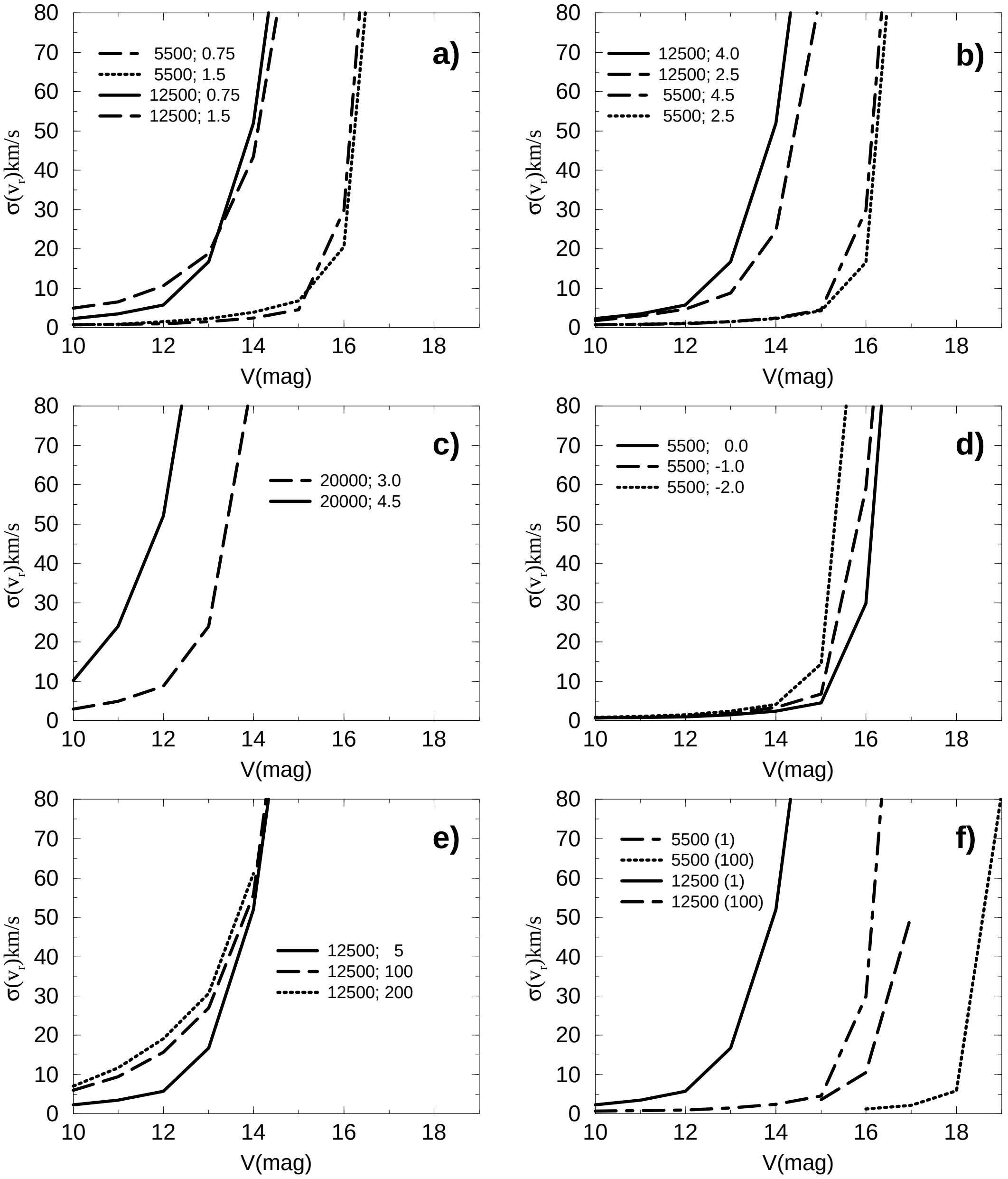

Figure 5: Erreur quadratique moyenne sur la vitesse radiale en fonction de la magnitude V. Pour les explications, voir le texte