

Recherche et étude de planètes autour des naines M

Xavier BONFILS

Direction : M. Mayor & C. Perrier

Co-direction : S. Udry & X. Delfosse

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

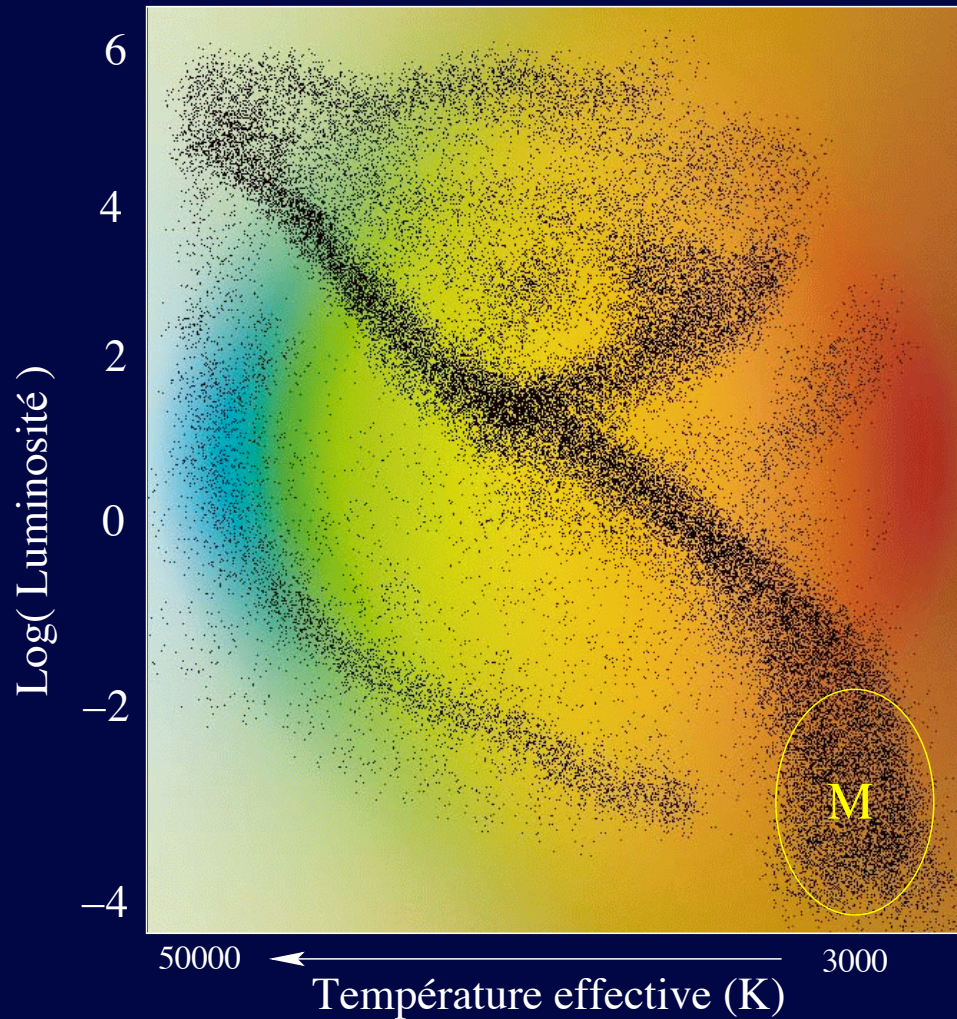
1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives



Population Stellaire :

- des étoiles de faible masse, mais les étoiles les plus nombreuses de la Galaxie

Caractéristiques Physiques

- $7.5 \leq M_V \leq 20$
- $2100K(M9) \leq T_{eff} \leq 3800K(M0)$
- $5.10^{-4}L_{\odot} \leq L_{\star} \leq 0.1L_{\odot}$
- $0.1R_{\odot} \leq R_{\star} \leq 0.5R_{\odot}$
- $0.07M_{\odot} \leq M_{\star} \leq 0.6M_{\odot}$

Signature Spectrale

- faible luminosité dans le visible
- flux max. dans le proche IR (1-2.5 μ m)
- bandes d'absorption moléculaires
- TiO,VO et métaux hybrides

Historique :

- 1992 : une planète autour d'un pulsar (Wolszczan & Frail)
- 1995 : première planète autour d'une étoile de type solaire (Mayor & Queloz)
- aujourd'hui : 170 planètes autour de 146 étoiles
- 4000-5000 étoiles observées

Espace des paramètres :

- $F(m_2 \sin i, m_1, a, e, [Fe/H])$

Multiples propriétés :

- fréquence d'étoiles à planètes (4-5% des étoiles ont une planète, 1% ont un jupiter chaud)
- distribution en masse, en période...
- diagramme masse-période, excentricité-période, ...
- corrélation planète-métallicité
- systèmes multiplanétaires
- etc...
- pas de propriété en fonction de m_1





Autour des naines M : ... il y a 6 mois

- 200-300 étoiles observées
- 2 planètes de la masse de Jupiter autour de Gl 876 (Delfosse et al. 1998; Marcy et al. 1998, 2001)
- 2 “Neptunes” autour de Gl 436, Gl 876 (Butler et al. 2004; Rivera et al. 2005)
- seulement 2 naines M avec planètes
- pas de Jupiter chauds

Intérêts :

- révéler des systèmes nouveaux et originaux
- sonder la formation planétaire en fonction de la masse de l'étoile
- détecter des planètes légères (les planètes telluriques dans la “zone habitable” des naines M sont détectables)



De nombreux processus physiques dépendent de m_1

- ◆ contraintes des modèles
- ◆ voire discrimination entre les scénarios de formation planétaire



Autour des naines M : ... il y a 6 mois

- 200-300 étoiles observées
- 2 planètes de la masse de Jupiter autour de Gl 876 (Delfosse et al. 1998; Marcy et al. 1998, 2001)
- 2 “Neptunes” autour de Gl 436, Gl 876 (Butler et al. 2004; Rivera et al. 2005)
- seulement 2 naines M avec planètes
- pas de Jupiter chauds

Théorie :

- “accrétion de coeur” prédit peu de planètes géantes
- et de nombreuses planètes de la masse de Neptune (Laughlin et al. 2004; Ida & Lin 2005)
- “instabilité gravitationnelle” prédit un taux de planètes géantes semblable pour les naines M et les étoiles FGK (si la masse des disques est identique) (Boss 2006)

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

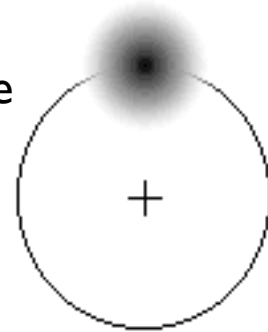
VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

obs.
→

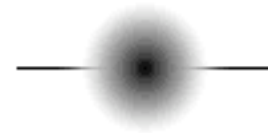


le mouvement de l'étoile
se fait autour du centre de
masse

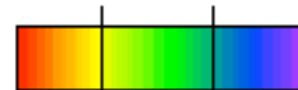


Terre
↓ ↓ ↓

correspond à un
changement de position
sur le ciel ...

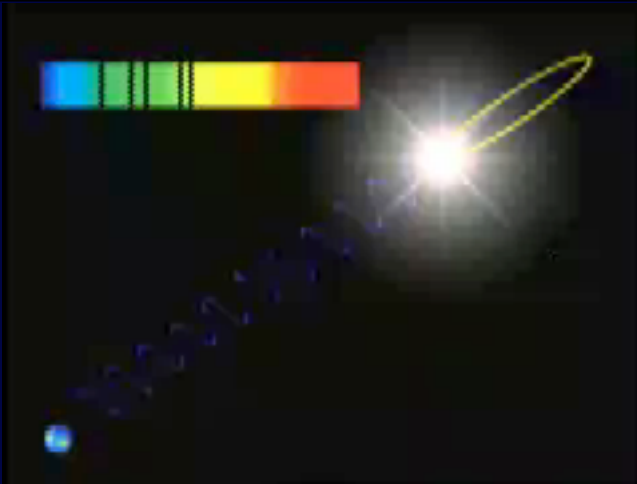


... et à un changement de
vitesse le long de la ligne
de visée



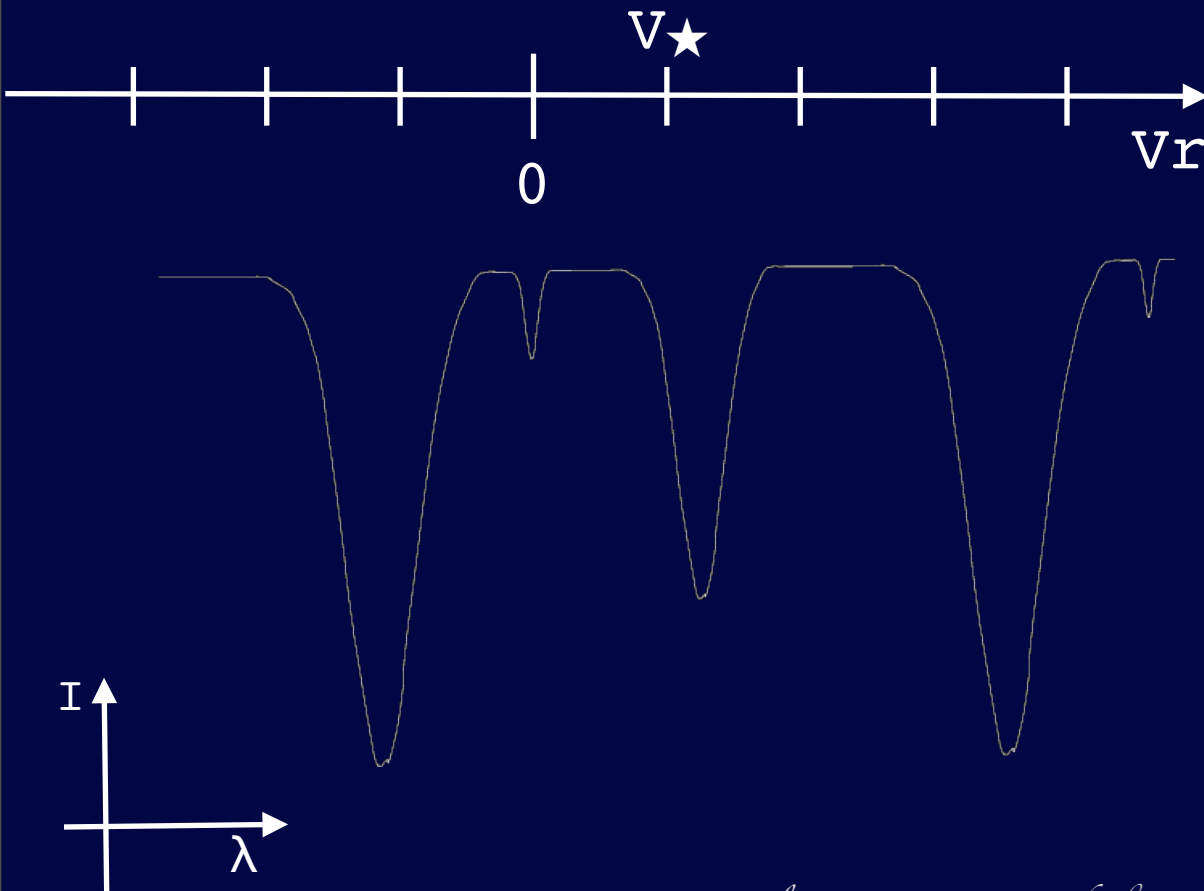
Pour mettre en évidence des planètes nous mesurons la vitesse radiale des étoiles

Méthode : II.1 La méthode

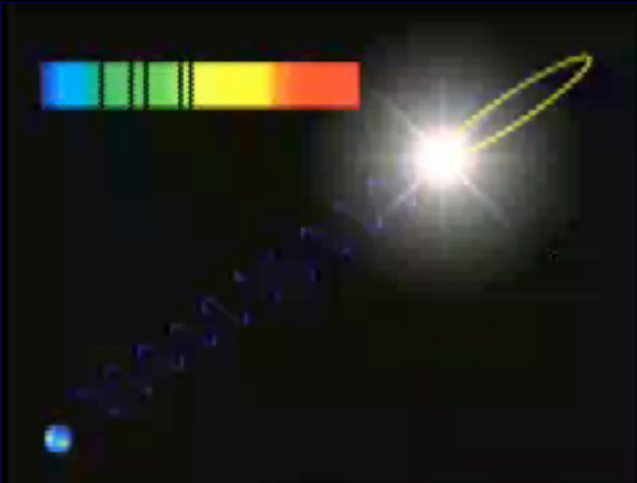


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

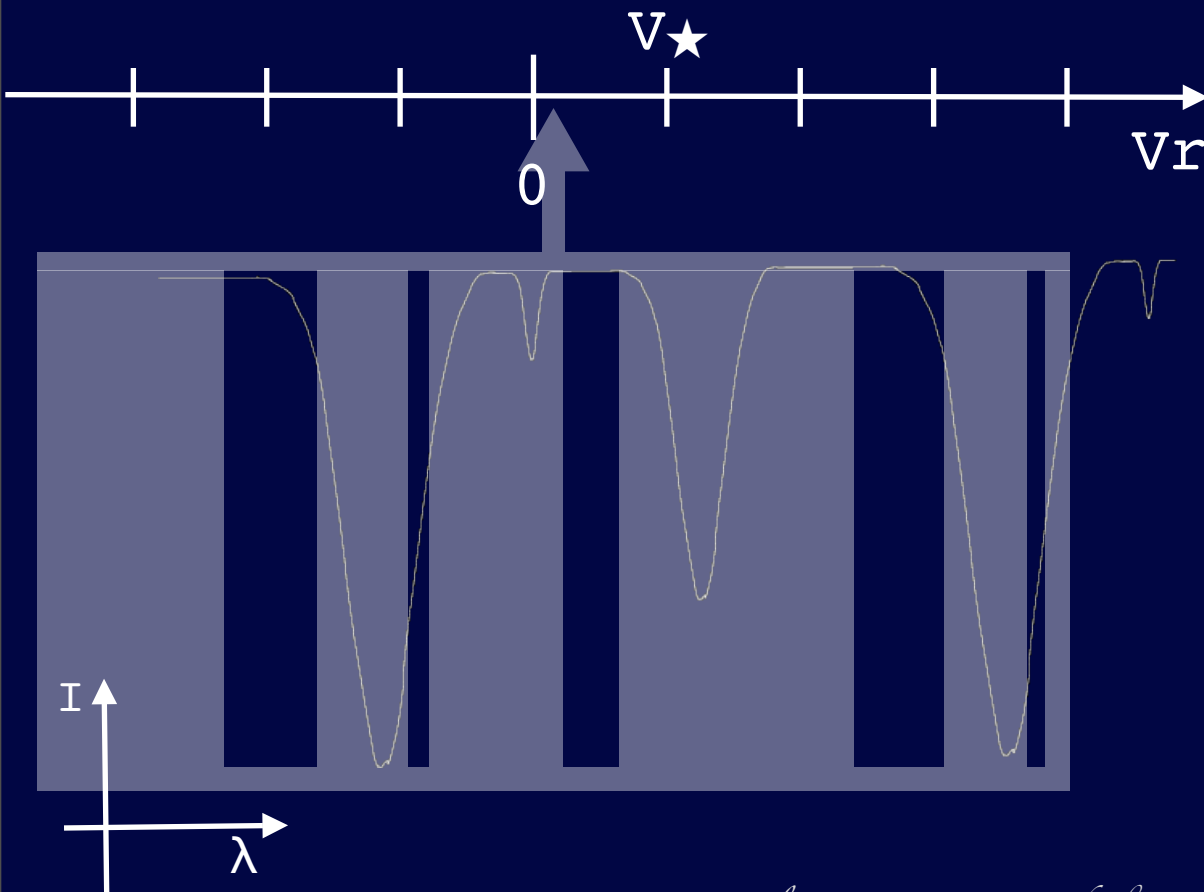


Méthode : II.1 La méthode

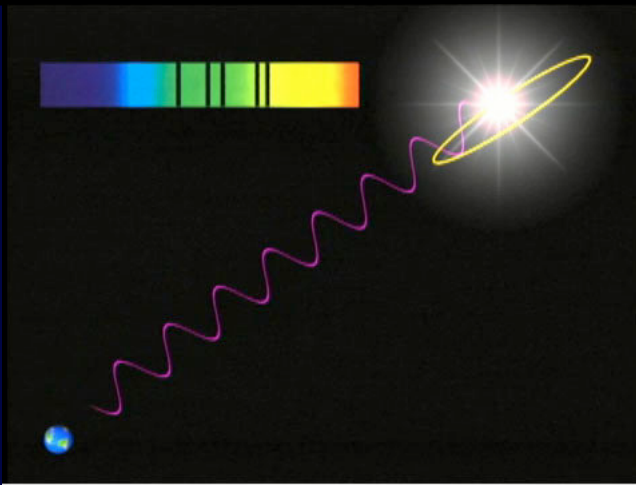


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

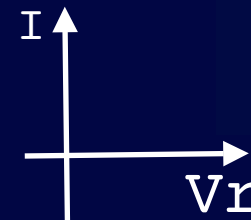
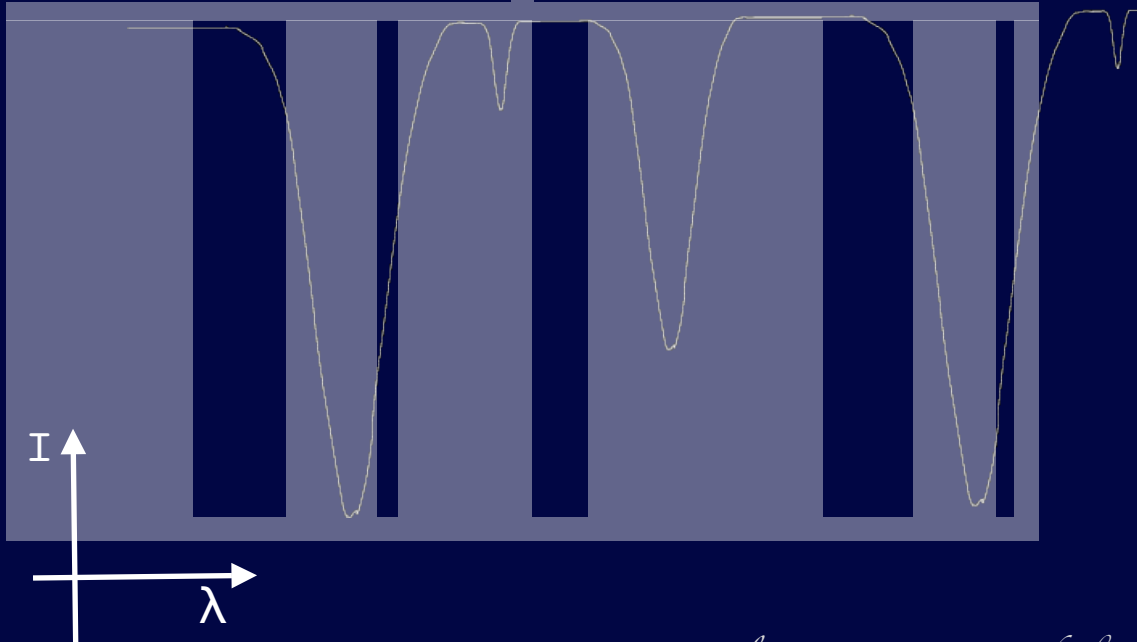
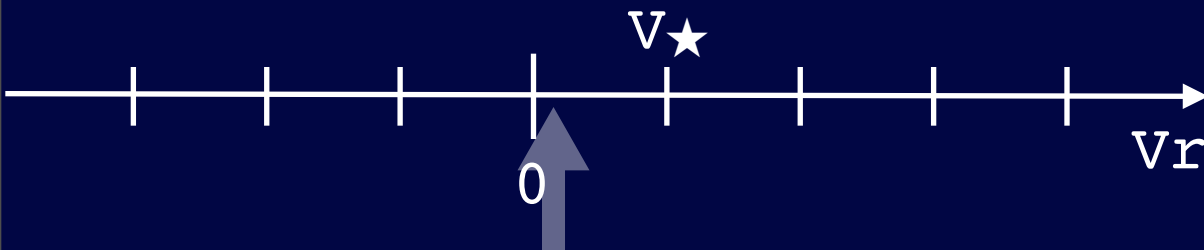


Méthode : II.1 La méthode

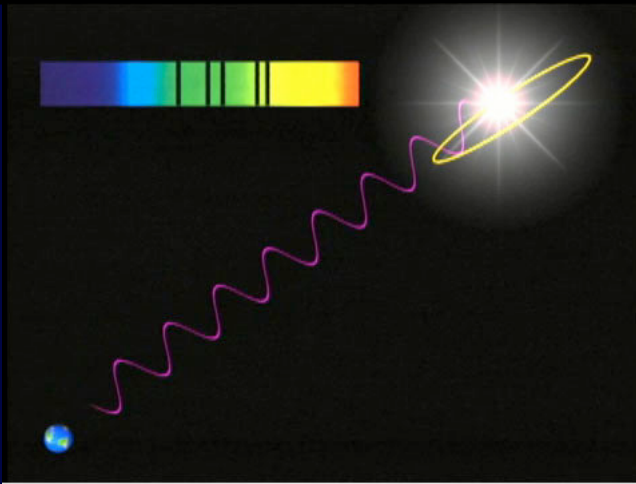


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

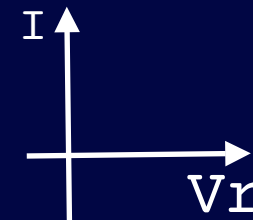
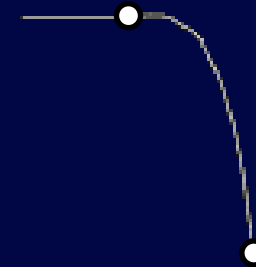
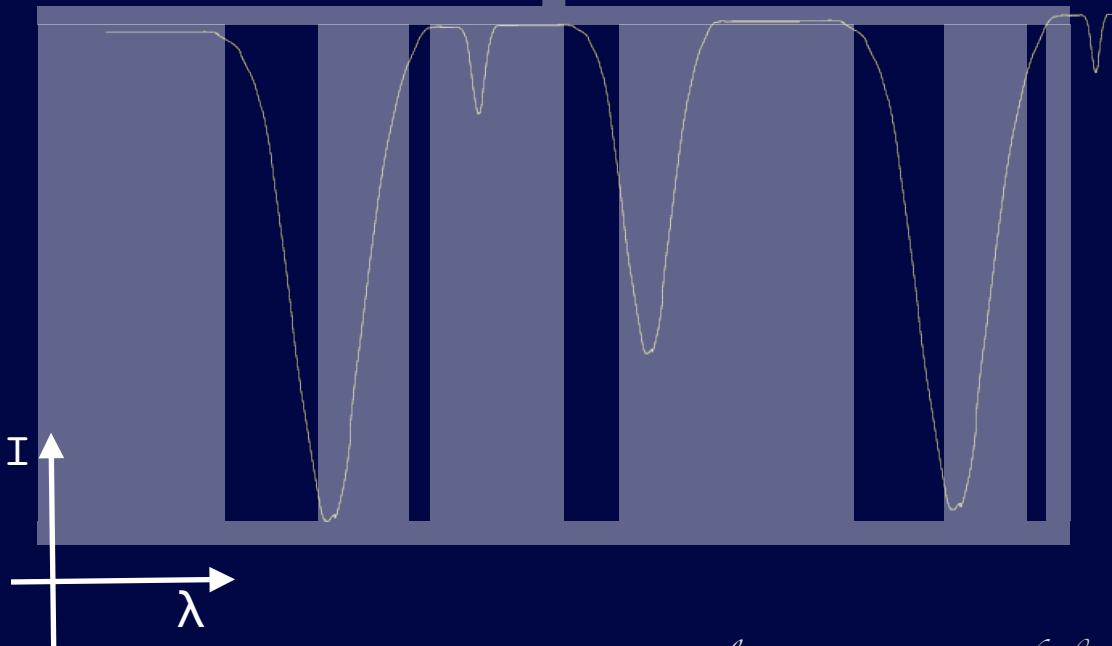
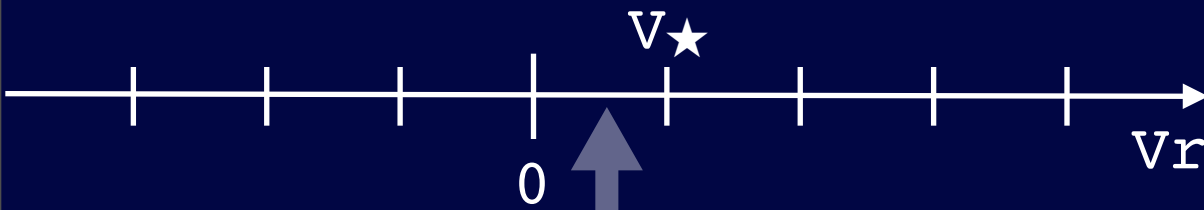


Méthode : II.1 La méthode

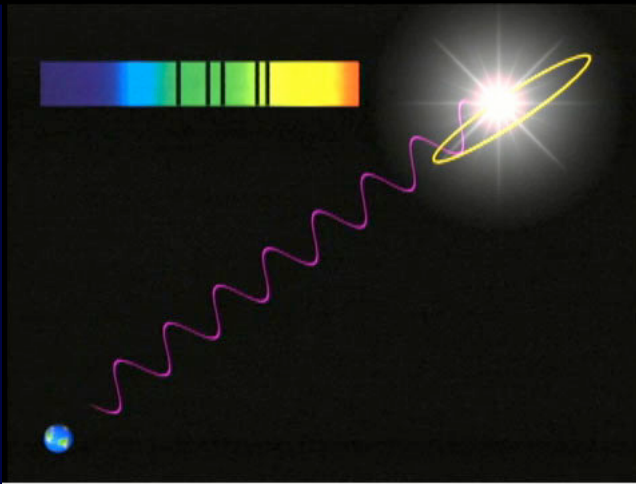


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

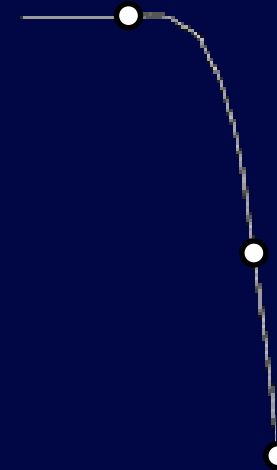
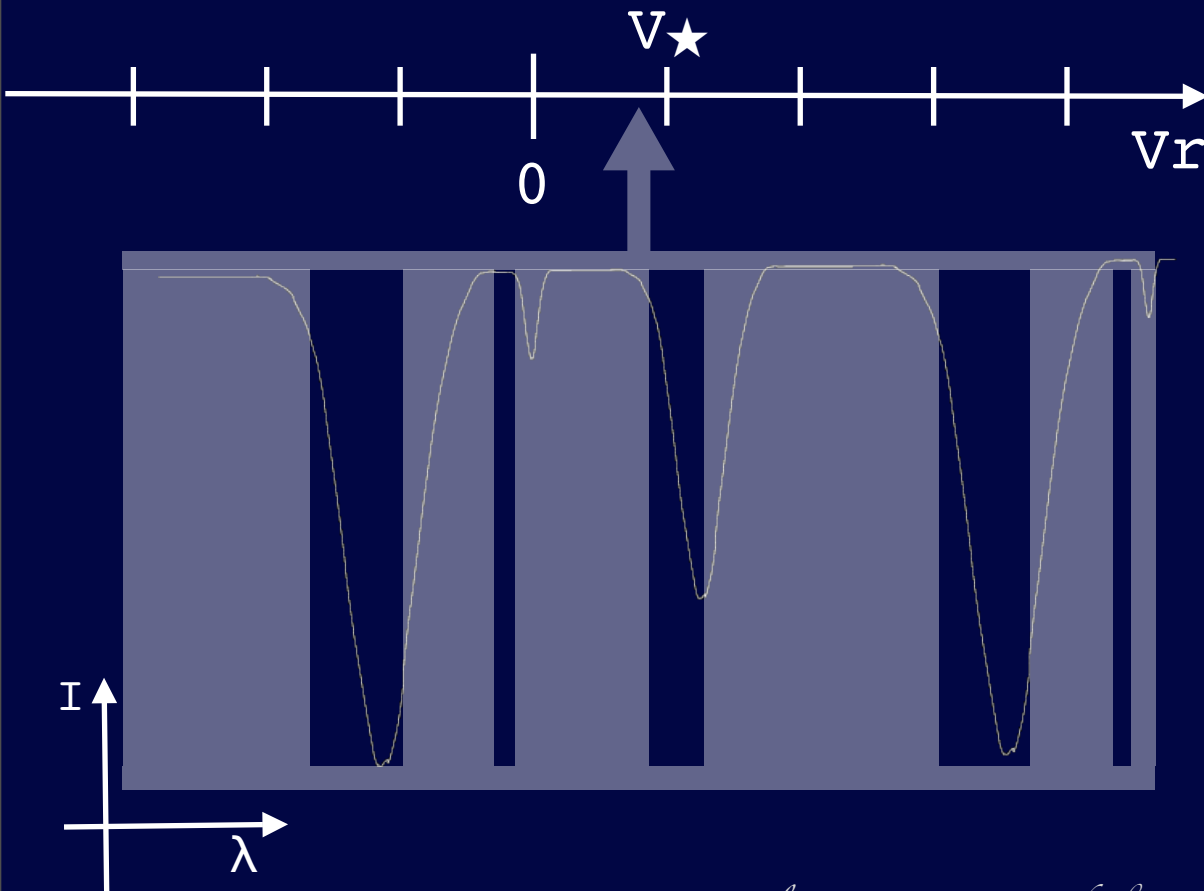


Méthode : II.1 La méthode

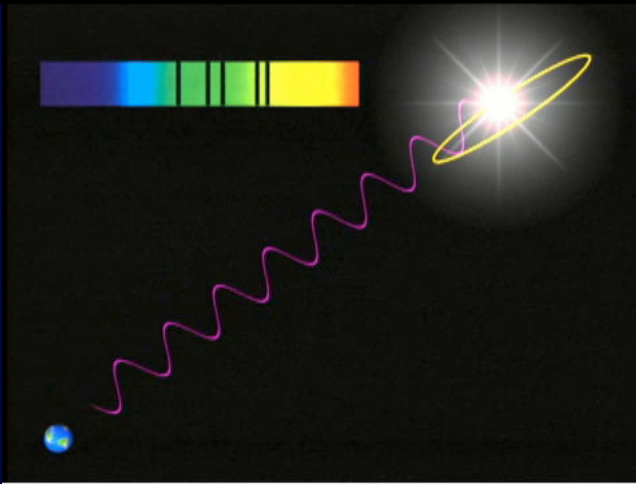


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

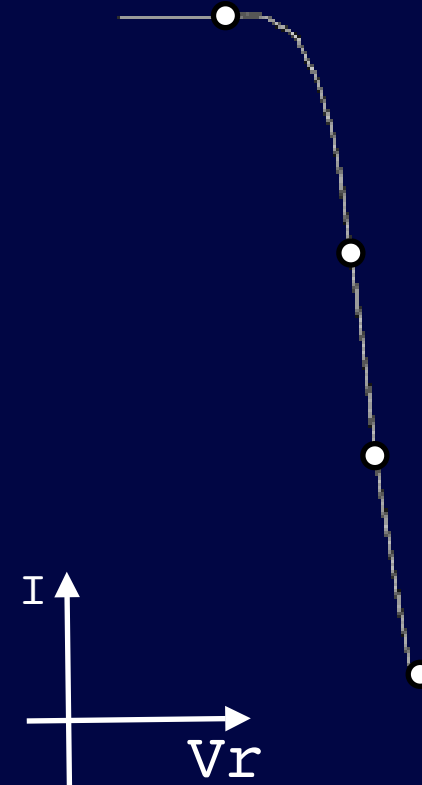
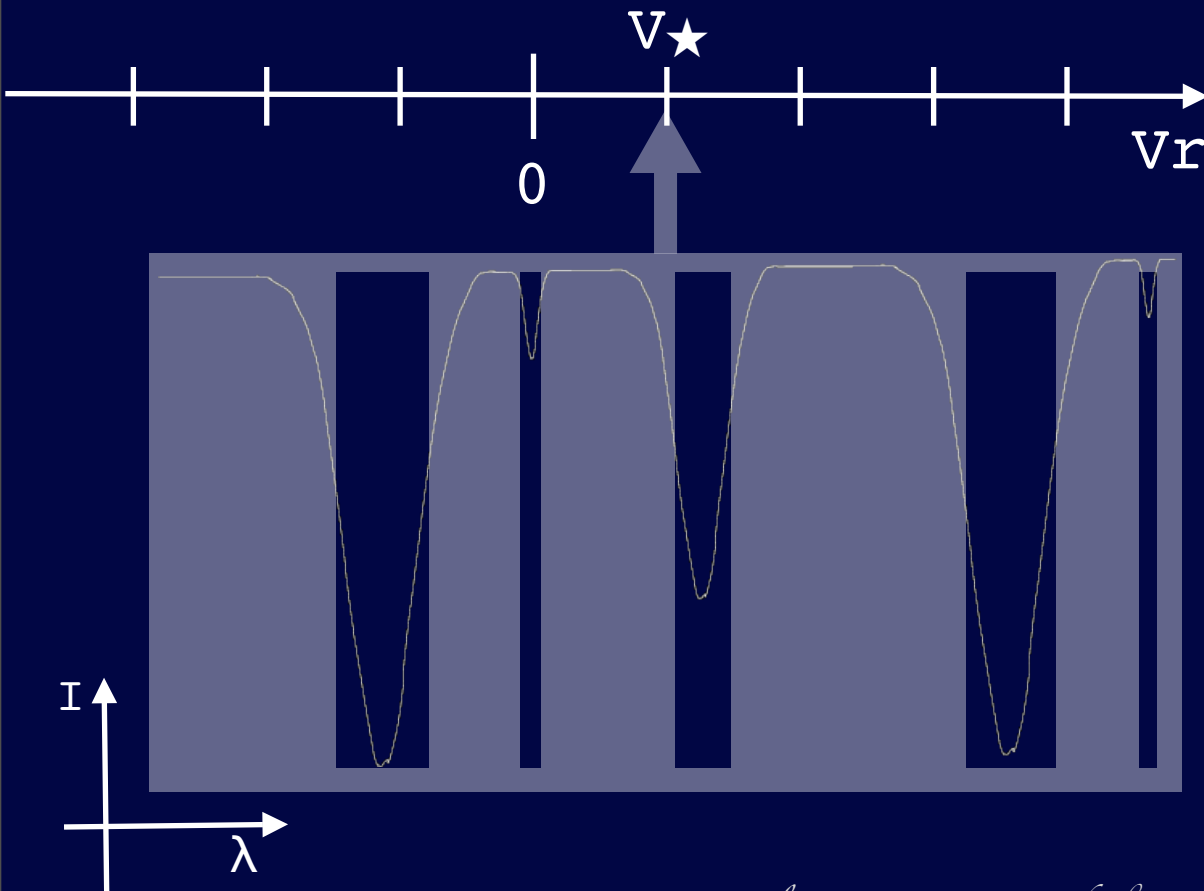


Méthode : II.1 La méthode

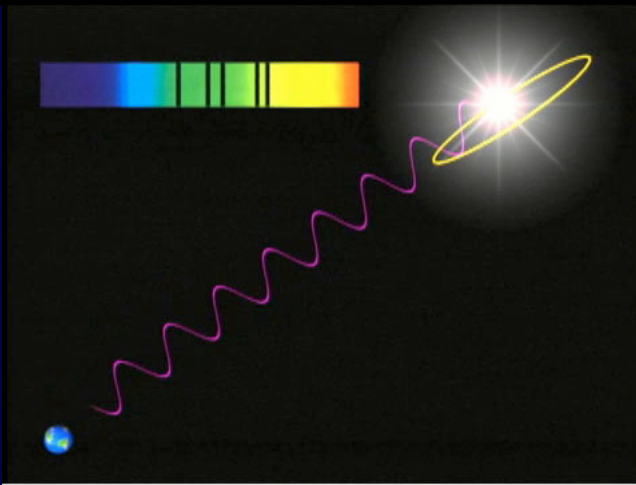


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

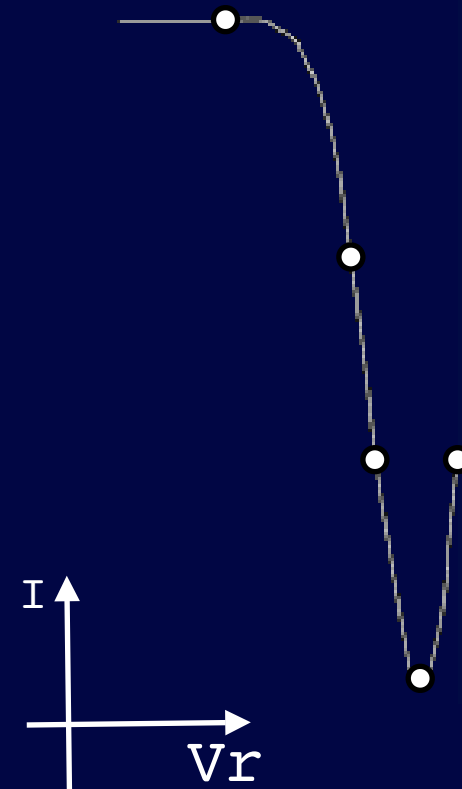
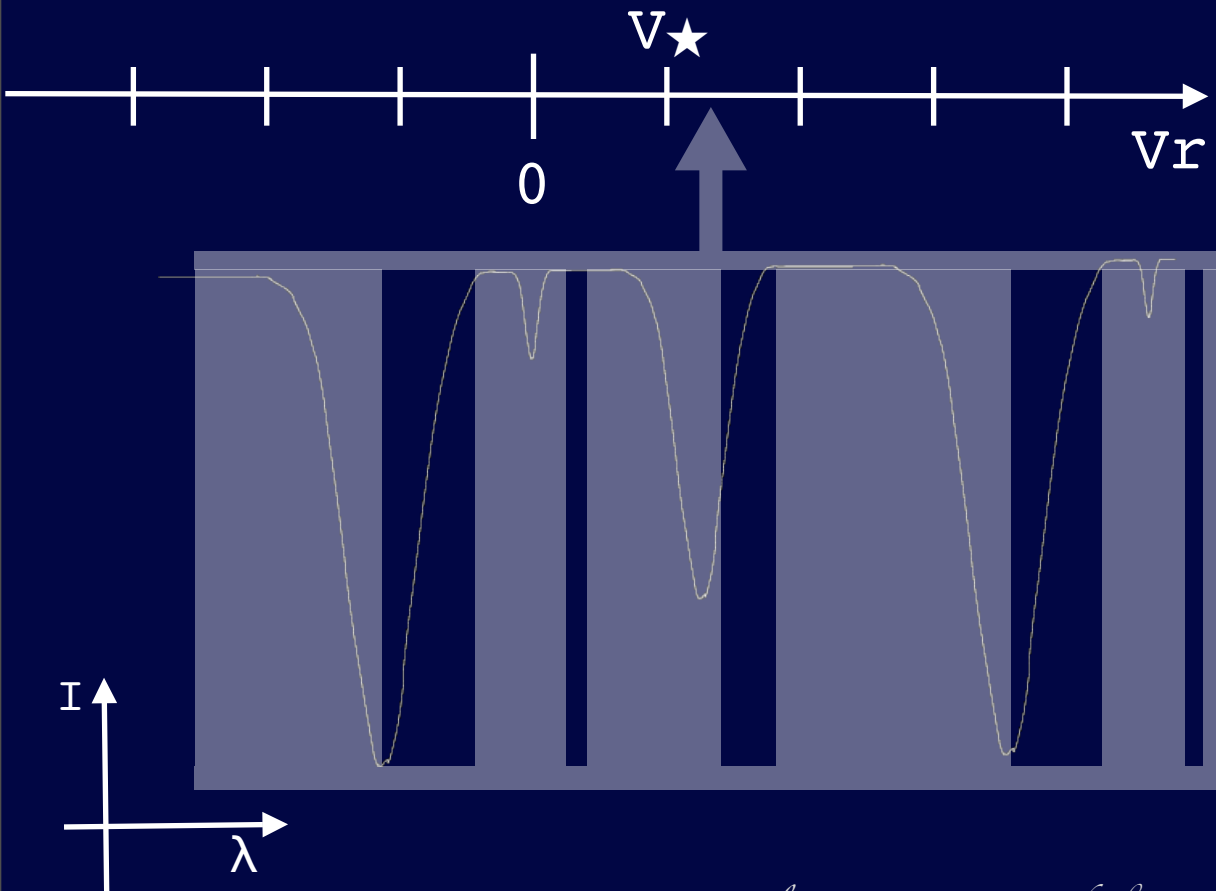


Méthode : II.1 La méthode

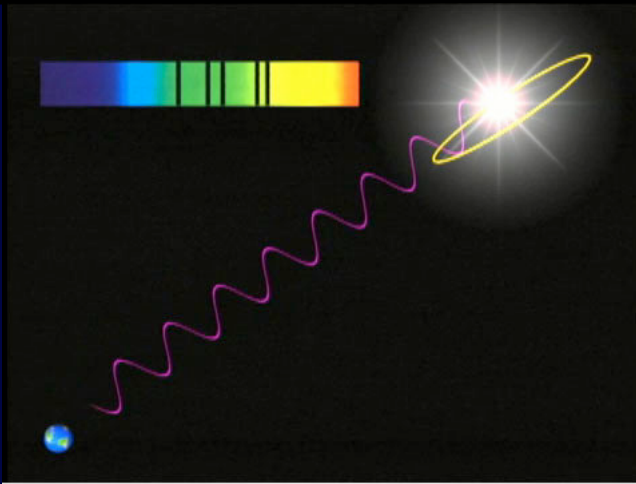


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

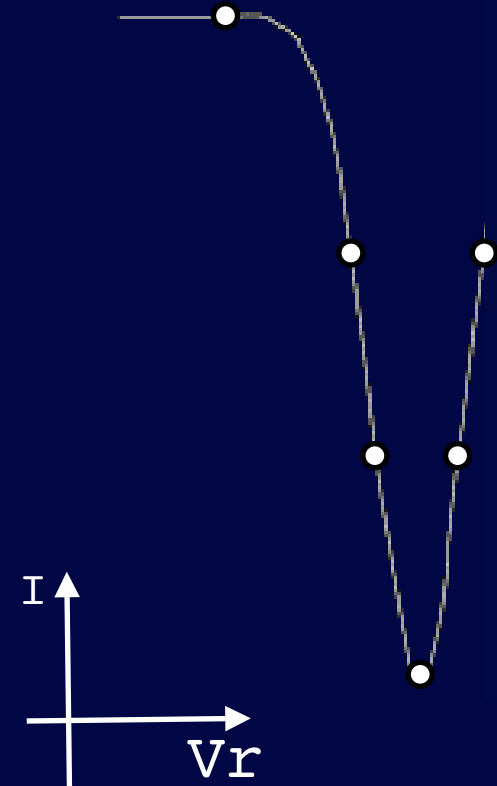
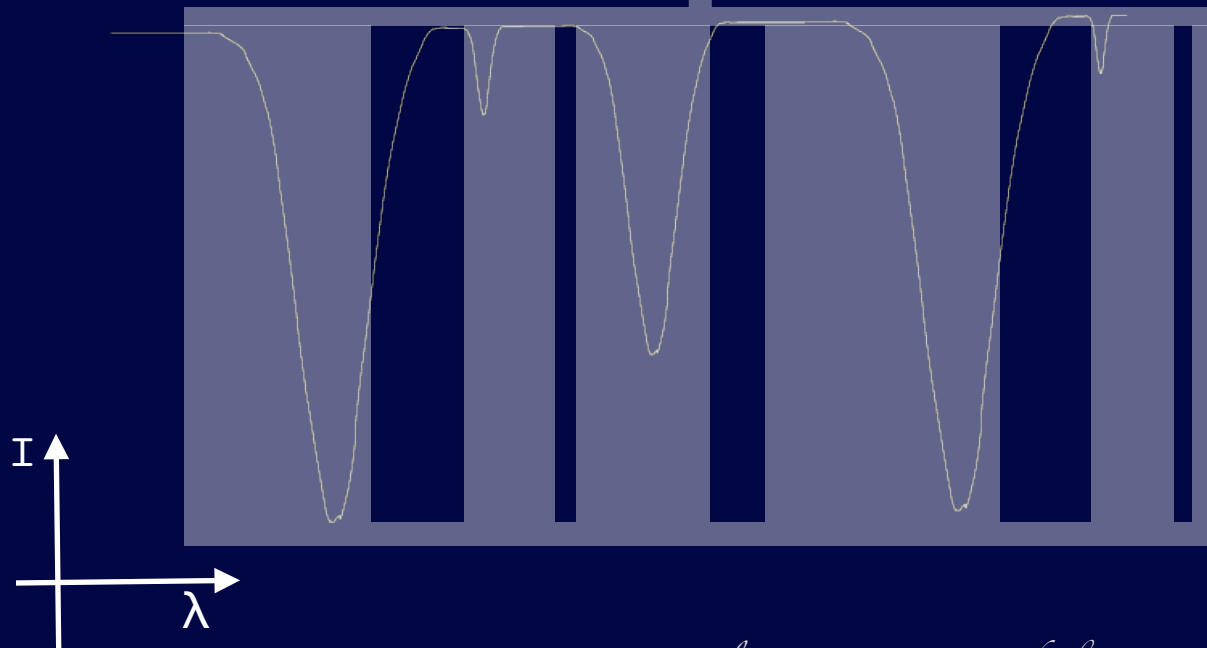
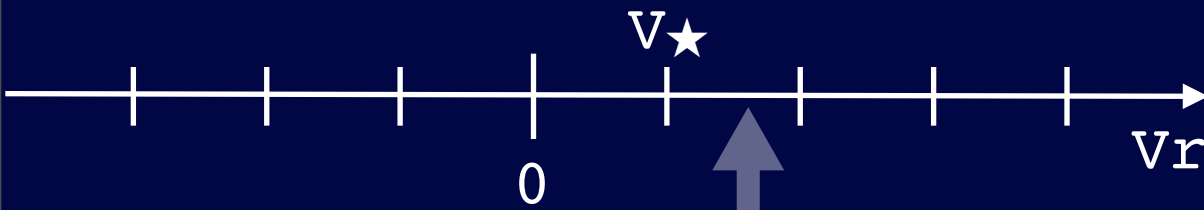


Méthode : II.1 La méthode

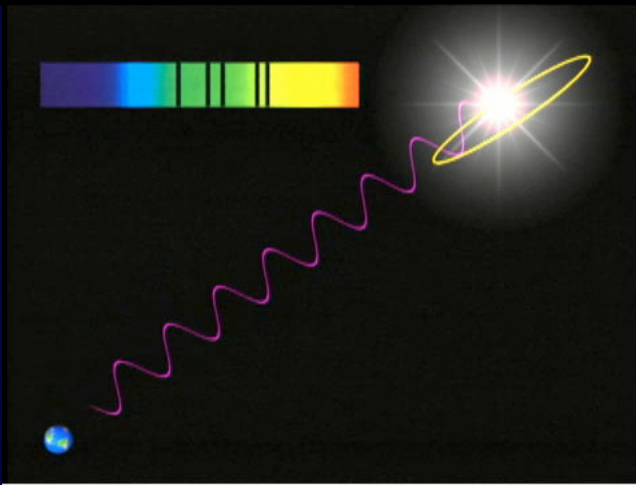


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

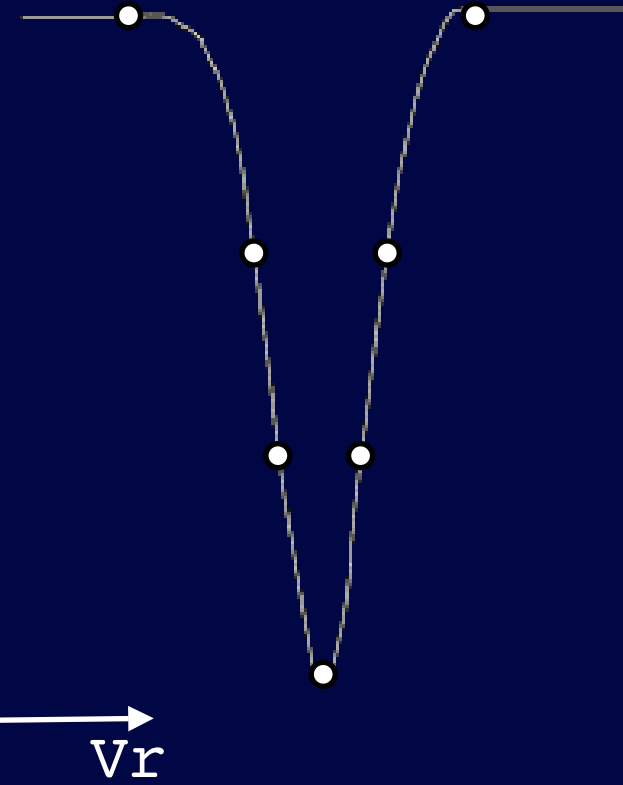
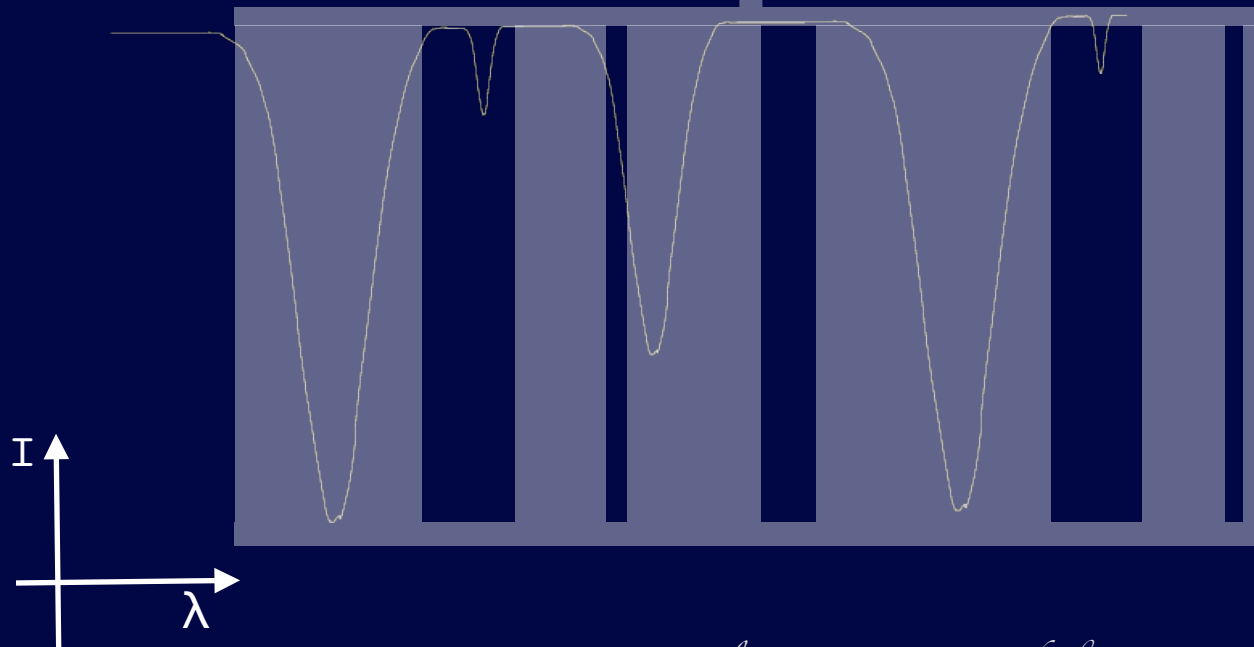
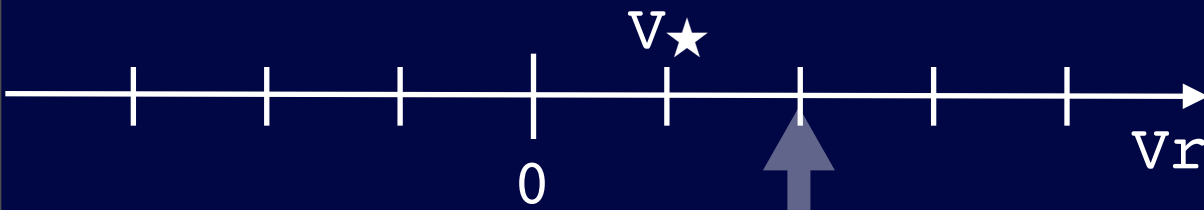


Méthode : II.1 La méthode

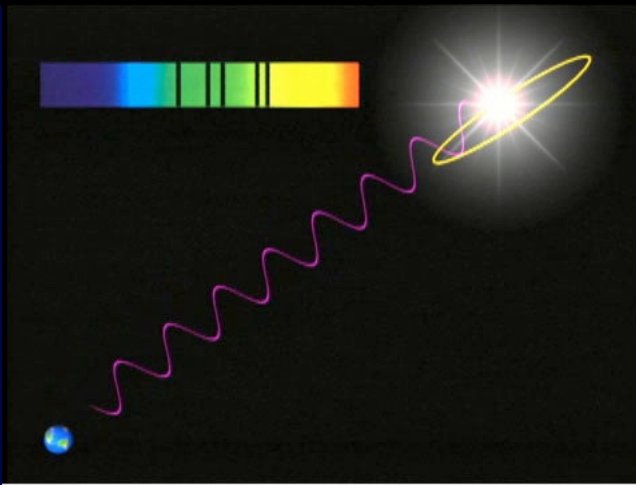


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

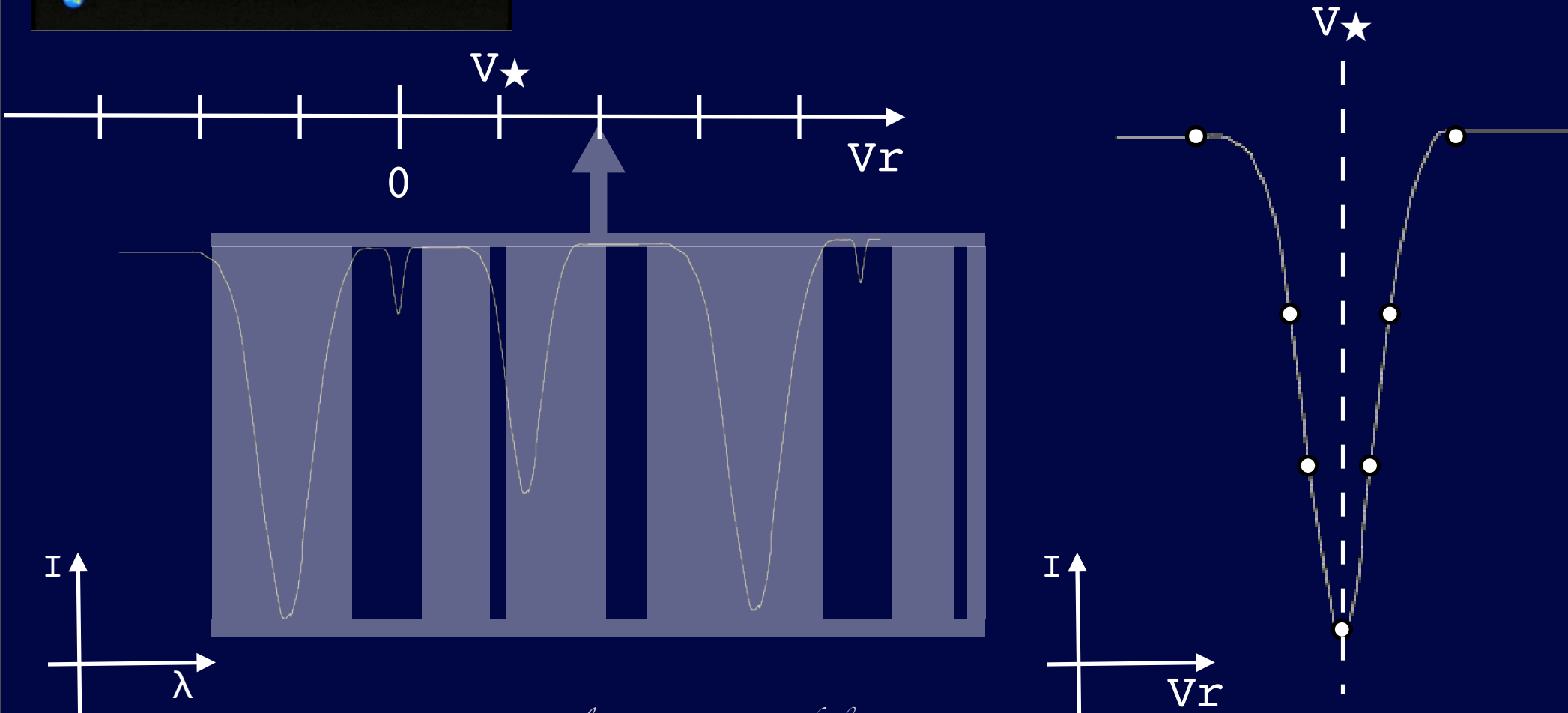


Méthode : II.1 La méthode



- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique



L'activité stellaire :

- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

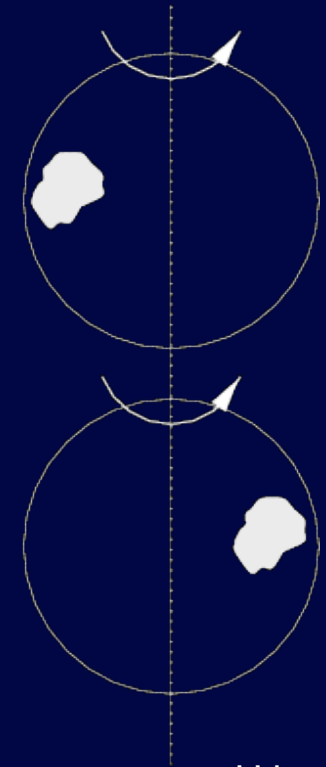
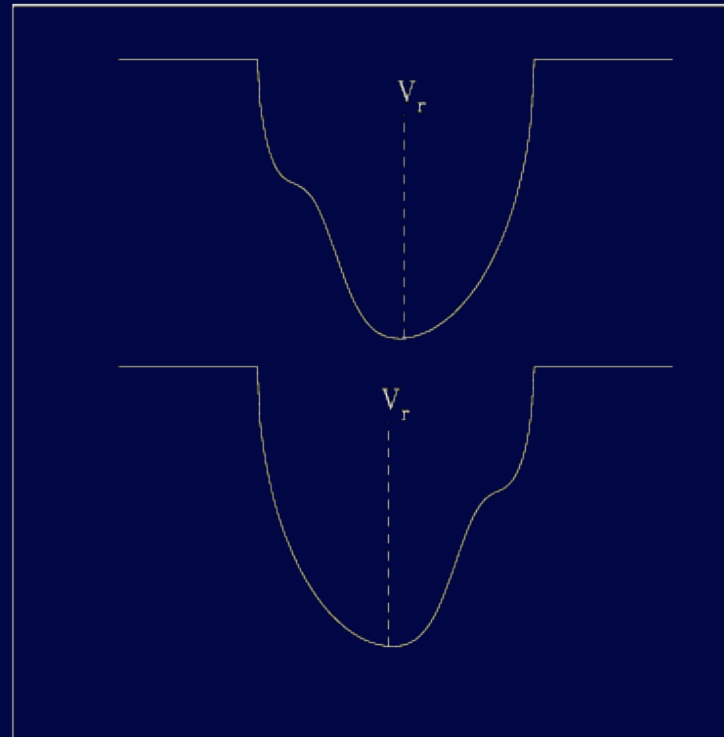
Les pulsations stellaires

- amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
- variation de forme des raies spectrales

→ élimination des imposteurs



Udry (2000)

→ Mimétisme dun signal planétaire

L'activité stellaire :

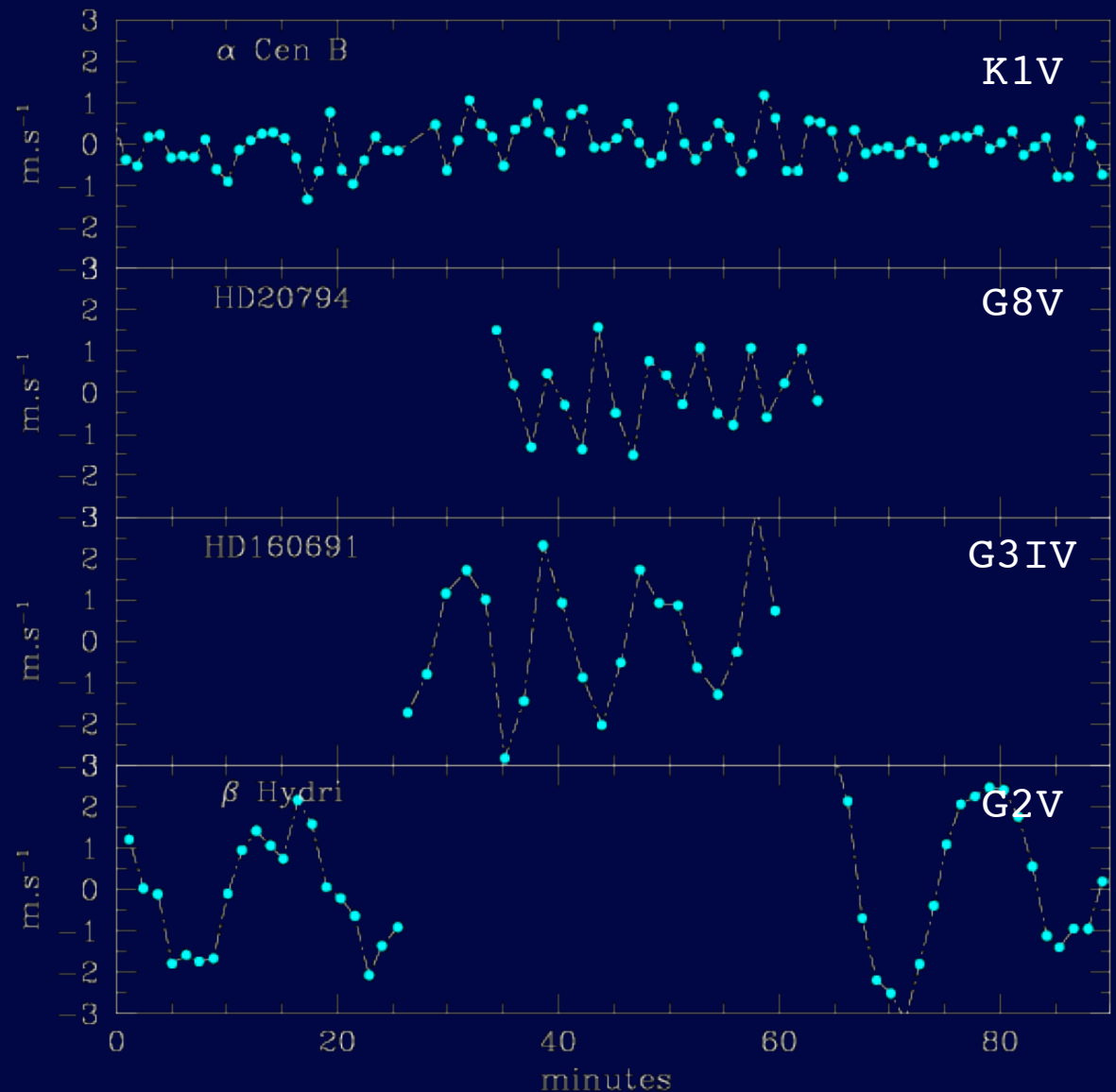
- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

Les pulsations stellaires

- amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
 - variation de forme des raies spectrales
- élimination des imposteurs



L'activité stellaire :

- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

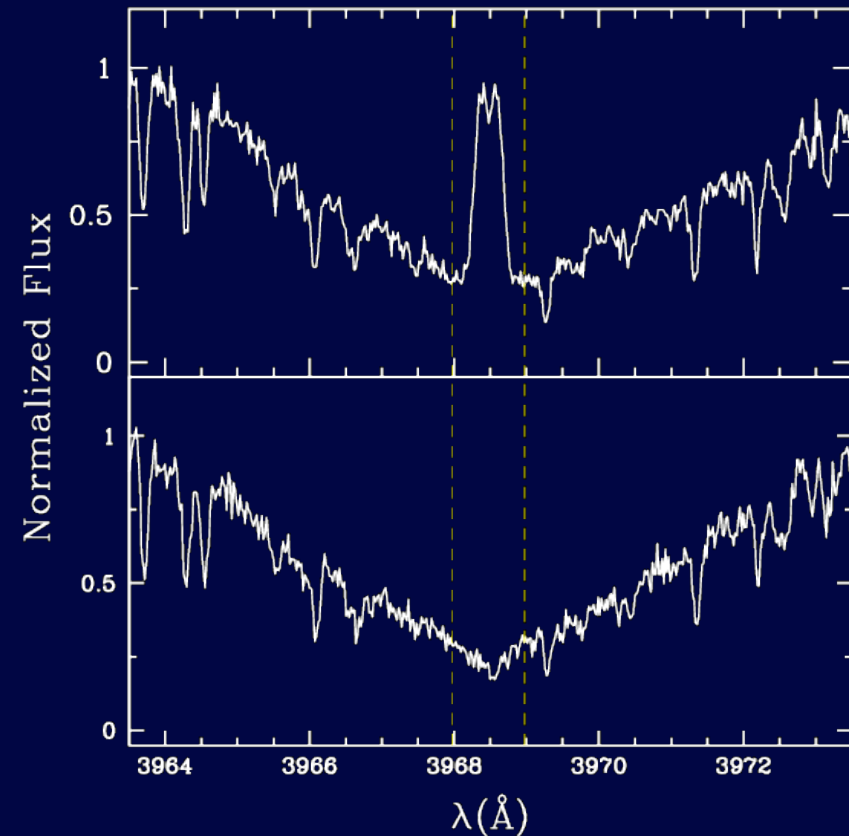
Les pulsations stellaires

- amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
- variation de forme des raies spectrales

- élimination des imposteurs



L'activité stellaire :

- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

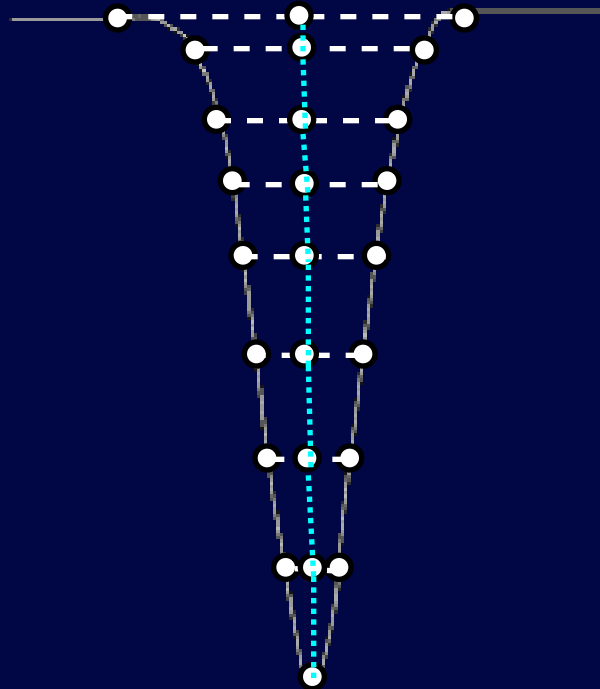
Les pulsations stellaires

- amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
 - variation de forme des raies spectrales
- élimination des imposteurs

Mesure de la dissymétrie des raies spectrales :



L'activité stellaire :

- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

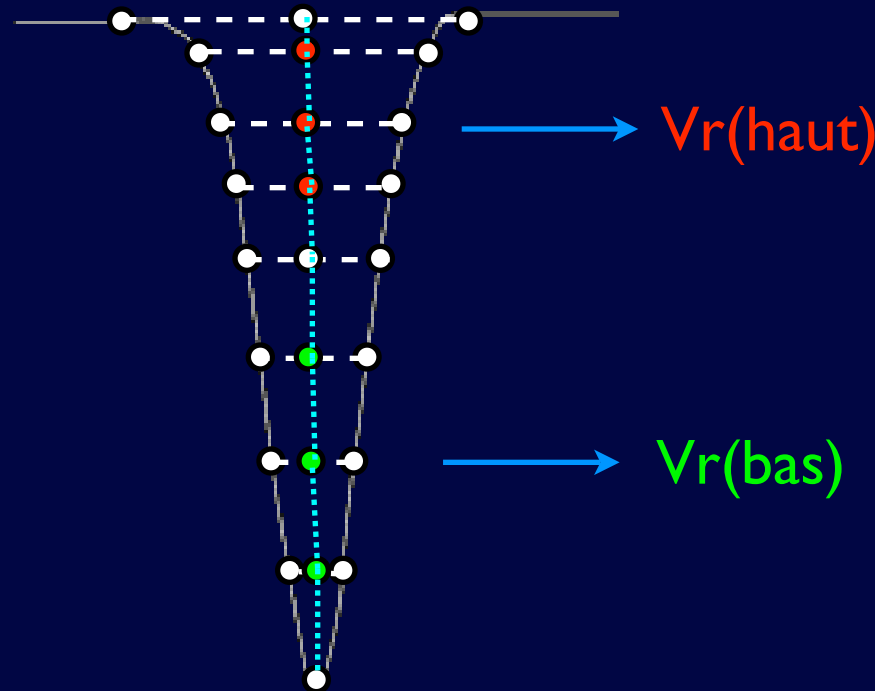
Les pulsations stellaires

- amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
 - variation de forme des raies spectrales
- élimination des imposteurs

Mesure de la dissymétrie des raies spectrales :



$$\text{Span} = Vr(\text{haut}) - Vr(\text{bas})$$

L'activité stellaire :

- taches magnétiques
 - points chauds
 - éruptions
- inhomogénéités de surface
- bruit pour les mesures Doppler

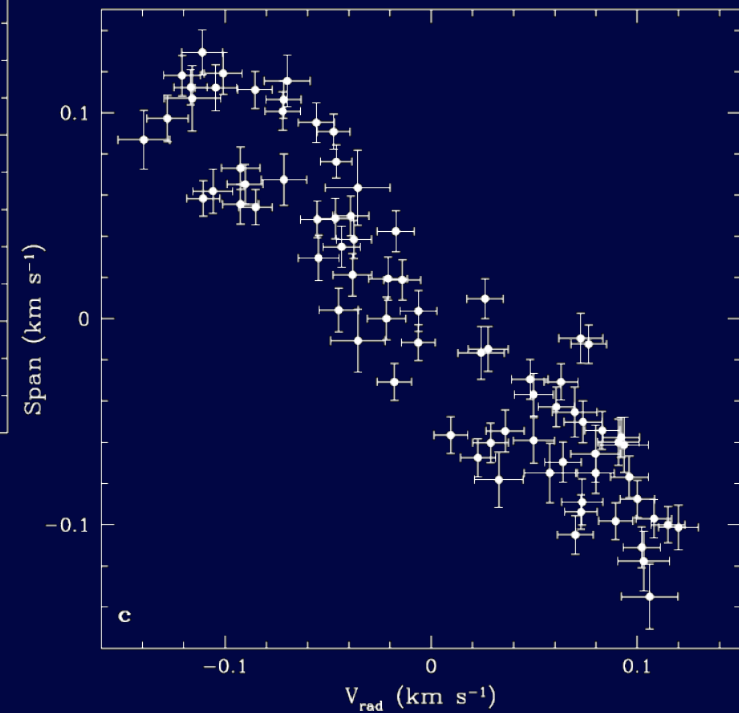
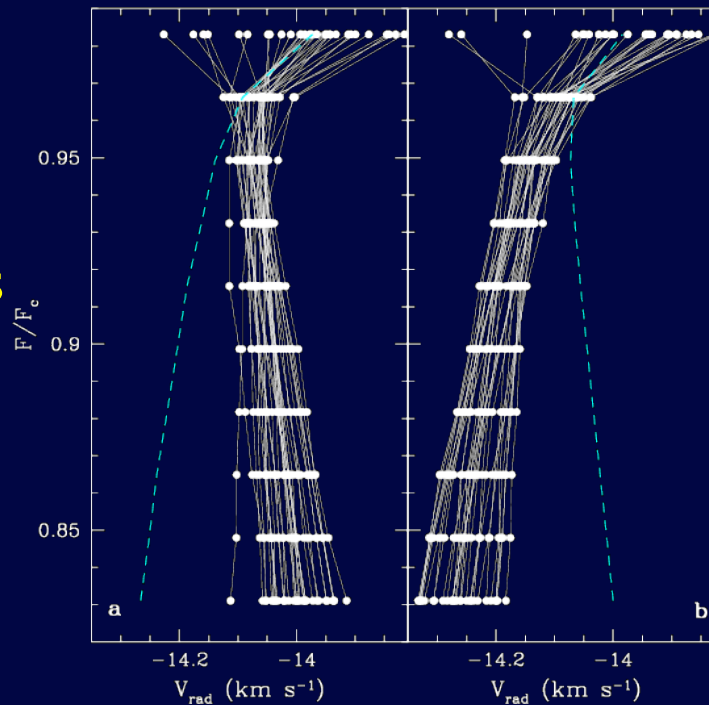
Les pulsations stellaires

→ amplitudes petites pour les naines M

Diagnostics :

- émission chromosphérique
 - variation de forme des raies spectrales
- élimination des imposteurs

Mesure de la dissymétrie des raies spectrales :



Queloz et al. (2001)

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

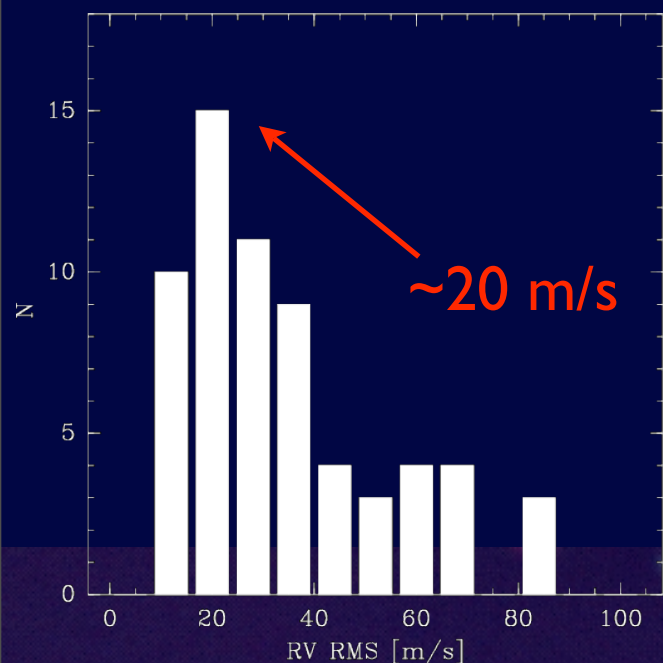
1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

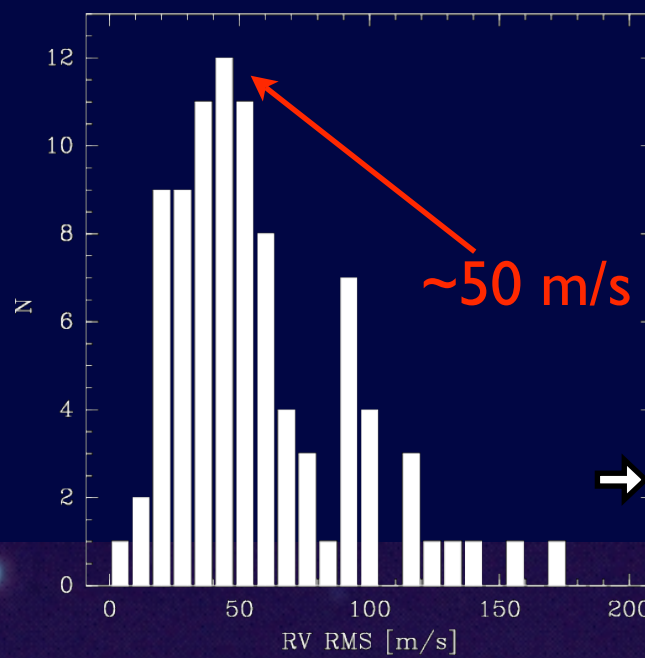
1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

Les programmes : III.1 Instruments, échantillons, précisions

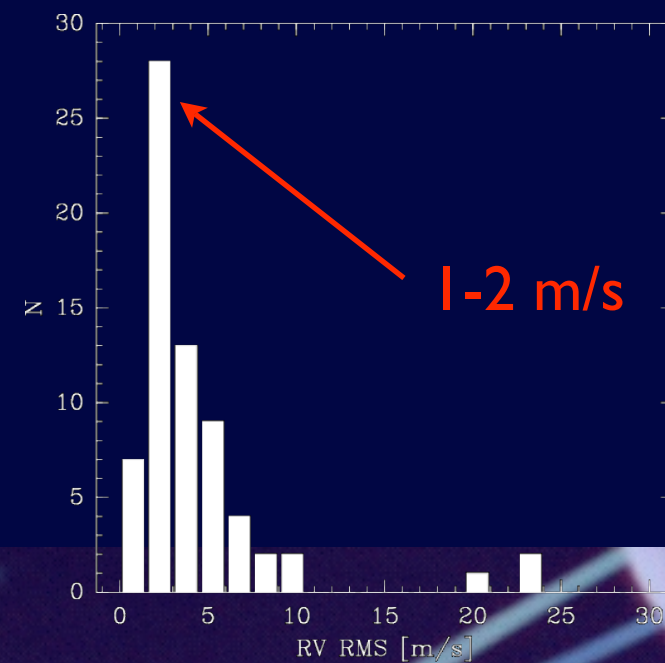
Instrument :	Télescope	Domaine λ	Echantillon	Volume	Précision
ELODIE	1m93, OHP	3850 - 6000 Å	150 ★ ~300 nuits 1996-2005	8 pc → 13 pc	~20 m/s
FEROS	1m50, La Silla	3800 - 9900 Å	200 ★ 30 nuits 1999-2001	13 pc	~50 m/s
HARPS	3m60, La Silla	3800 - 6900 Å	100 ★ 50 nuits 2003-2008	11 pc	2 m/s



ELODIE

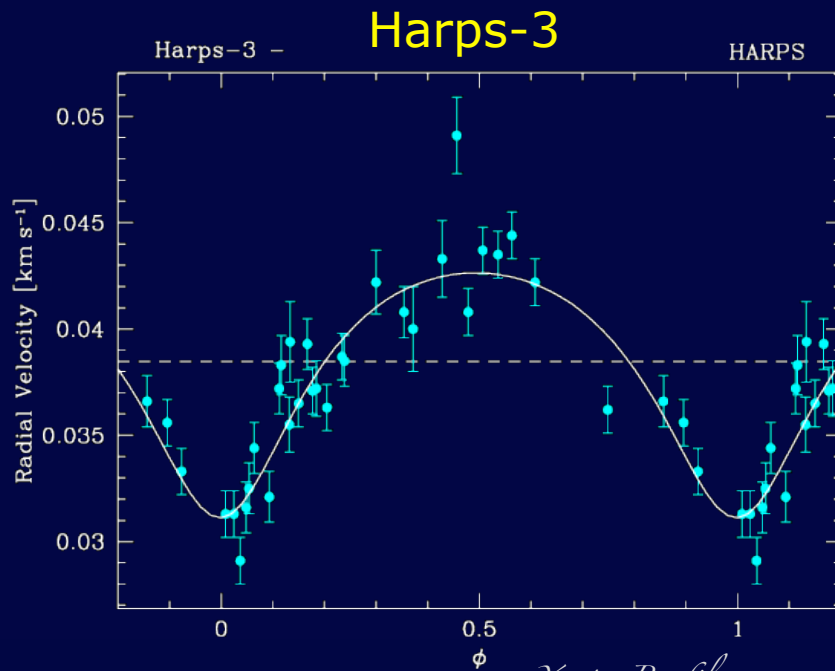
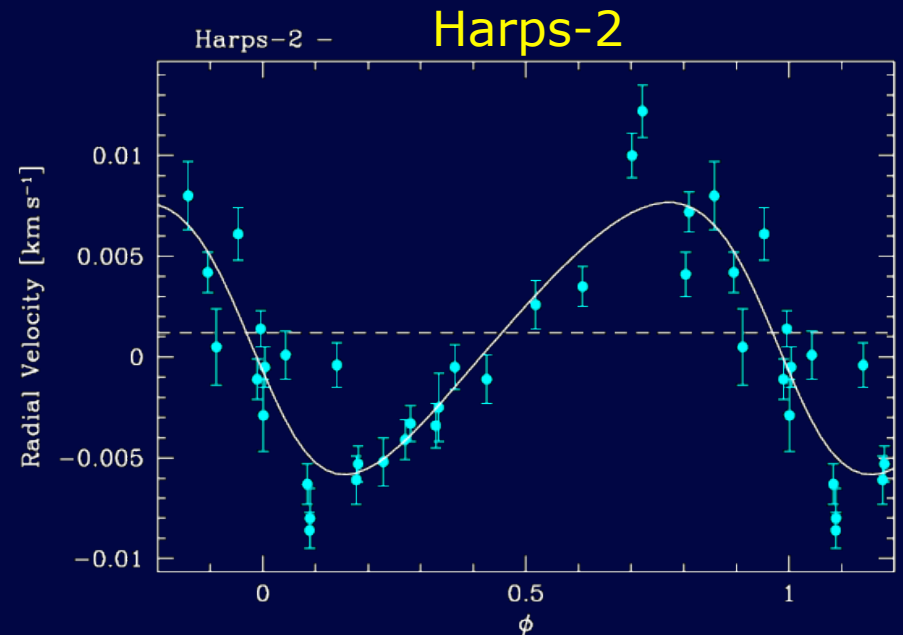
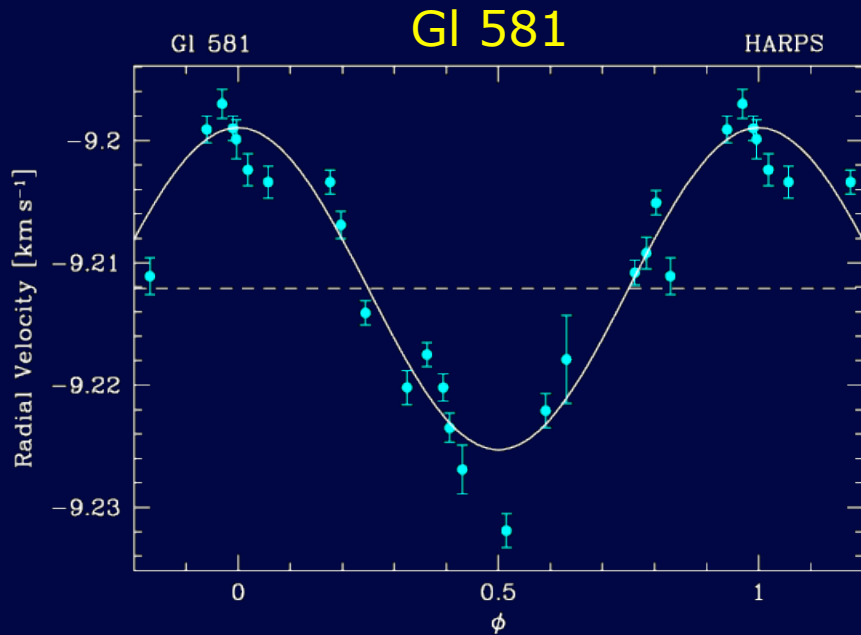


FEROS



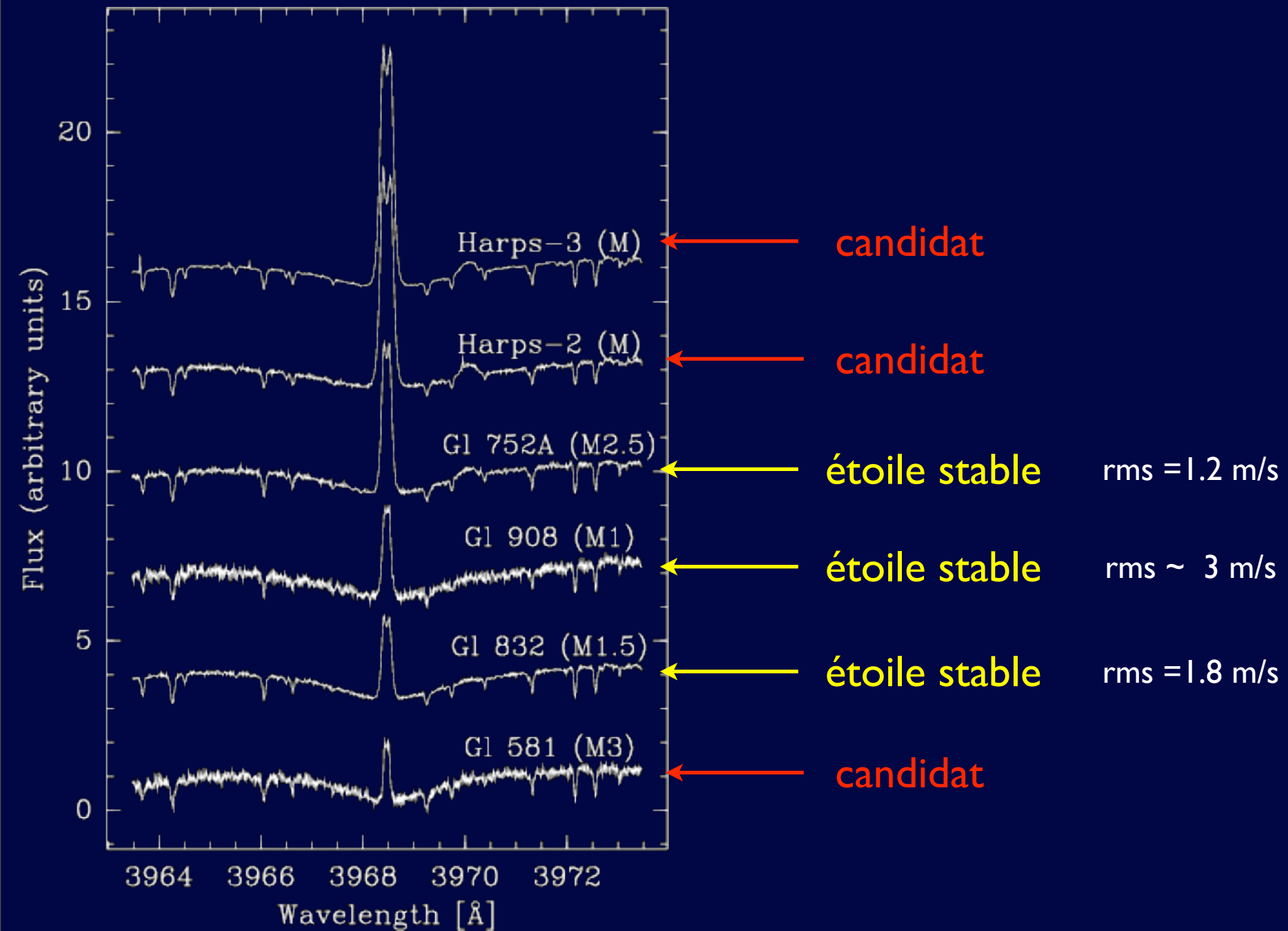
HARPS

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs



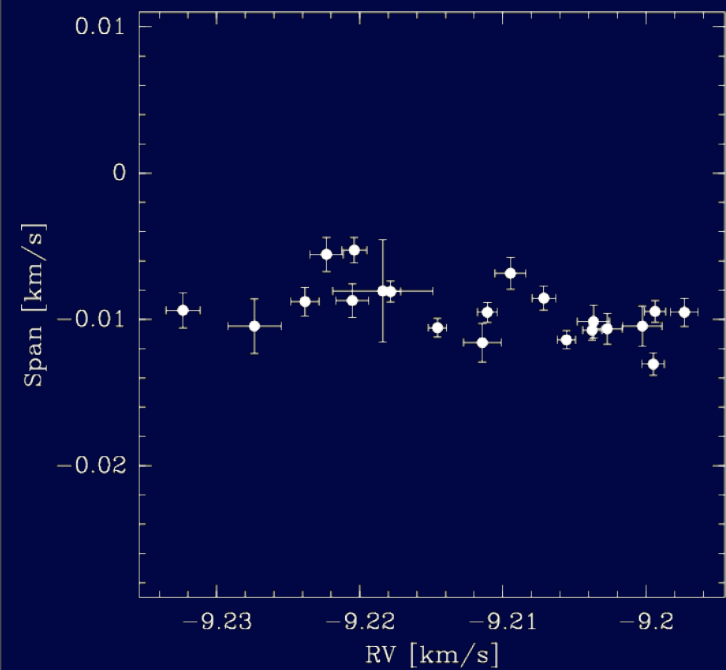
	GI 581	Harps-2	Harps-3
$M \sin i$	$16-17 M_{\oplus} \approx 1 M_{\psi} \approx 0.05-0.06 M_{\text{Jup}}$		
P	5.4 jrs	10 jrs	35 jrs
e	0 (fix.)	0.2	0.3
$\sigma(\text{o-c})$	2.5 m/s	2.3 m/s	1.8 m/s

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

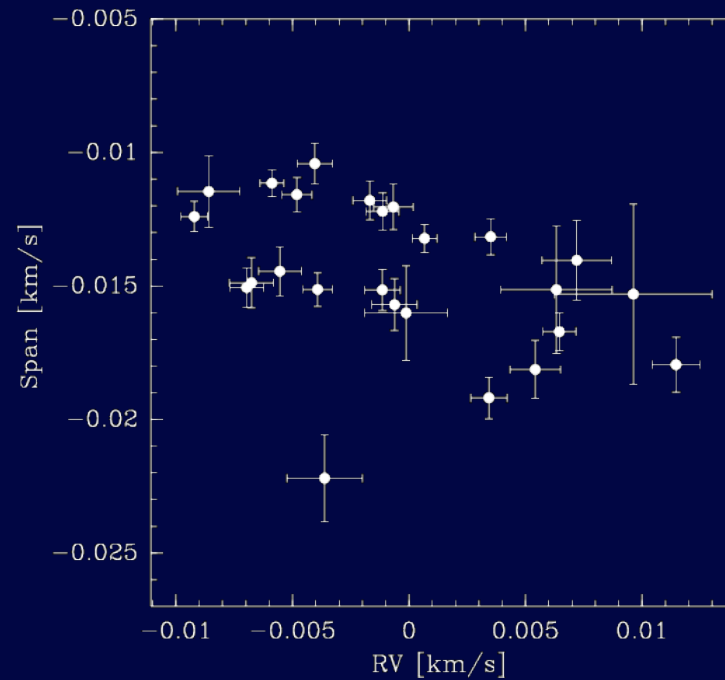


Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

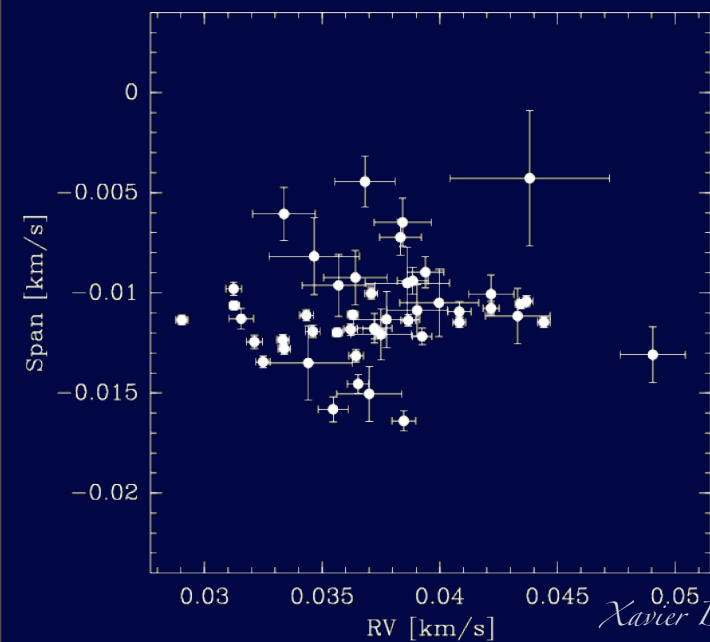
GI 581



Harps-2



Harps-3



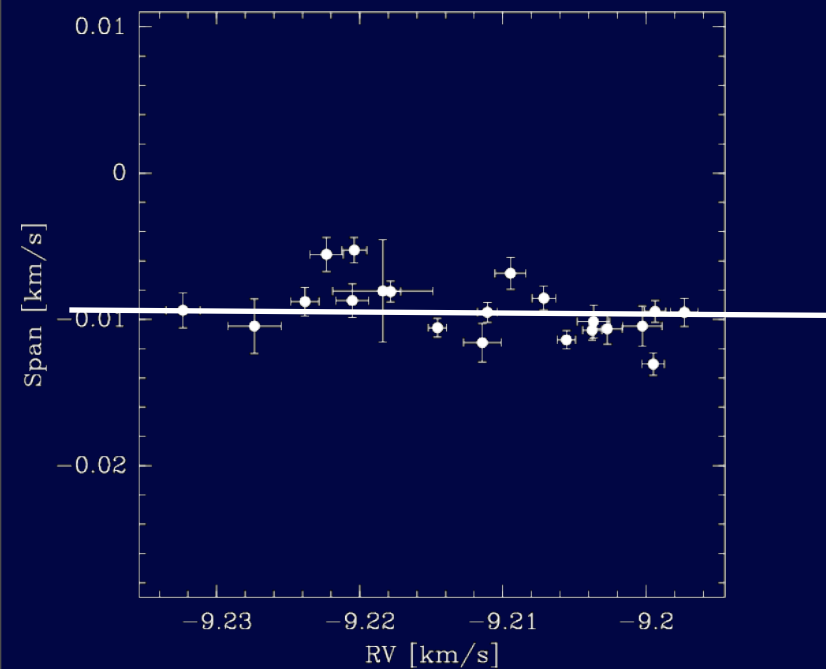
Xavier Bonfils.

Soutenance de thèse.

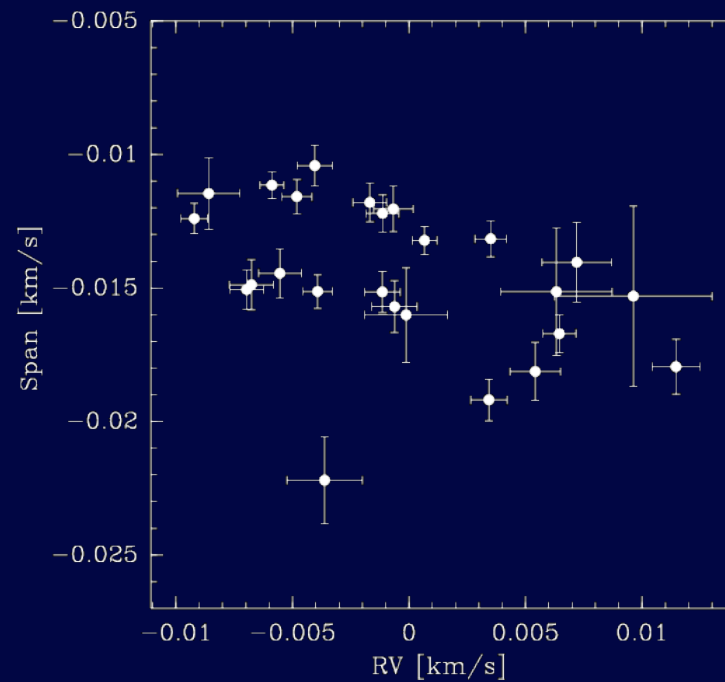
31 janvier 2006.

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

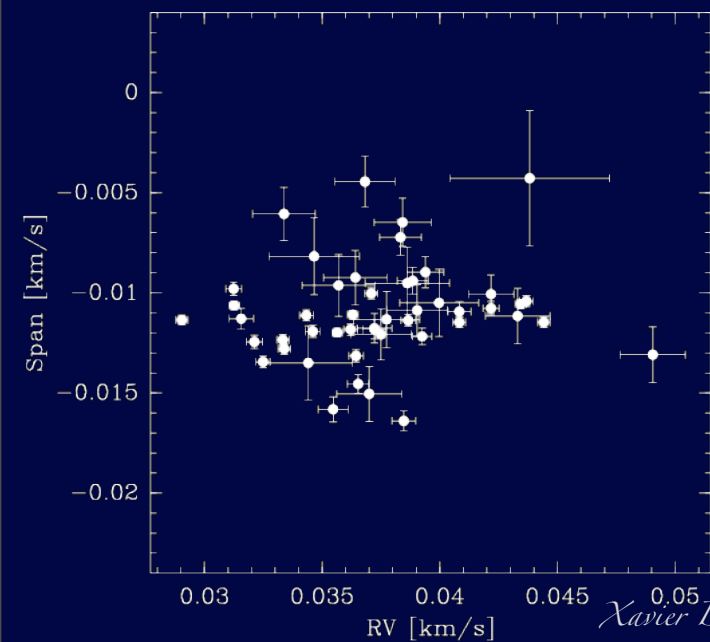
GI 581



Harps-2



Harps-3



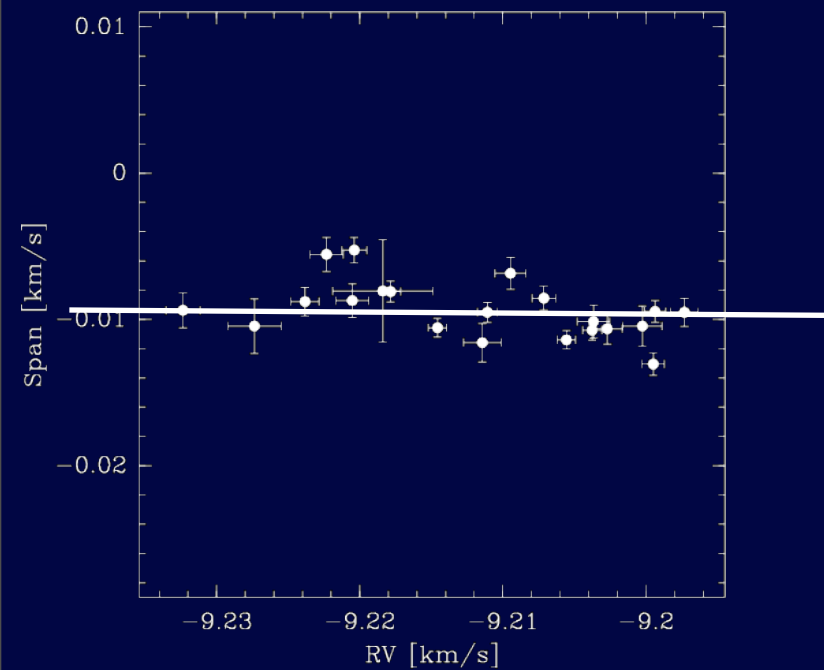
Xavier Bonfils.

Soutenance de thèse.

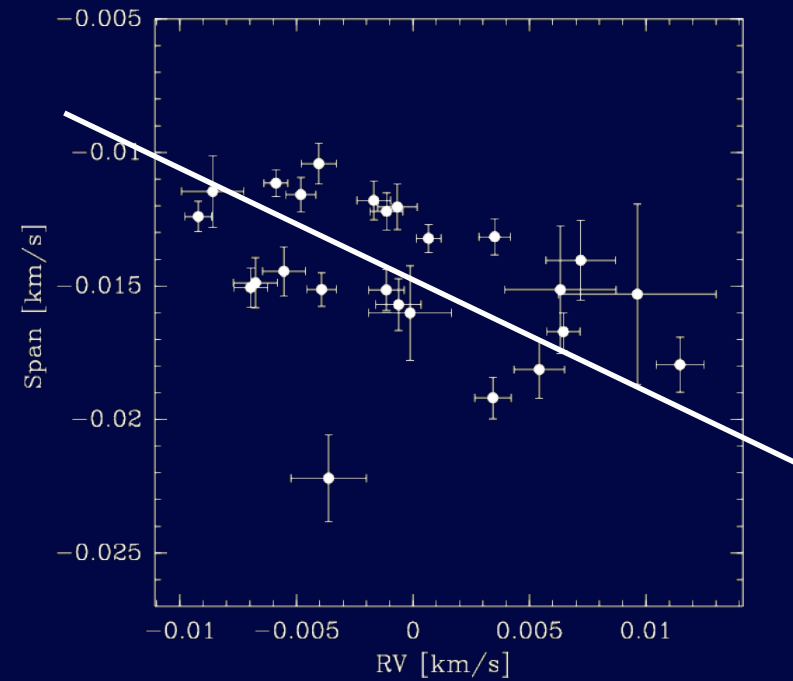
31 janvier 2006.

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

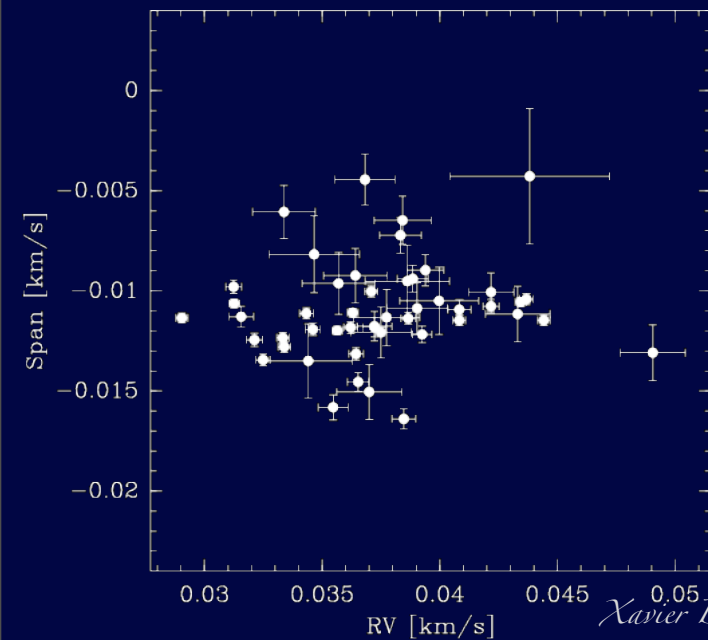
GI 581



Harps-2



Harps-3



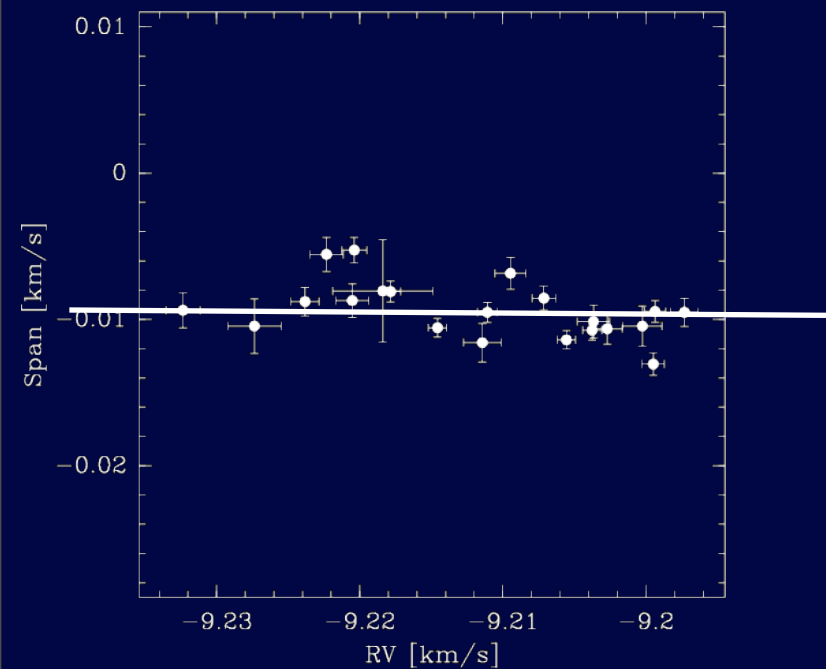
Xavier Bonfils.

Soutenance de thèse.

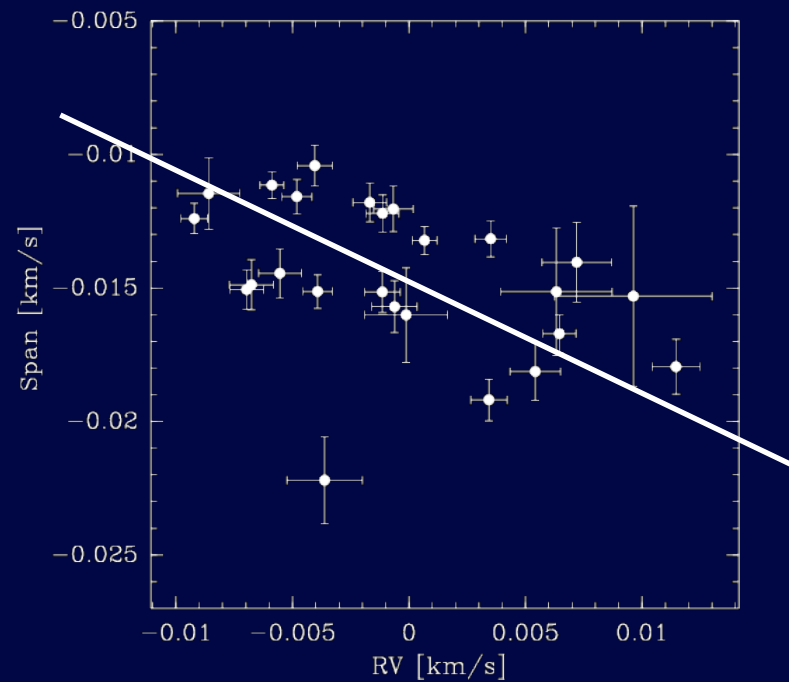
31 janvier 2006.

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

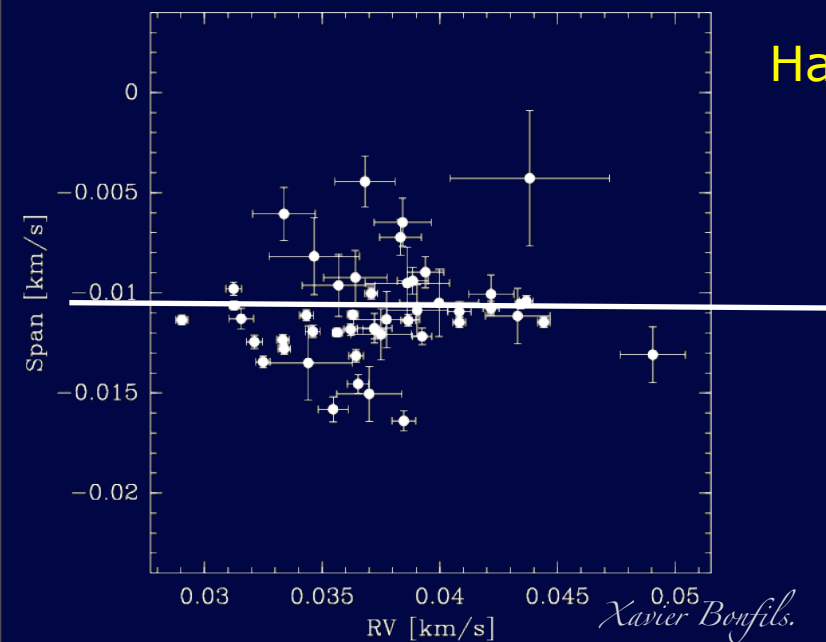
GI 581



Harps-2

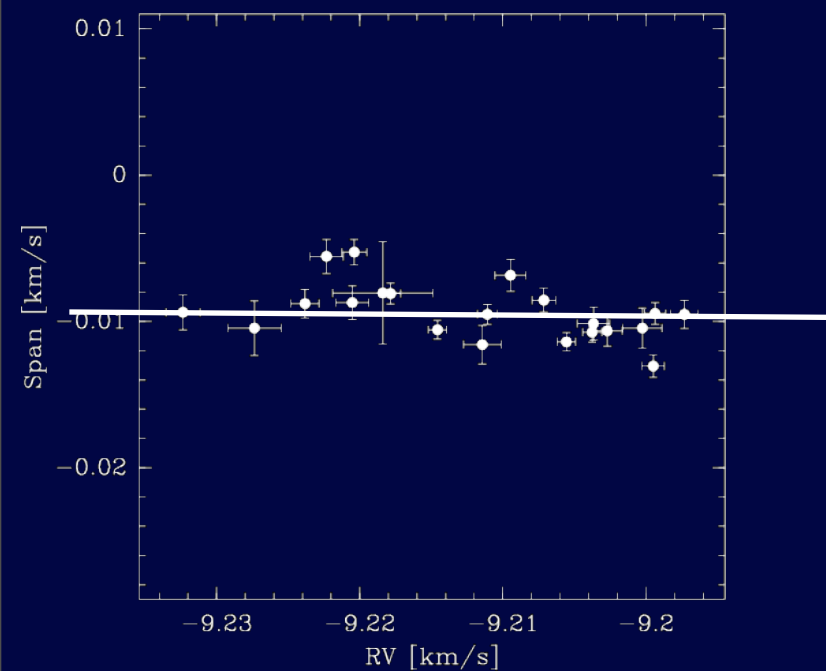


Harps-3

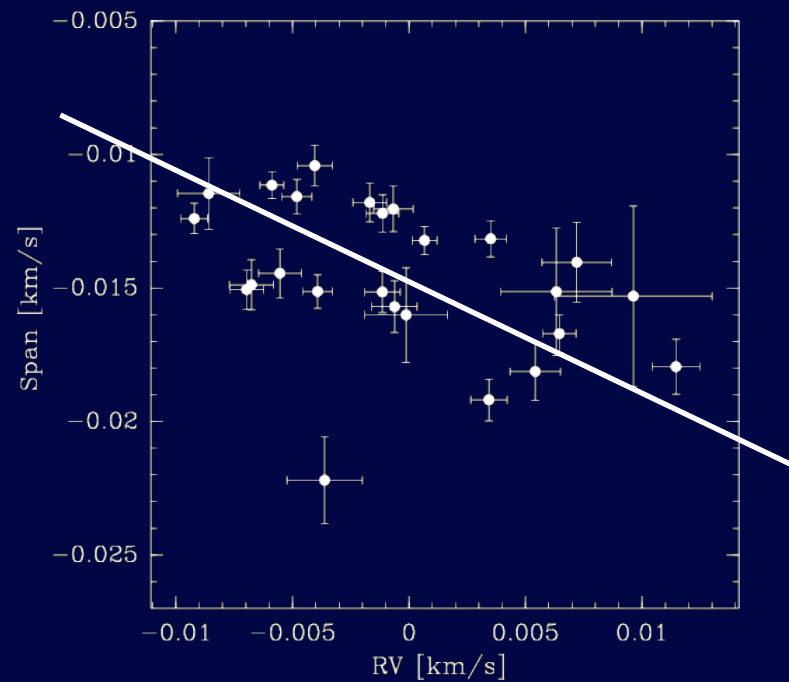


Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

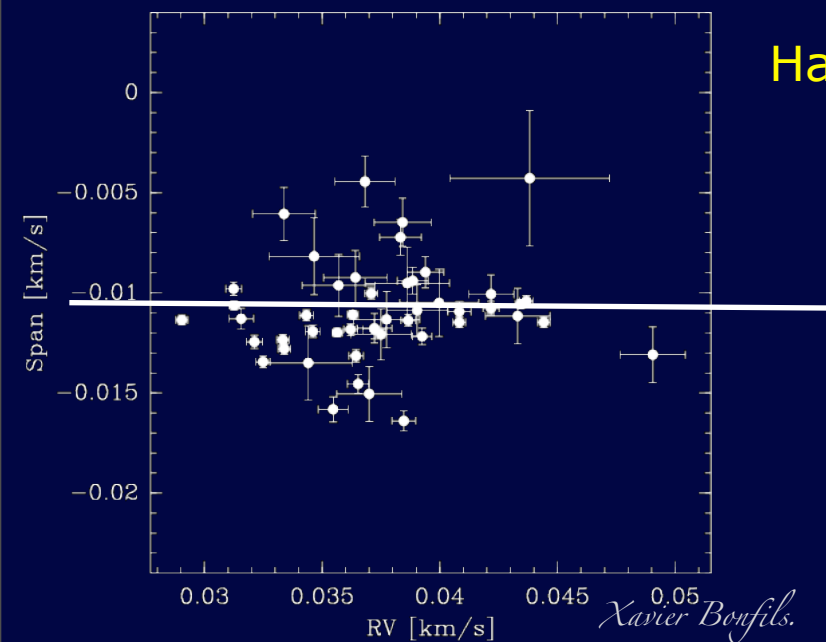
GI 581



Harps-2

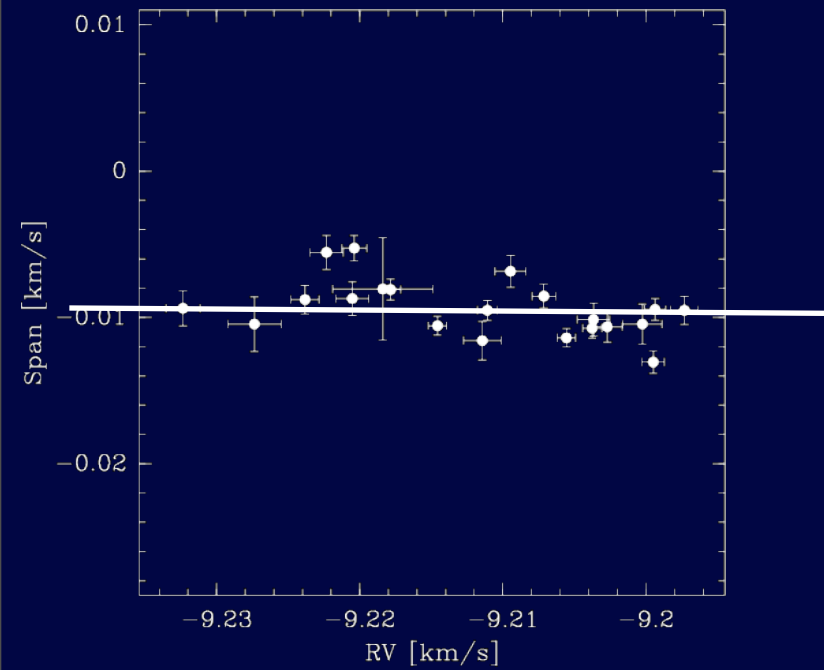


Harps-3

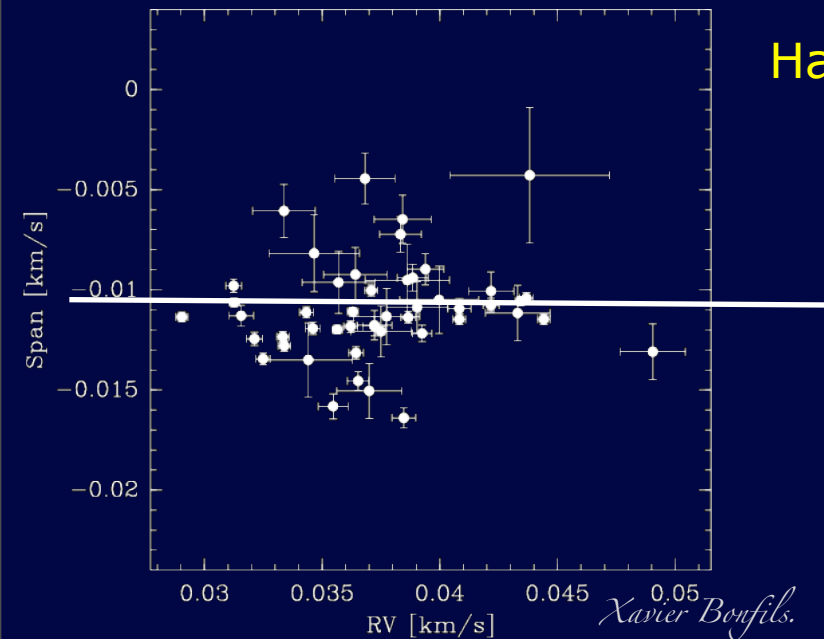
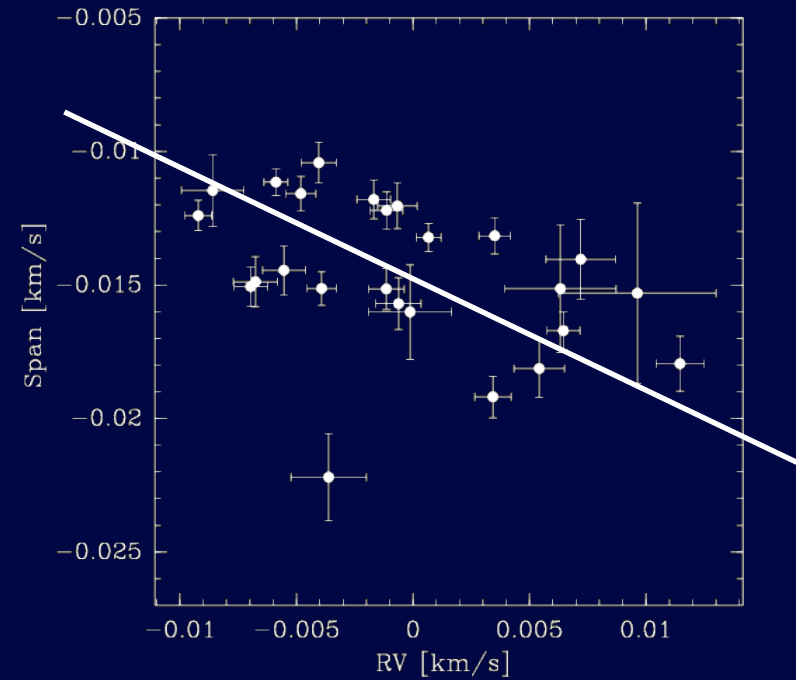


Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

GI 581



Harps-2

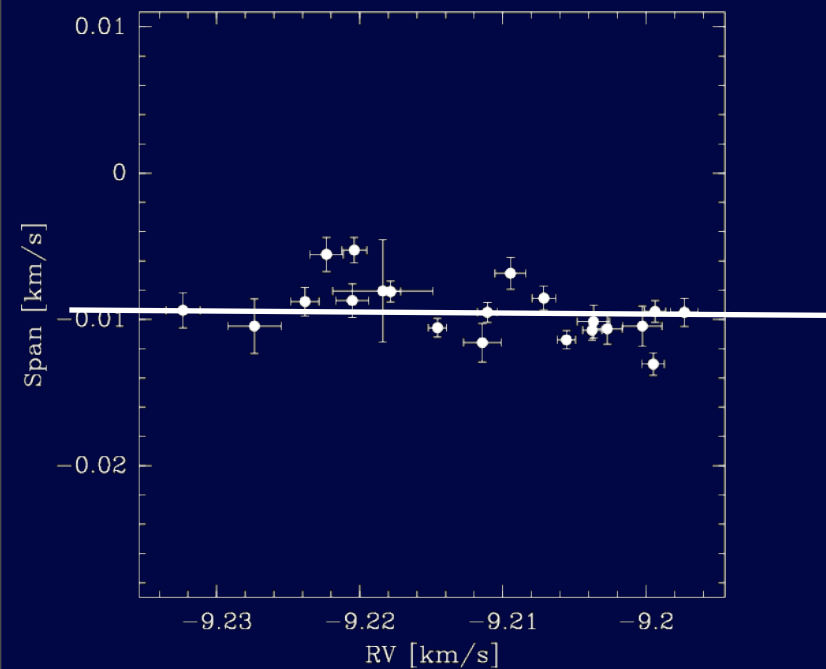


Harps-3

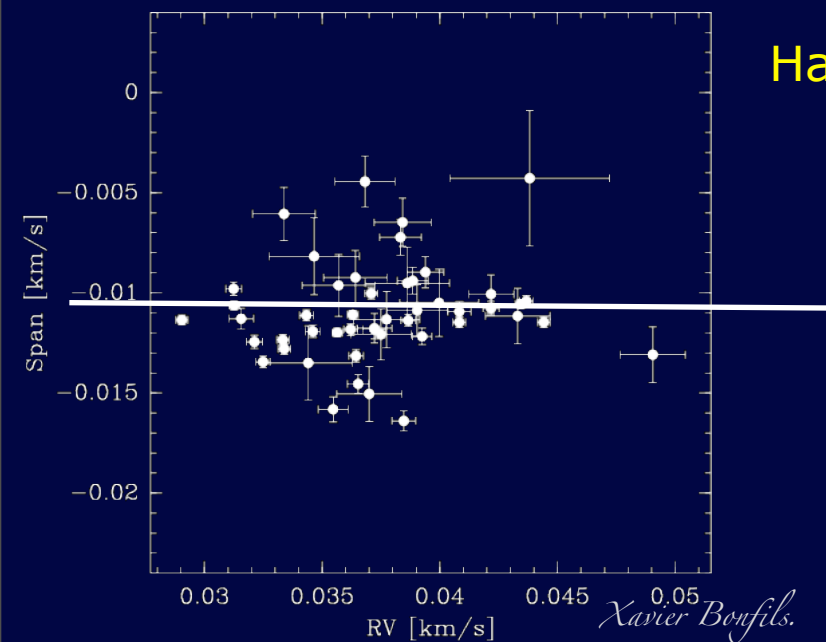
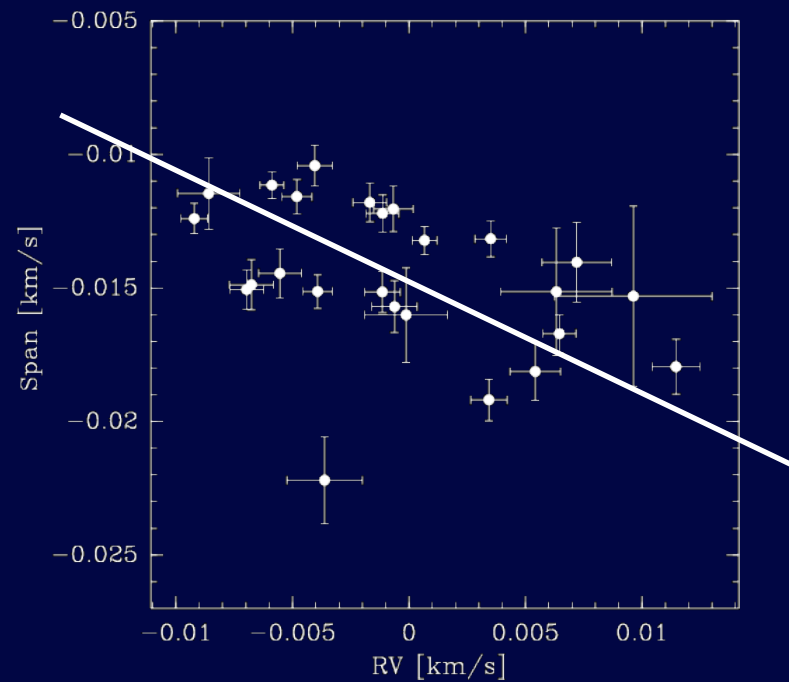


Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

GI 581



Harps-2

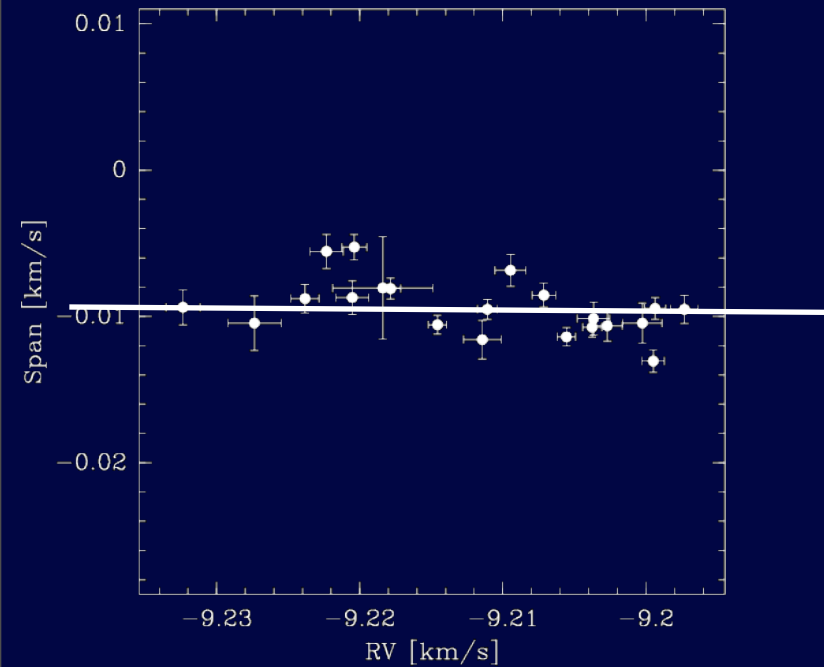


Harps-3

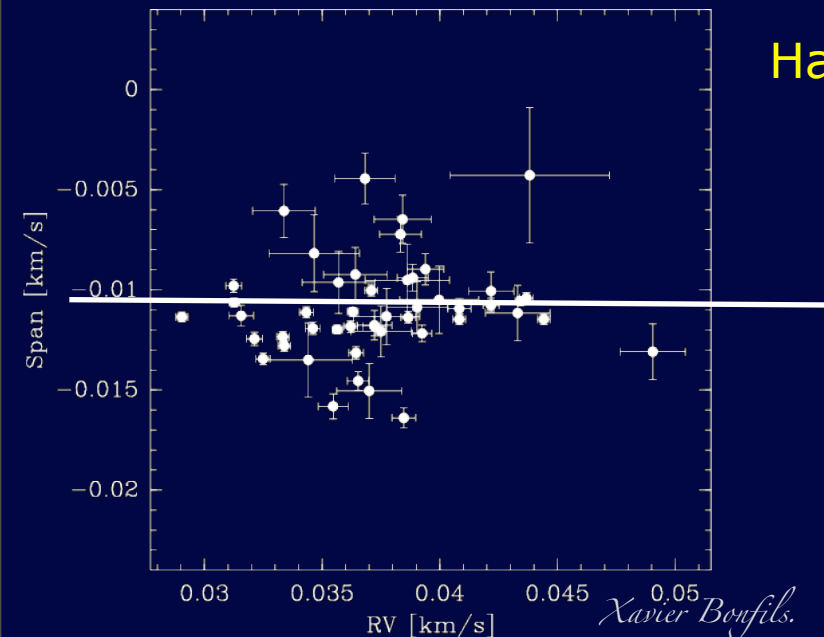
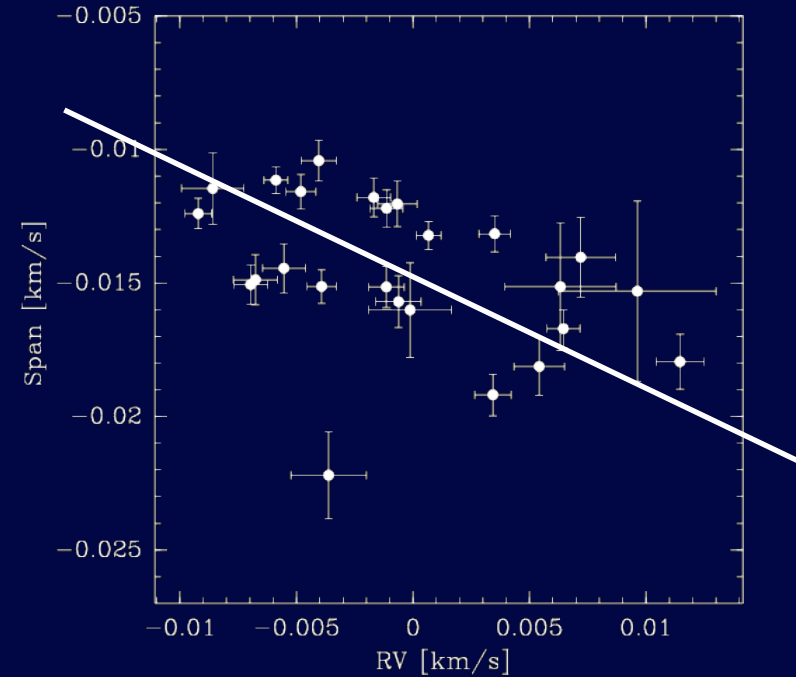


Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs

GI 581



Harps-2



Harps-3

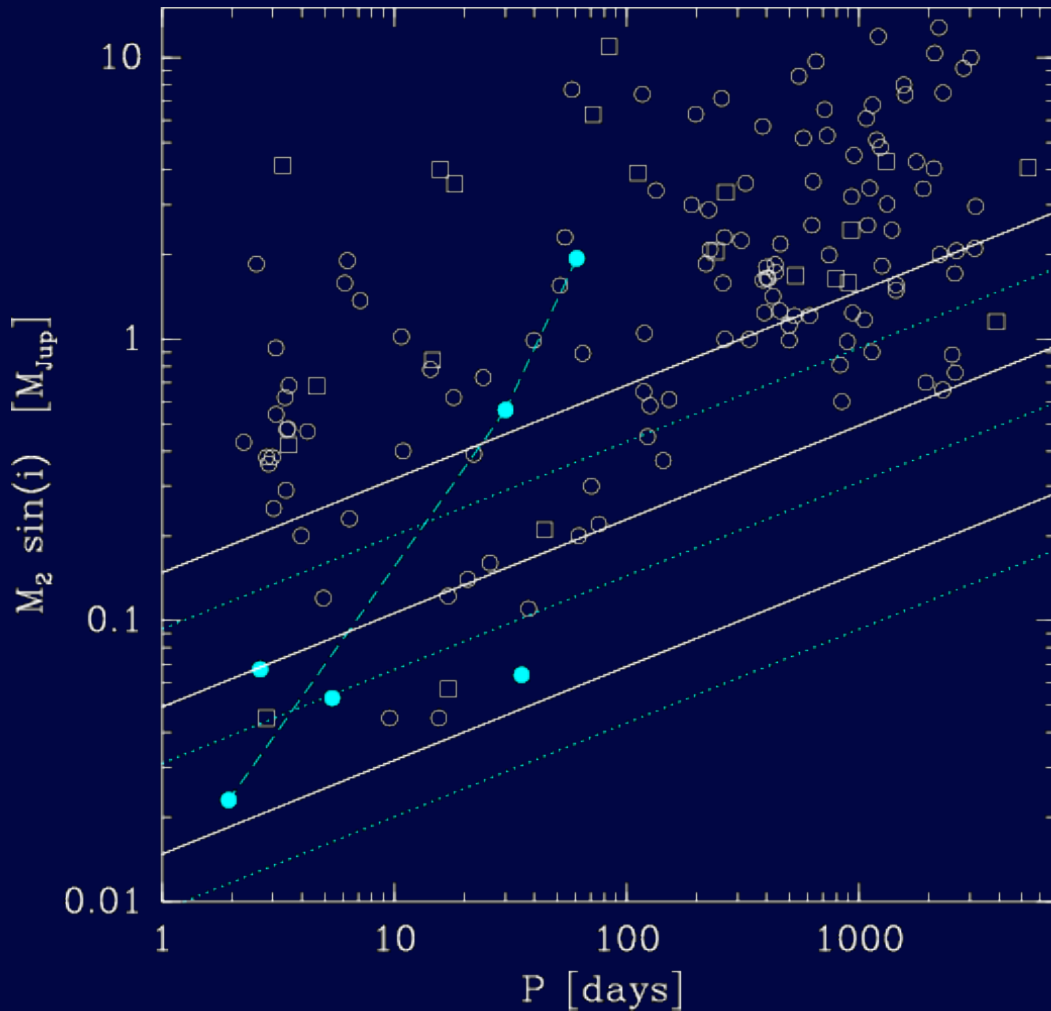


Aujourd'hui :
+2 nouvelles planètes !

= 4 naines M à planètes

= 6 planètes

Les programmes : III.2 Planètes et imposteurs



- planètes autour des naines FGK (découvertes par vitesses radiales)
- planètes autour des naines M

	Gl 581	Harps-3
$m_2 \sin i$	16.6 M_{\oplus}	18 M_{\oplus}
P	5.4 jrs	35 jrs
e	0. (fix)	0.28
ω	0. (fix)	182°
K	13.2 m/s	6 m/s
a	0.041 AU	0.18 AU

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

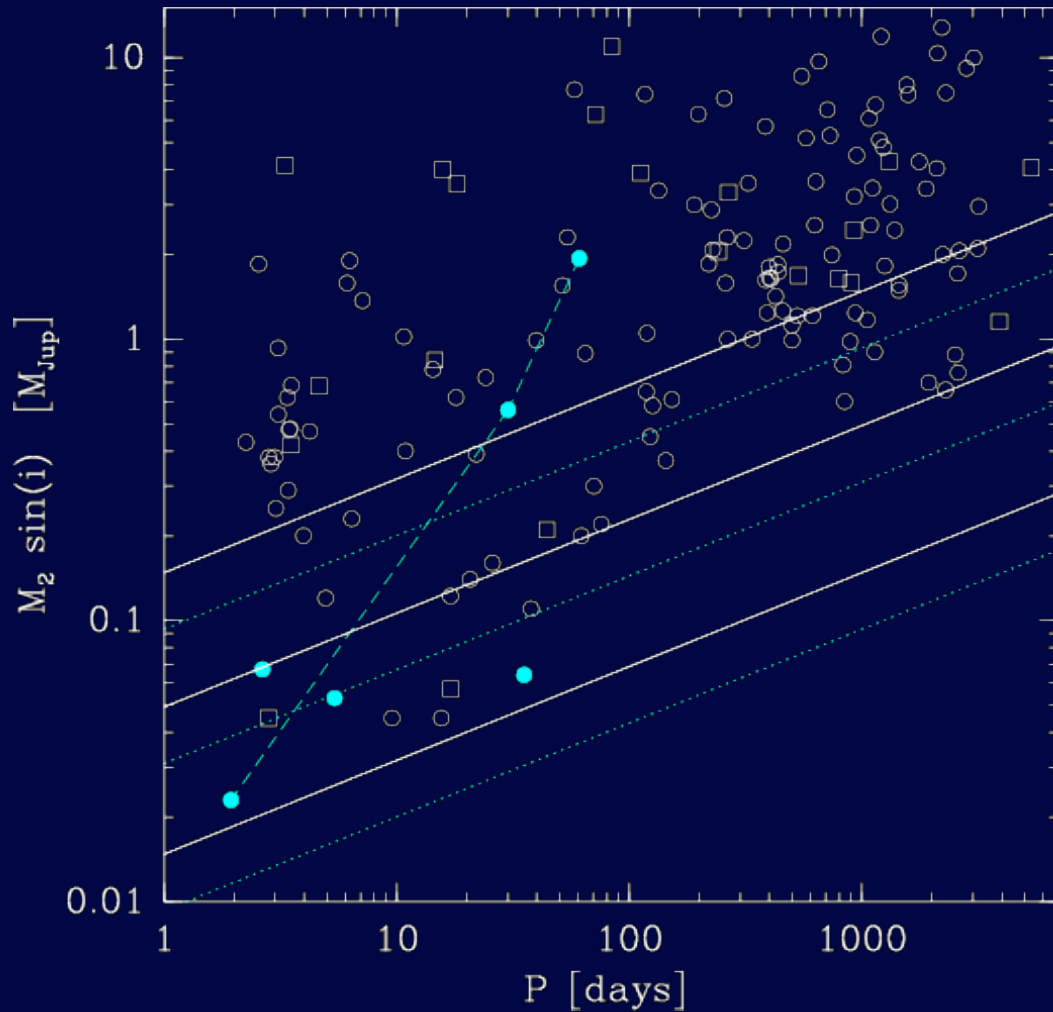
1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives



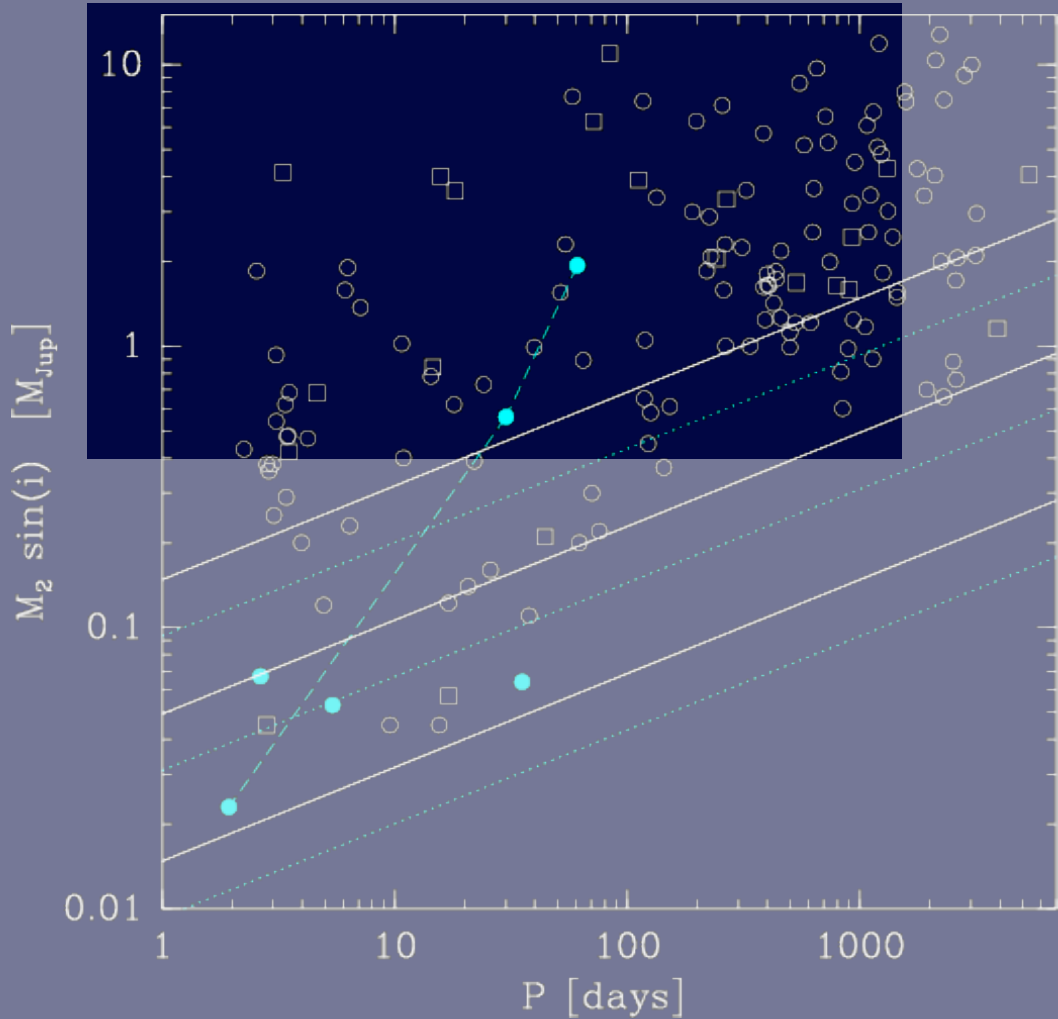
- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



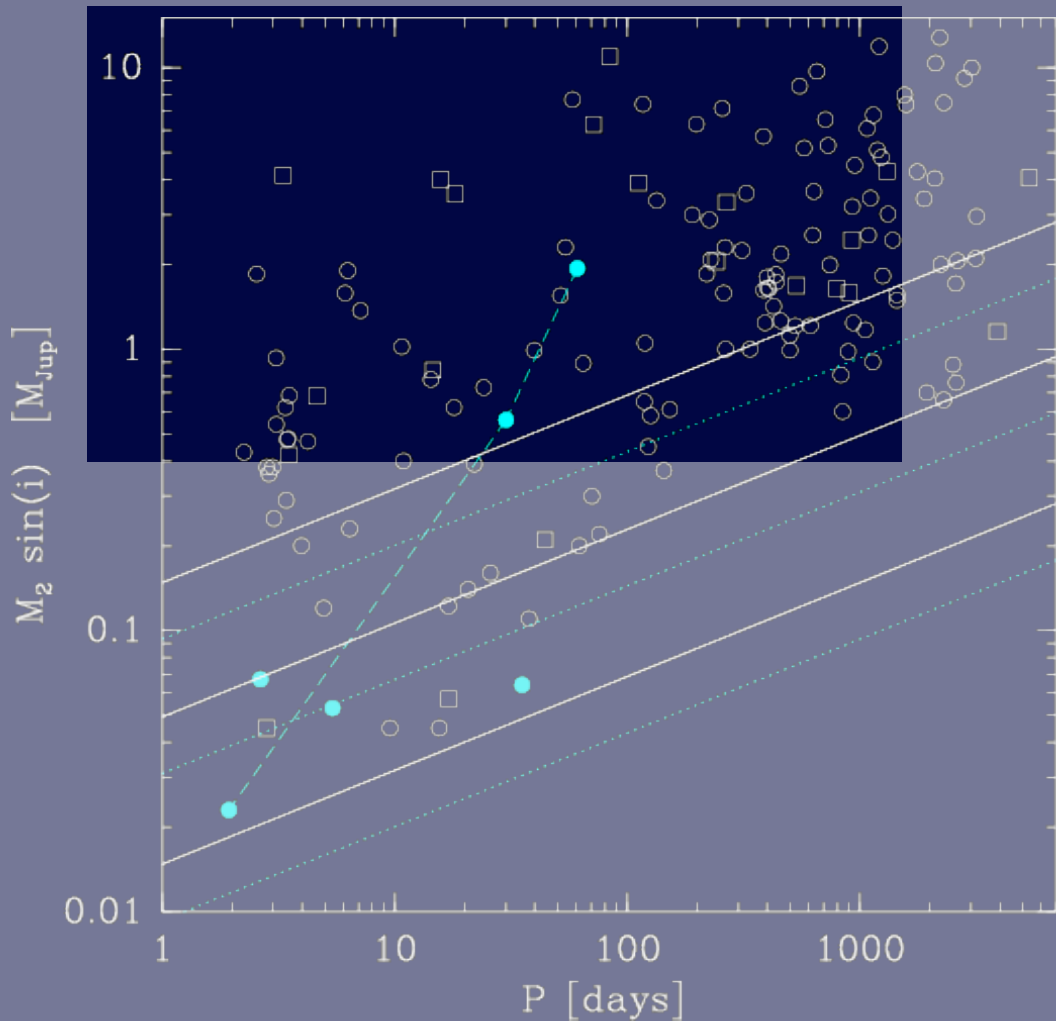
- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire

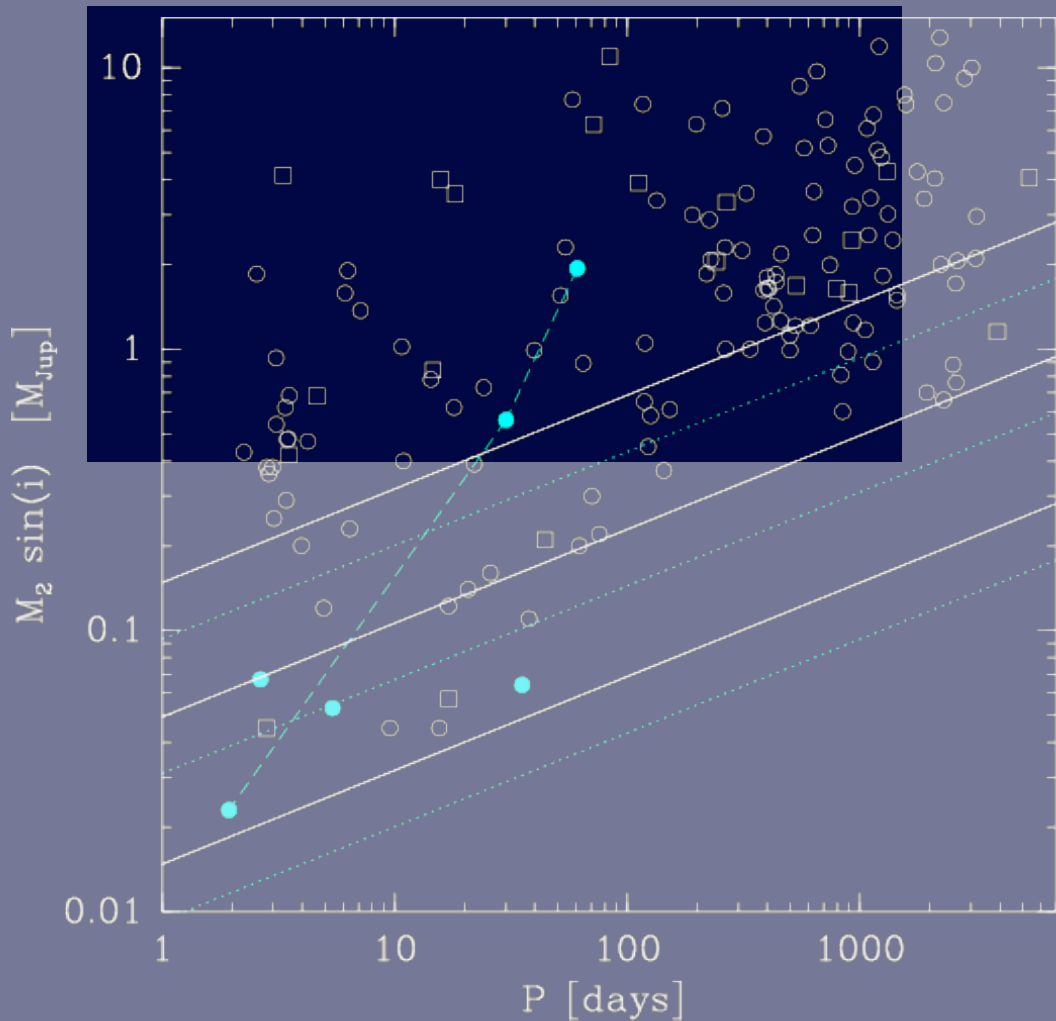


FGK : ~1% ont un Jupiter chaud, 4-5% ont au moins une planète massive (e.g. : Naef et al. 2005)

- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



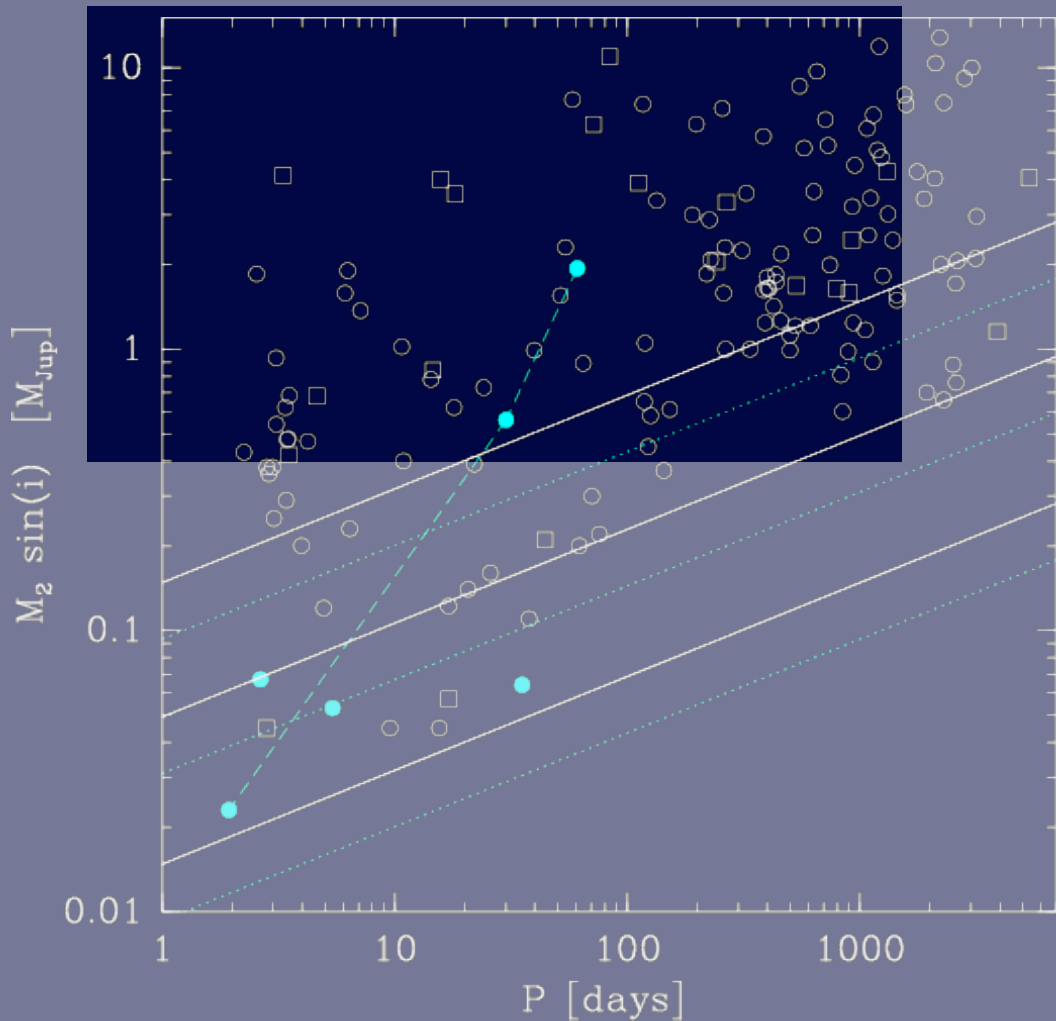
FGK : ~1% ont un Jupiter chaud, 4-5% ont au moins une planète massive (e.g. : Naef et al. 2005)

M : 0 Jupiter chaud, 1 seul système avec des planètes massives (Gl876)
200-300 naines M observées

- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



FGK : ~1% ont un Jupiter chaud, 4-5% ont au moins une planète massive (e.g. : Naef et al. 2005)

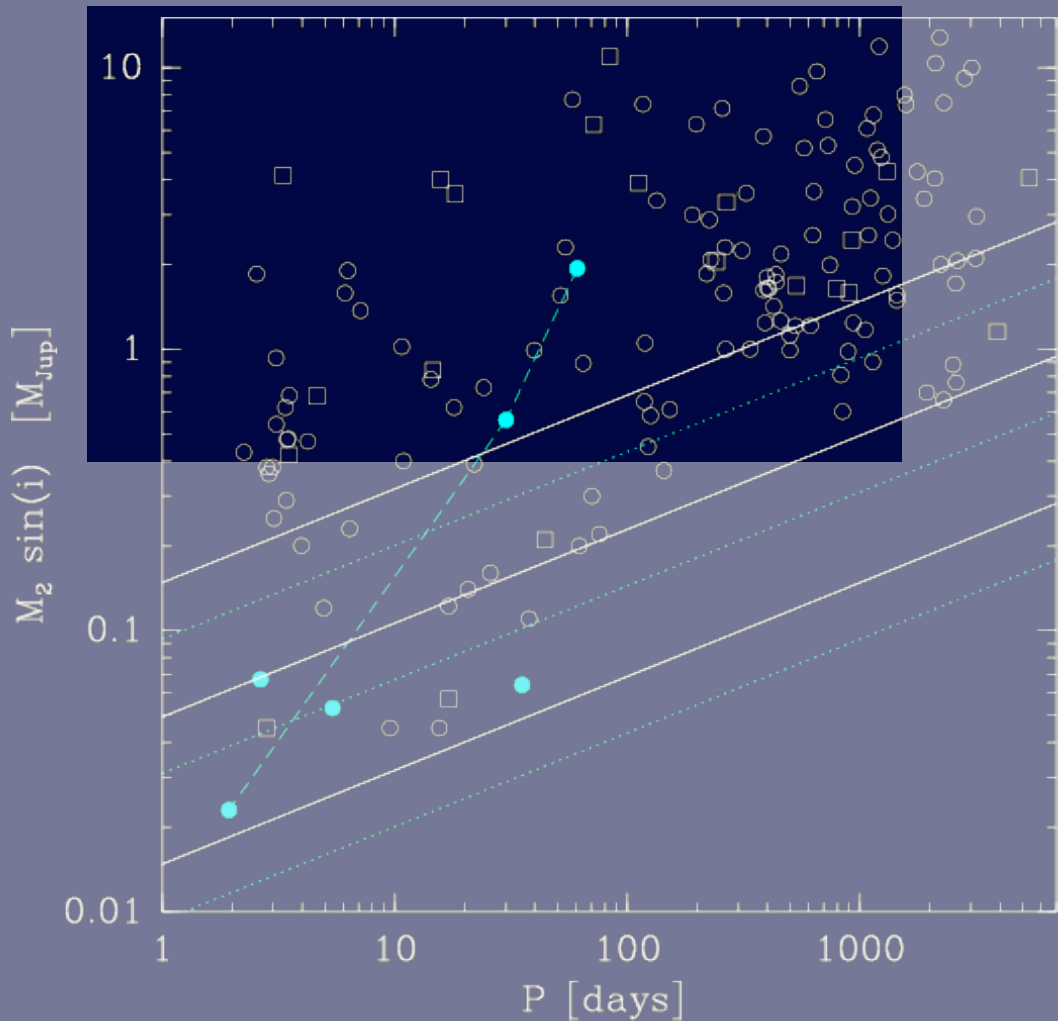
M : 0 Jupiter chaud, 1 seul système avec des planètes massives (Gl876)
200-300 naines M observées

$$P(d=1, N=200; f=0.04) < 10^{-5}$$

- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



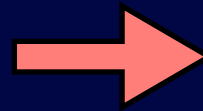
- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



FGK : ~1% ont un Jupiter chaud, 4-5% ont au moins une planète massive (e.g. : Naef et al. 2005)

M : 0 Jupiter chaud, 1 seul système avec des planètes massives (Gl876)
200-300 naines M observées

$$P(d=1, N=200; f=0.04) < 10^{-5}$$

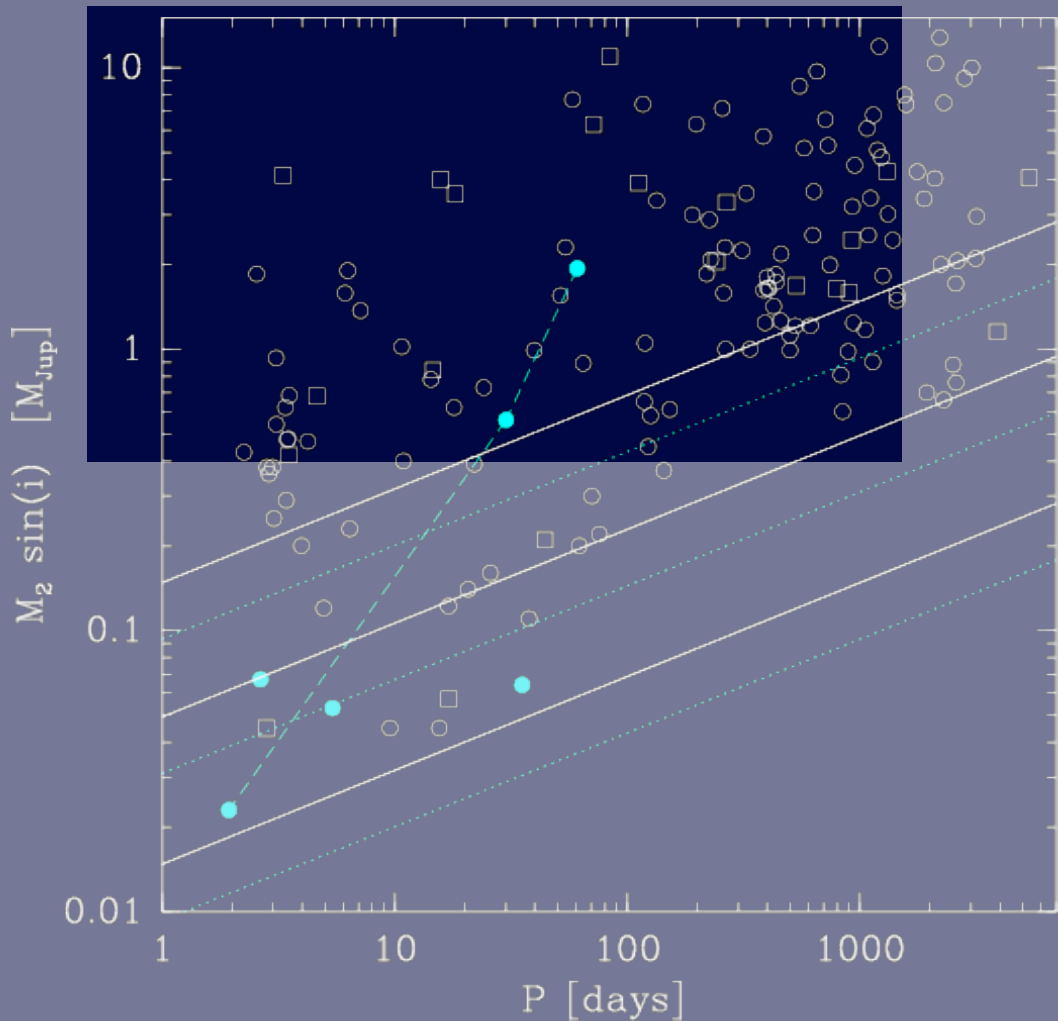


Déficit de planètes massives
autour des naines M

- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M



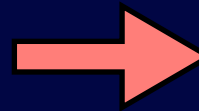
- fréquence de planètes (M, P) ?
 - principalement pour les planètes massives
- comparaison avec les étoiles de type solaire



FGK : ~1% ont un Jupiter chaud, 4-5% ont au moins une planète massive (e.g. : Naef et al. 2005)

M : 0 Jupiter chaud, 1 seul système avec des planètes massives (Gl876)
200-300 naines M observées

$$P(d=1, N=200; f=0.04) < 10^{-5}$$



Déficit de planètes massives autour des naines M

Mais ...

① ≠ études pas homogènes

② effets non-idéaux :

- échantillonnage temporel obs.
- activité stellaire

- planètes autour des naines FGK
- planètes autour des naines M

But

→ déterminer la fréquence de naines M avec planètes compte tenu des biais d'observation

- nombre min. de planètes géantes dans l'échantillon
 - = le nombre de détection !
- nombre max. de planètes géantes dans l'échantillon
 - compte tenu des mesures peut-on exclure que les étoiles observées cachent encore des planètes géantes ?

Méthode

- on adjoint des planètes fictives aux étoiles de nos échantillons
- on calcule les vitesses radiales induites
- on compare la dispersion des vitesses ainsi simulées avec la dispersion des vitesses observées
- si la dispersion des vitesses simulées $>$ dispersion observée : la planète simulée n'existe pas

Echantillon

- HARPS + ELODIE = 112
- Gl 876 et Gl 581 sont considérées à part

rms (obs) = 9 m/s

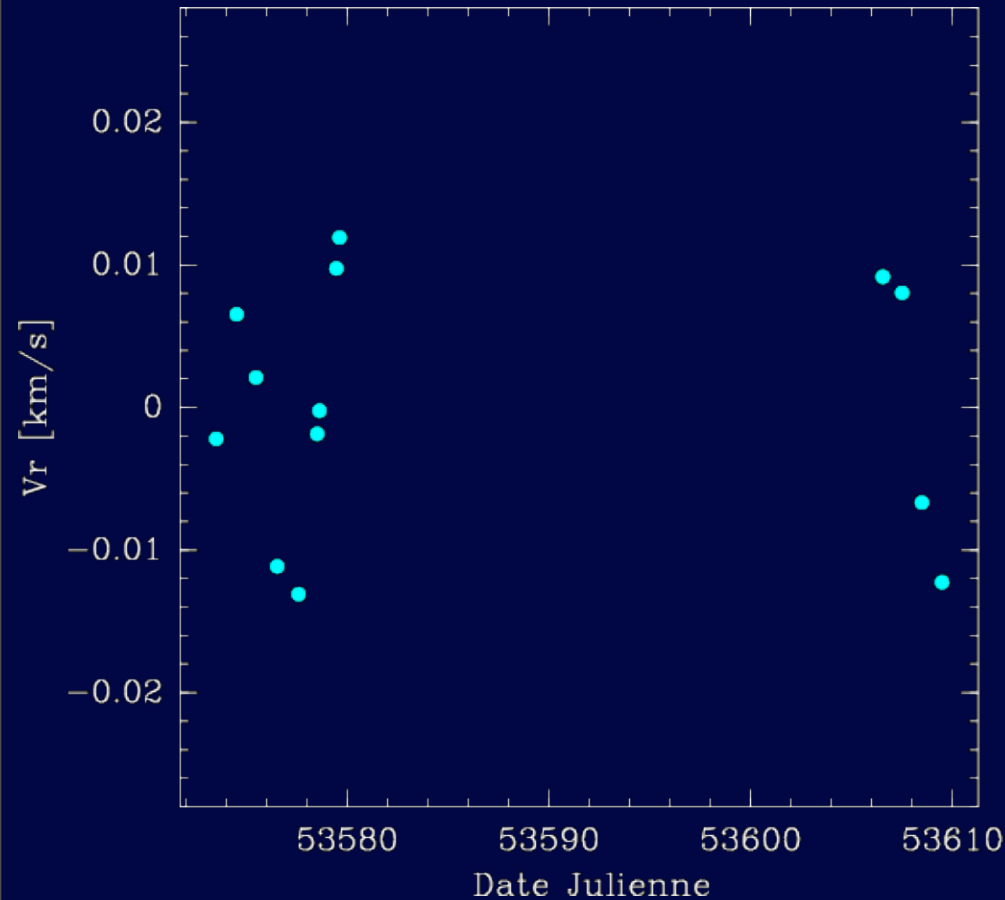
rms (sim) = 19 m/s

→ vr simulées produisent une dispersion plus grande que vr observées

→ la planète hypothétique n'existe pas autour de l'étoile considérée

Mais ...

- les observations sont entachées d'erreurs (bruit de photon)
- besoin de générer de nombreuses réalisations



rms (obs) = 9 m/s

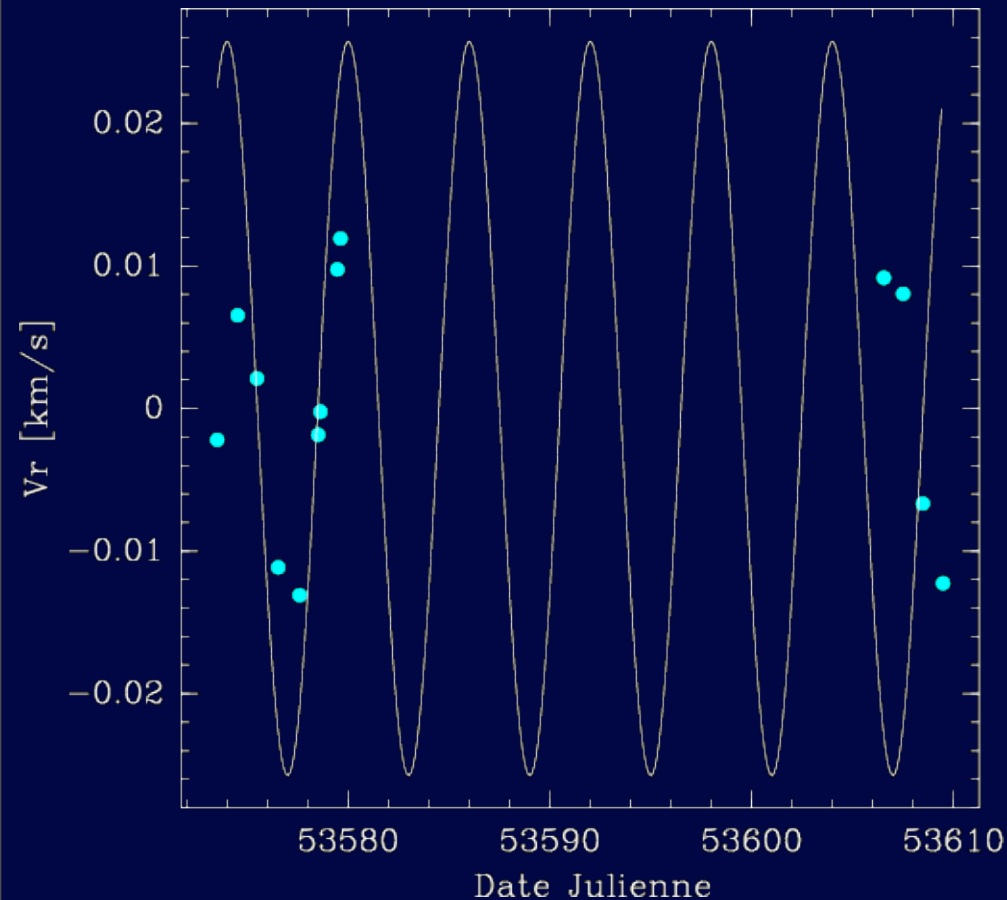
rms (sim) = 19 m/s

→ vr simulées produisent une dispersion plus grande que vr observées

→ la planète hypothétique n'existe pas autour de l'étoile considérée

Mais ...

- les observations sont entachées d'erreurs (bruit de photon)
- besoin de générer de nombreuses réalisations



rms (obs) = 9 m/s

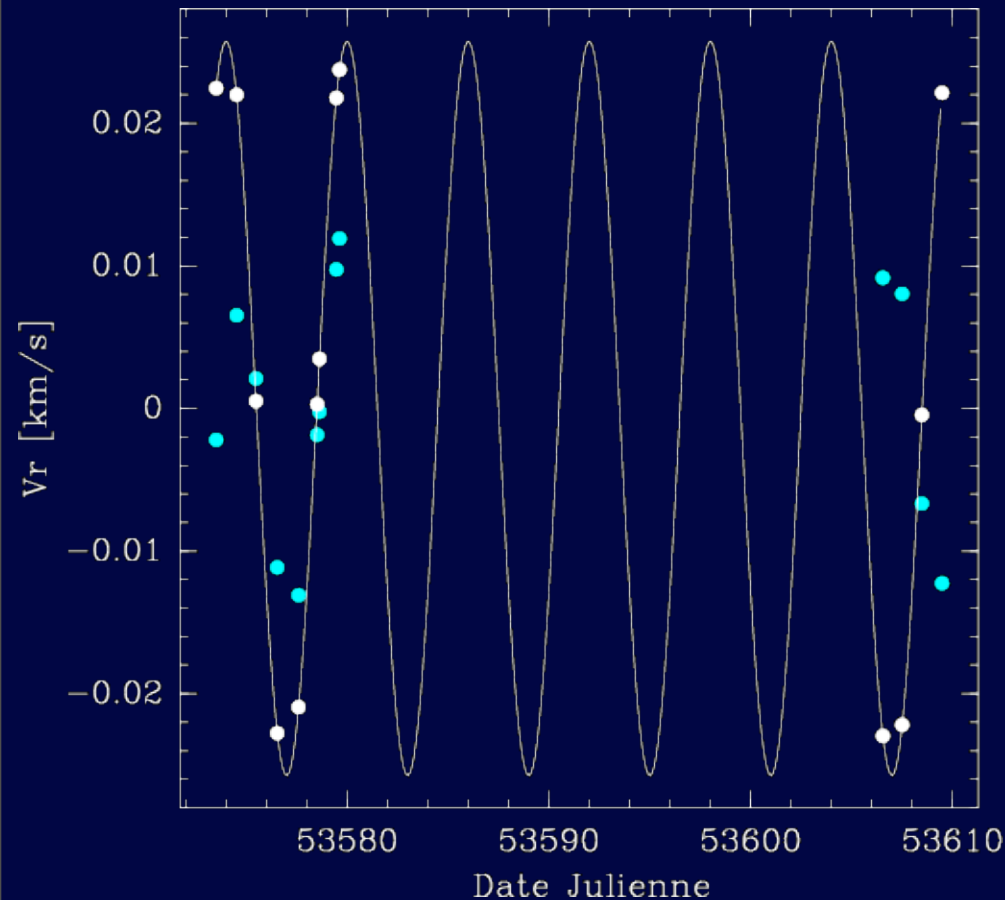
rms (sim) = 19 m/s

→ vr simulées produisent une dispersion plus grande que vr observées

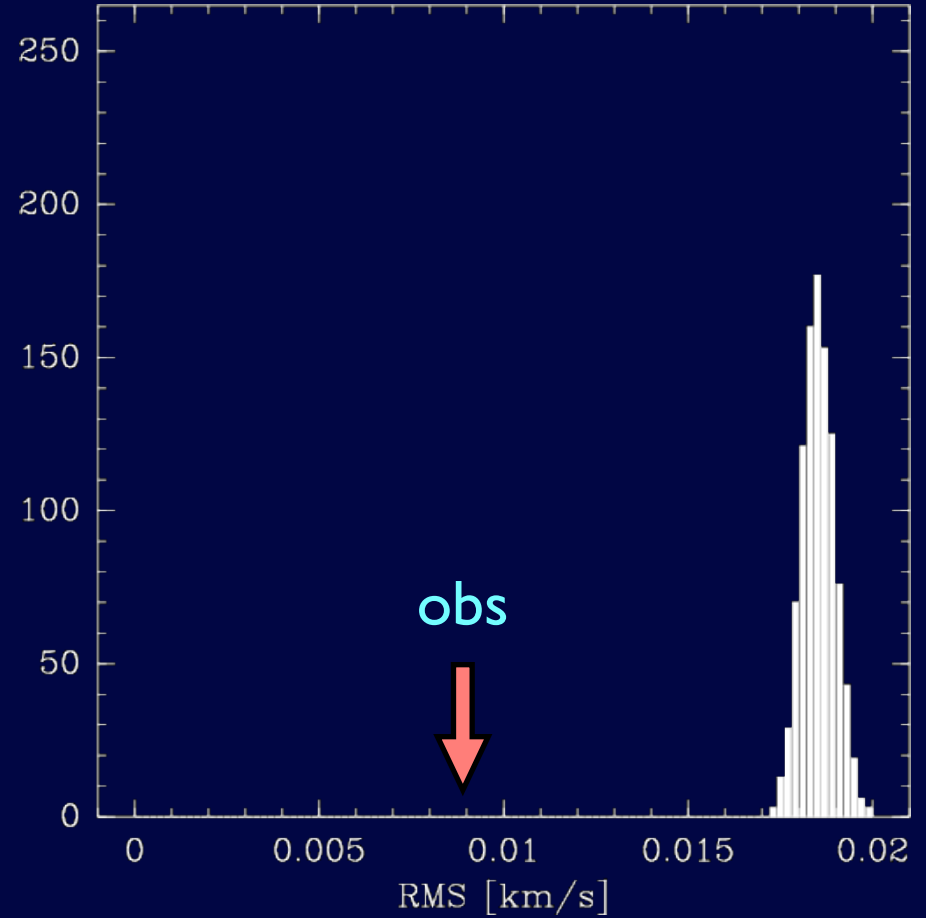
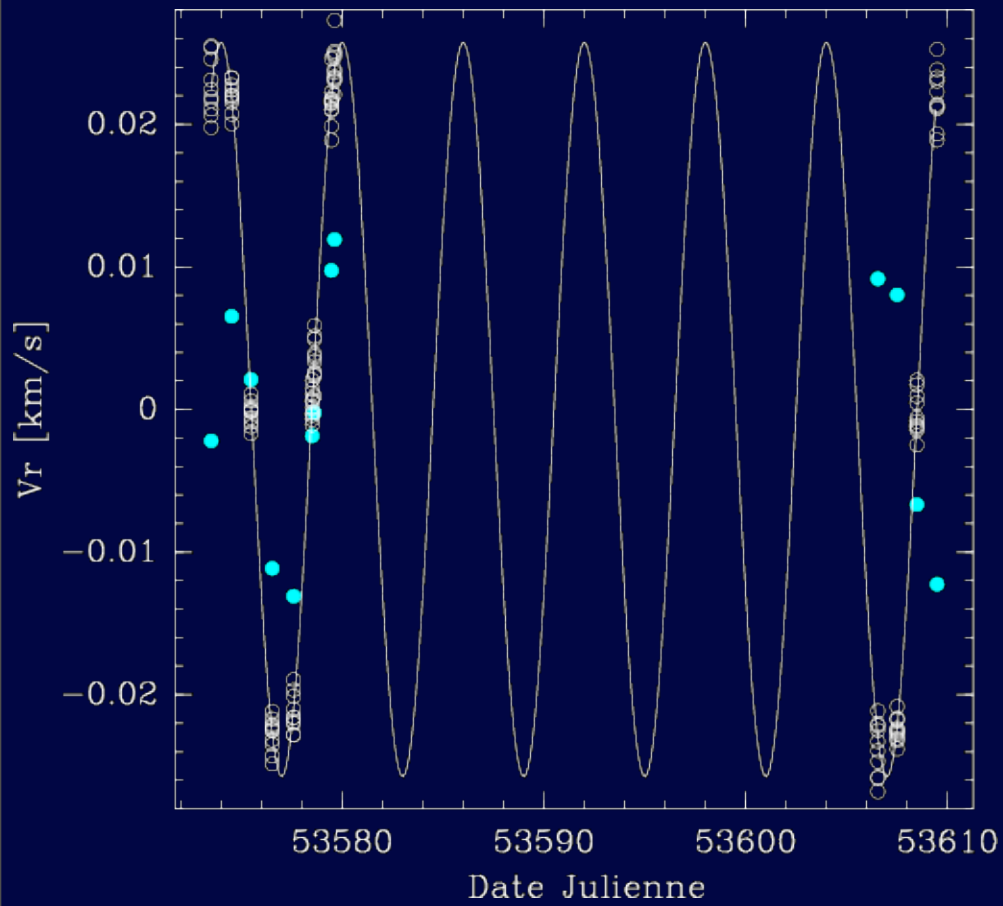
→ la planète hypothétique n'existe pas autour de l'étoile considérée

Mais ...

- les observations sont entachées d'erreurs (bruit de photon)
- besoin de générer de nombreuses réalisations

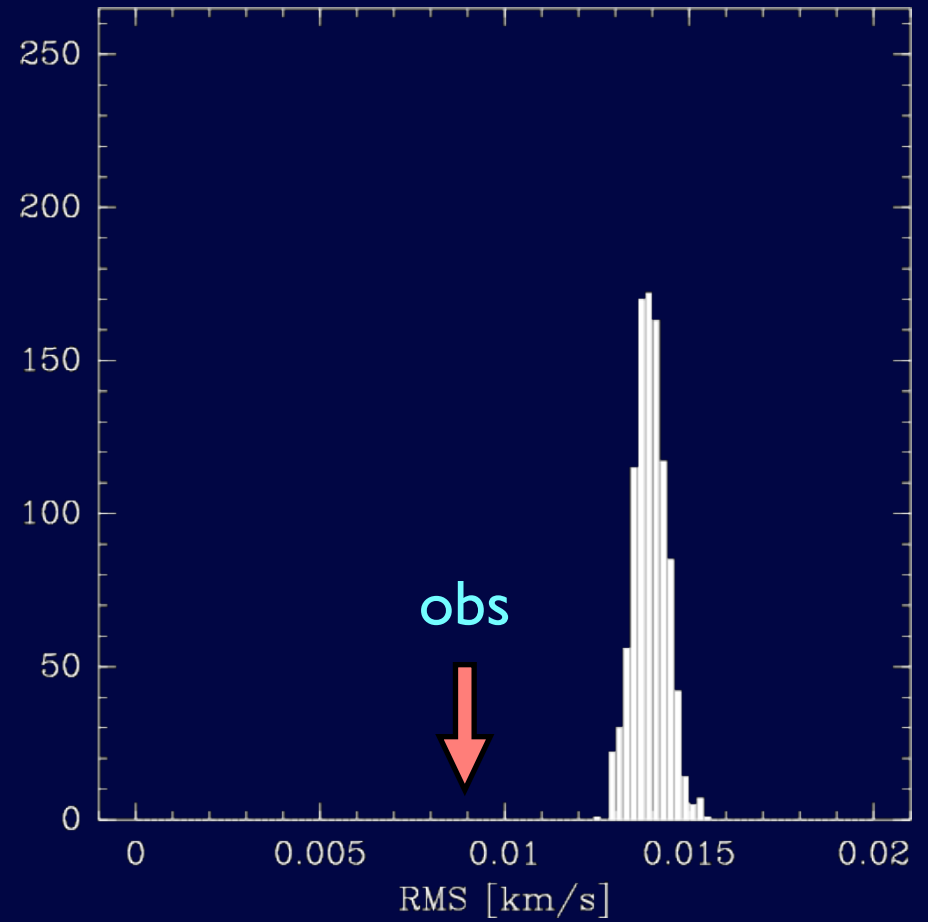
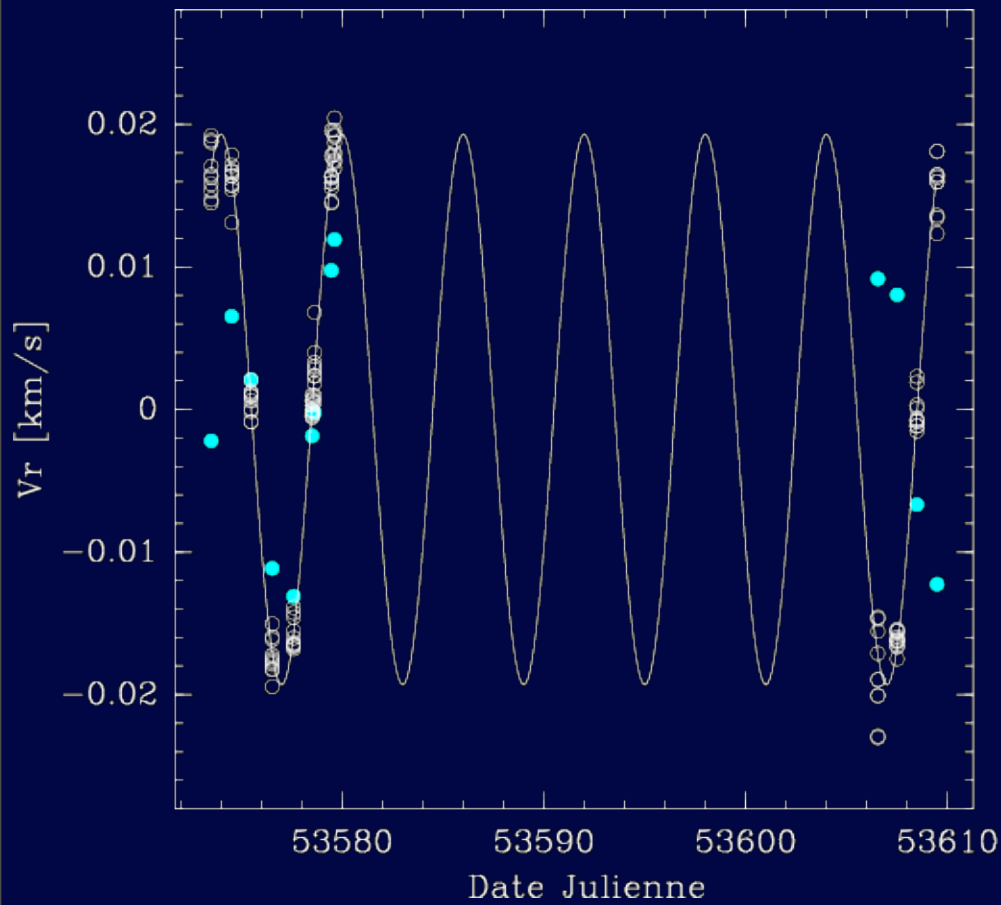


$$M_p = 0.1 M_{\text{jup}} = 32 M_{\oplus}$$



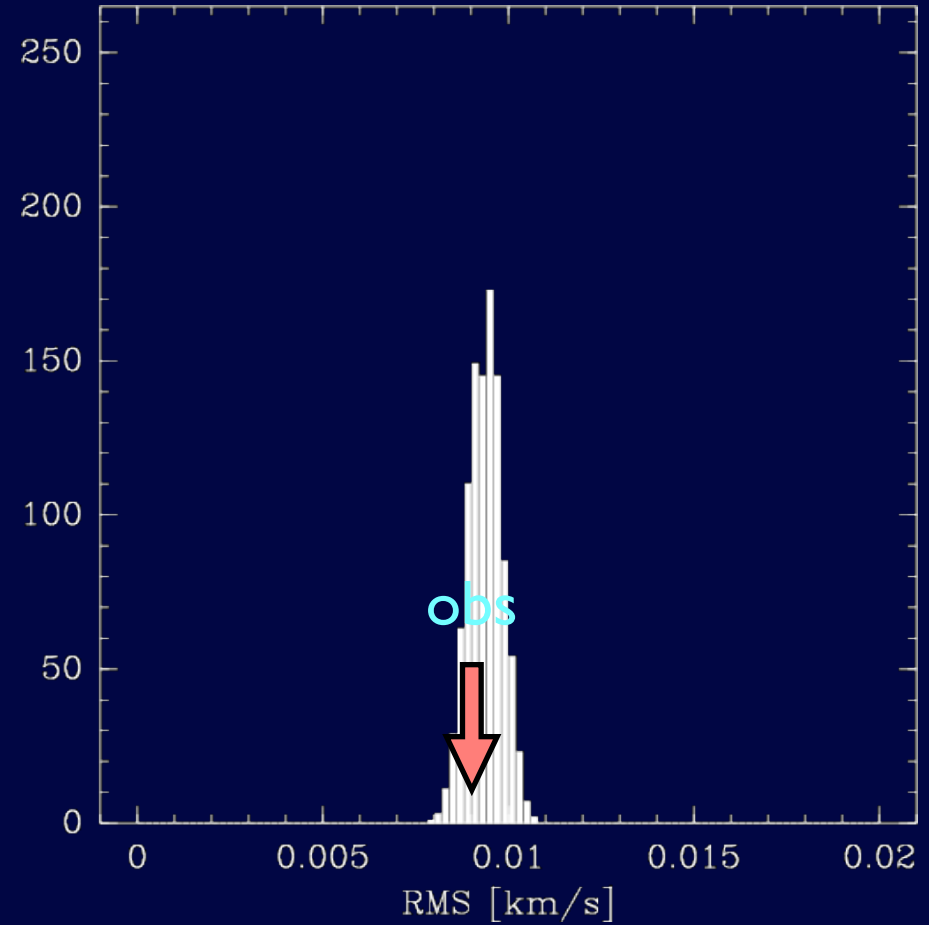
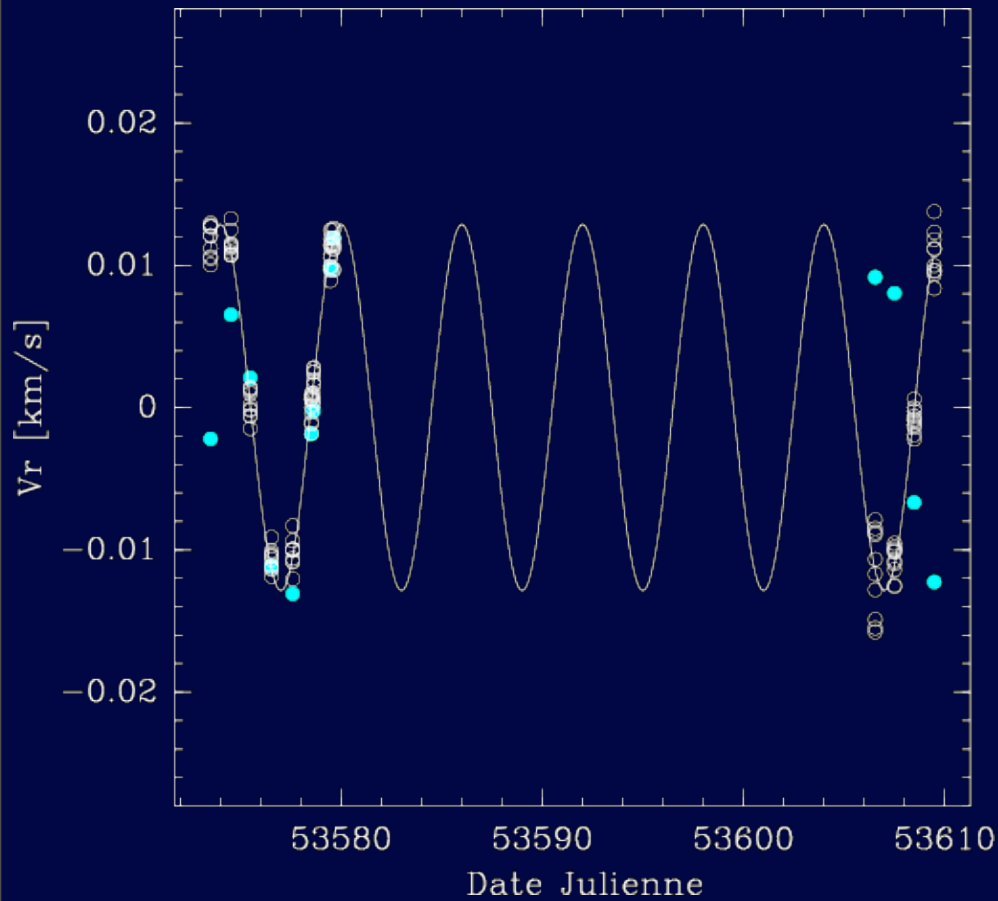
→ on peut exclure qu'une planète de $32 M_{\oplus}$ orbite cette étoile

$$M_p = 0.075 M_{\text{jup}} = 24 M_{\oplus}$$



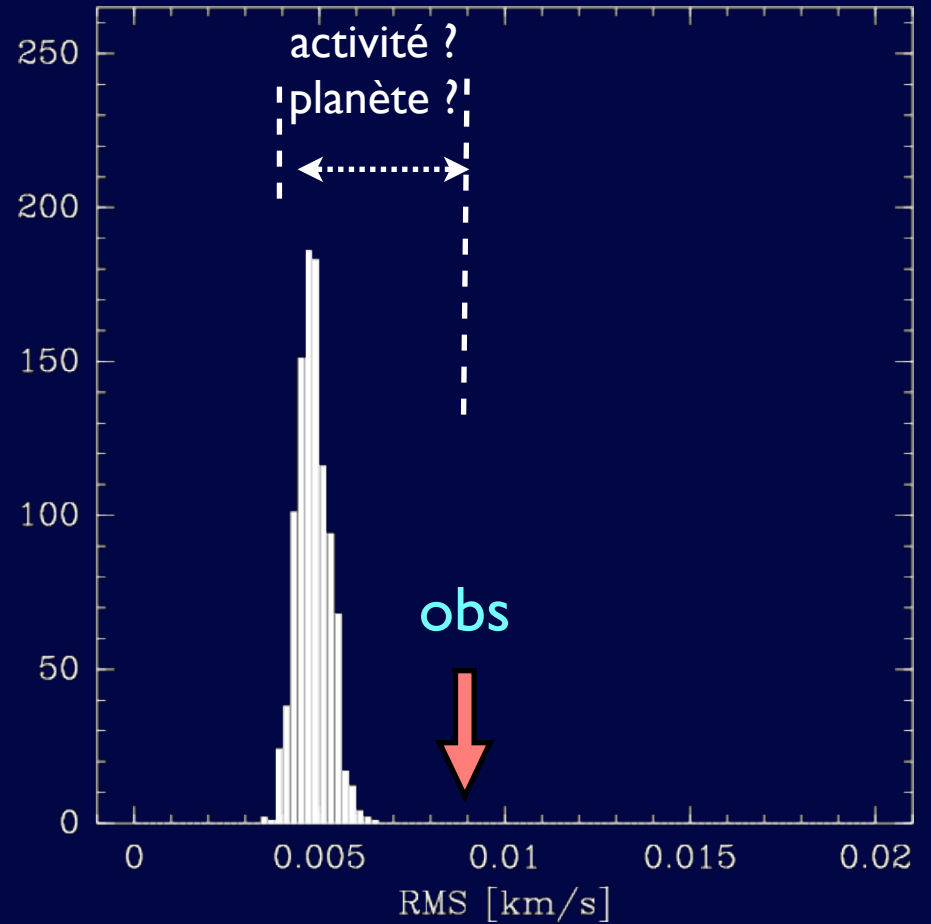
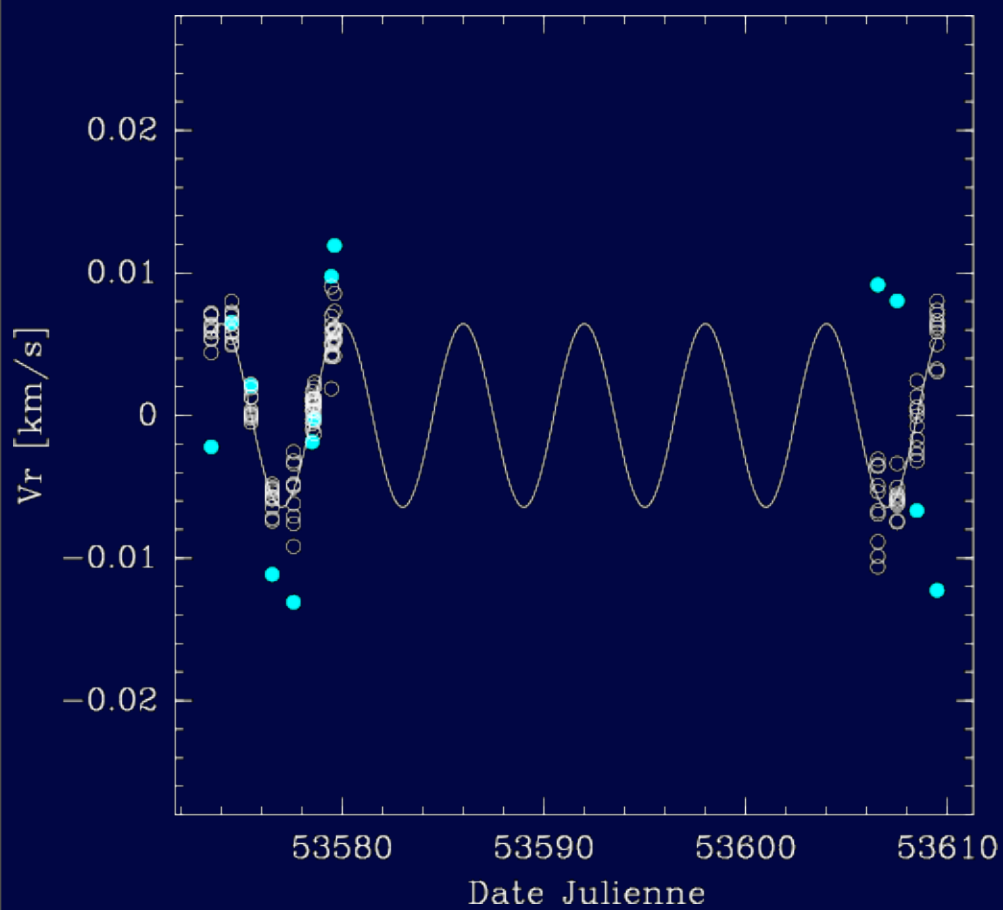
→ on peut exclure qu'une planète de $24 M_{\oplus}$ orbite cette étoile

$$M_p = 0.05 M_{\text{jup}} = 16 M_{\oplus}$$



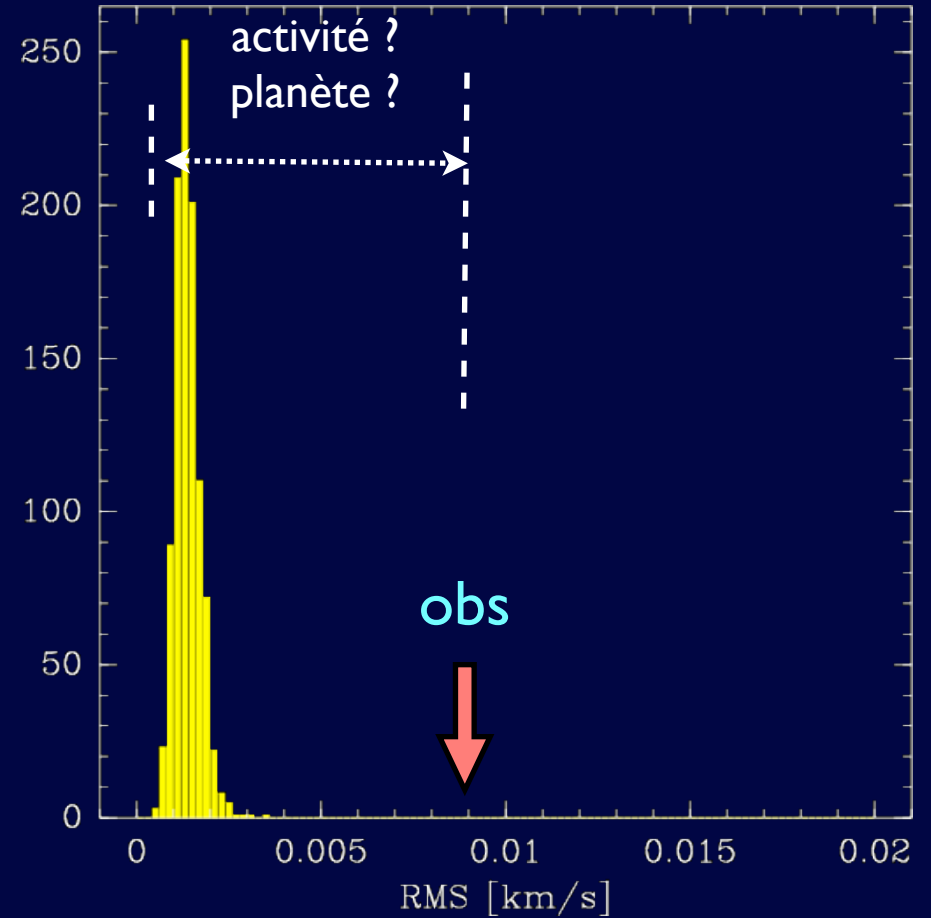
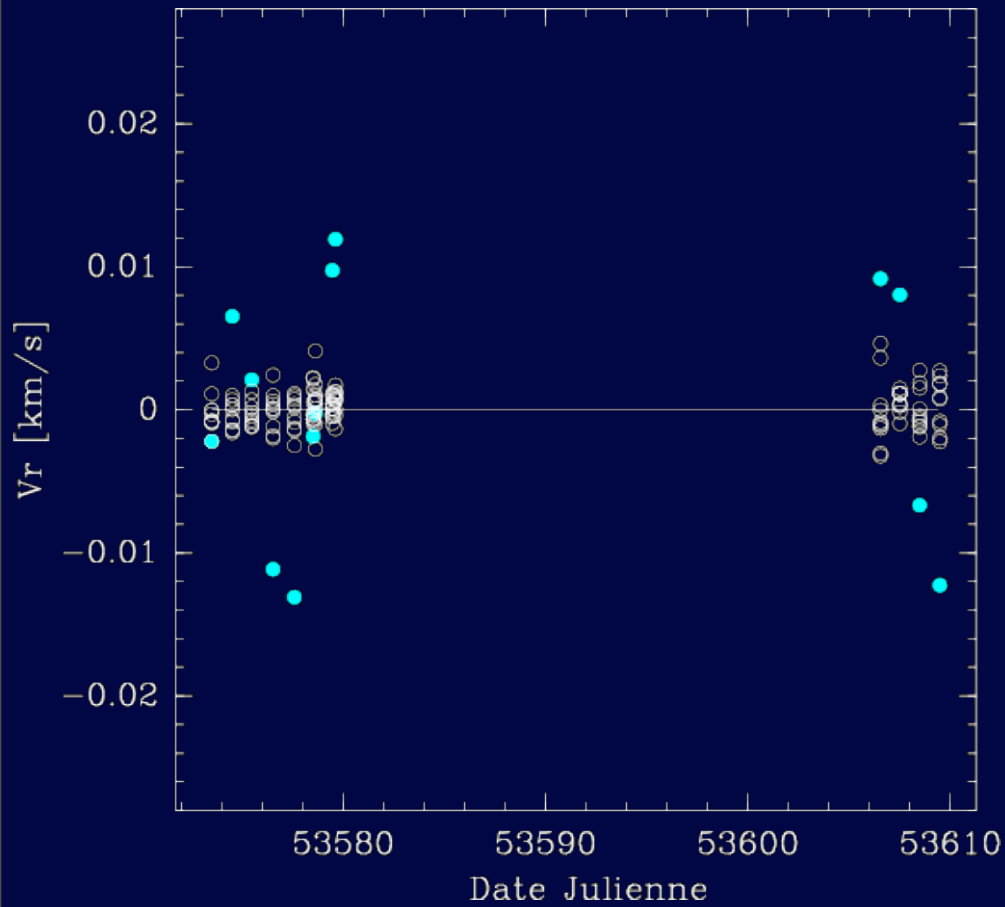
- pour $\frac{3}{4}$ des réalisations on peut exclure qu'une planète de $16 M_{\oplus}$ orbite cette étoile
- pour $\frac{1}{4}$ des réalisations on ne peut pas exclure qu'une planète de $16 M_{\oplus}$ orbite cette étoile

$$M_p = 0.025 M_{\text{jup}} = 8 M_{\oplus}$$



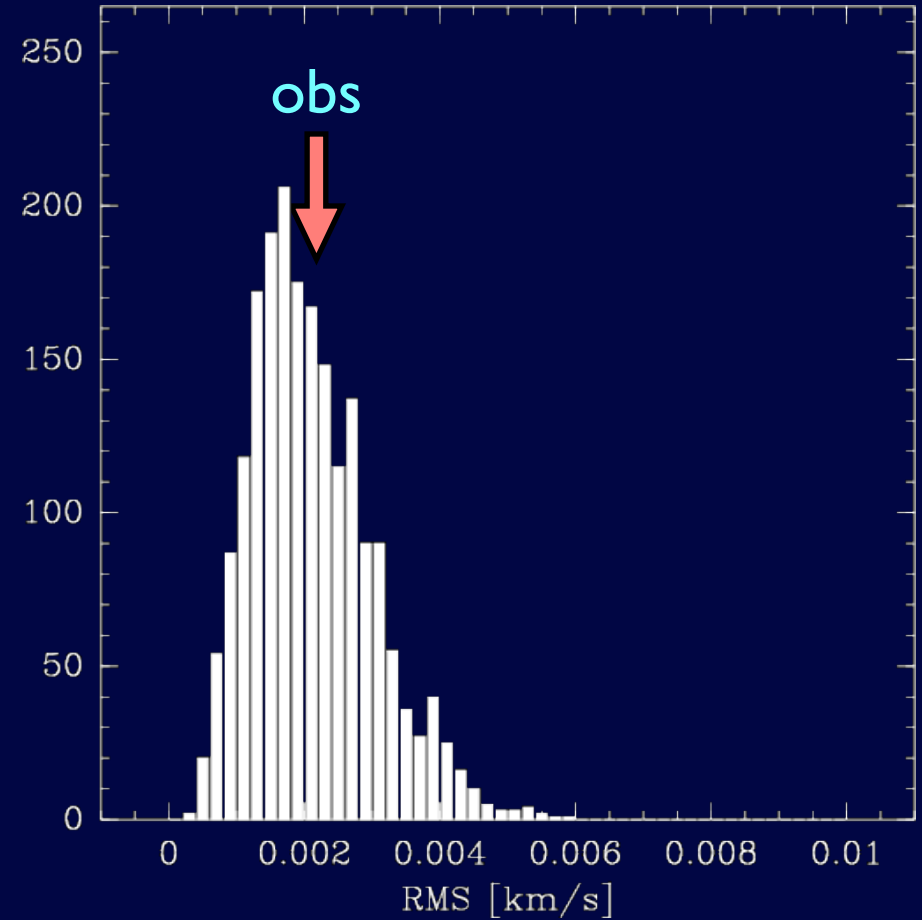
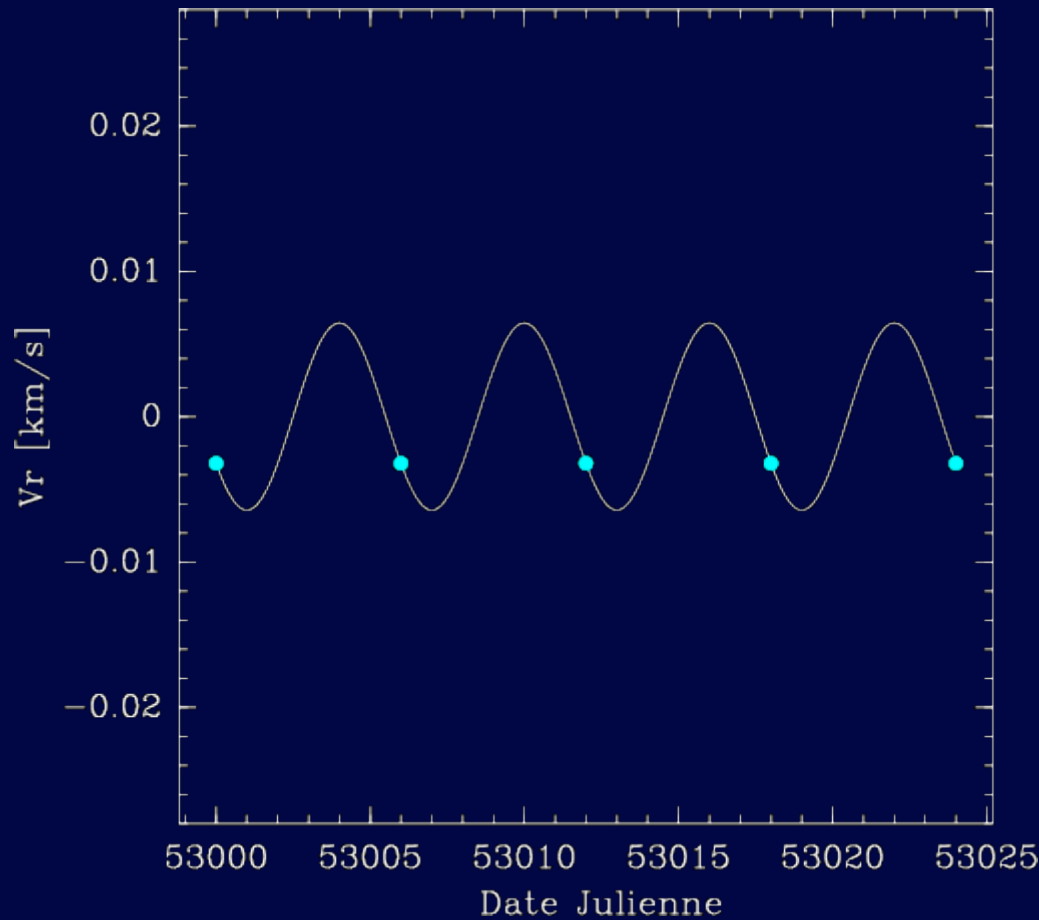
→ on ne peut pas exclure qu'une planète de $8 M_{\oplus}$ orbite cette étoile

$$M_p = 0. \quad M_{\text{jup}} = 0 \quad M_{\oplus}$$



Etoile pourtant variable. Activité ou planètes ? Il faut mettre en évidence le signal et appliquer nos diagnostics !

Le cas du mauvais échantillonnage



Les dispersions simulées correspondent seulement aux réalisations du bruit (pas de signal)

Il y a donc 3 cas :

①

on peut exclure la configuration simulée



autour de l'étoile considérée une telle planète n'existe pas



Taux de non-détection

②

on mesure un réel excès de rms (compte tenu des erreurs de mesures)



autour de l'étoile considérée une telle planète existe peut-être



Taux de non-détection

③

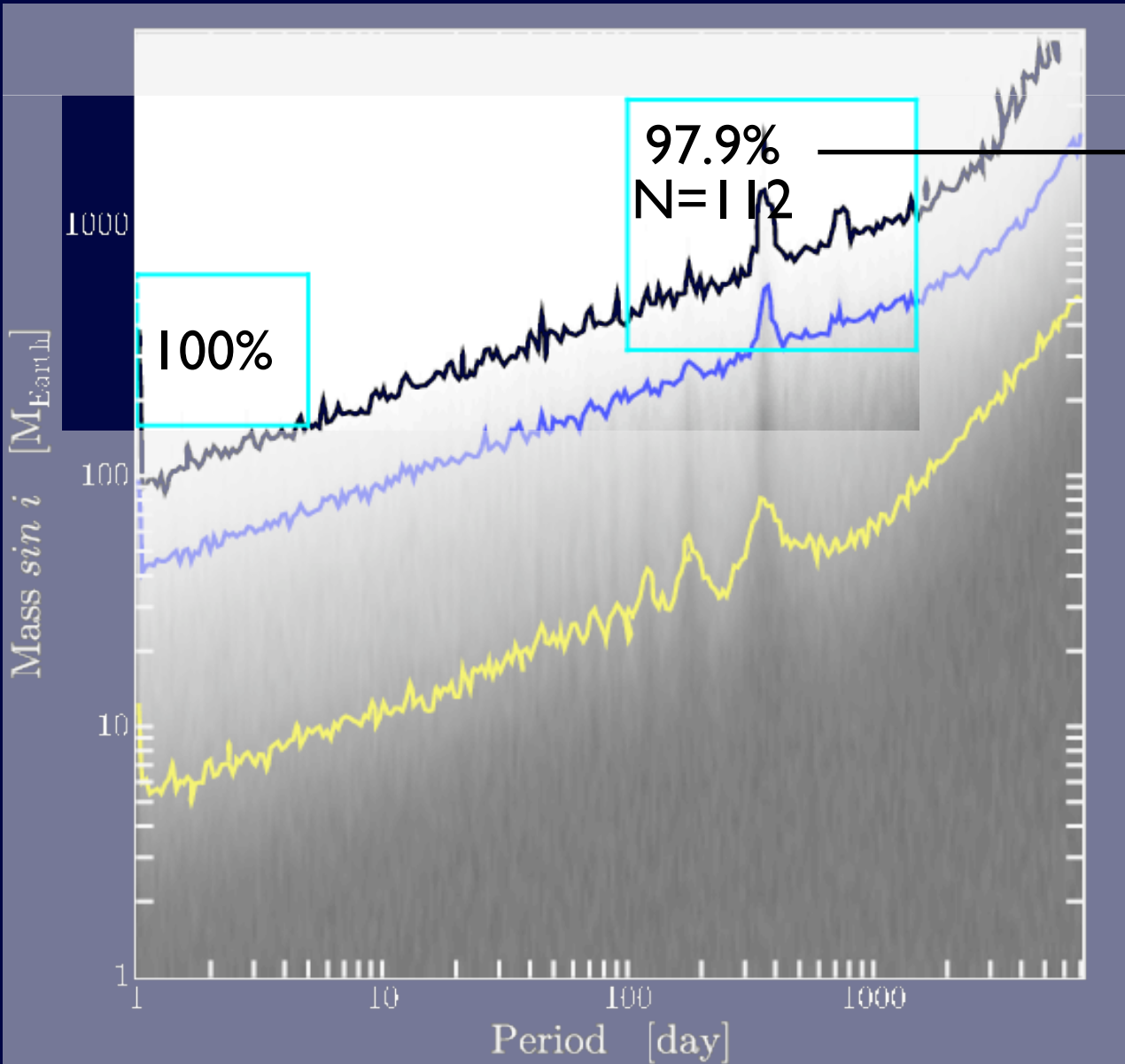
on ne peut rien dire (du fait de l'échantillonnage)



l'efficacité du programme est moindre



Neff



③

permet de différencier les effets non-idéaux liés à l'échantillonnage

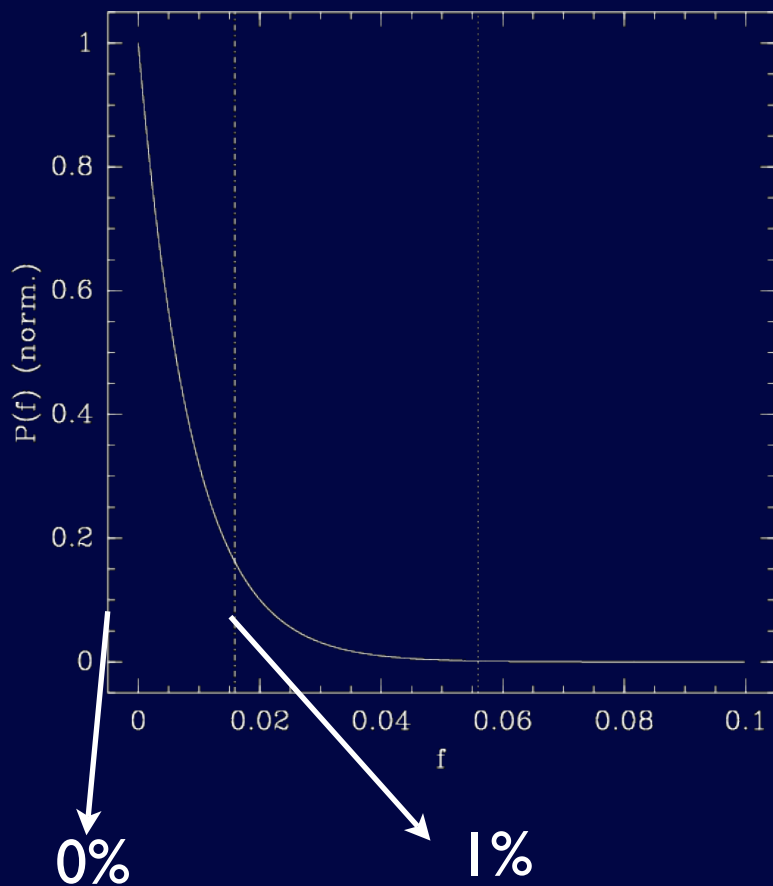
$N_{\text{eff}} = 111.66$
 $\zeta = 99.1\%$



Il reste au max. 1 planète géante

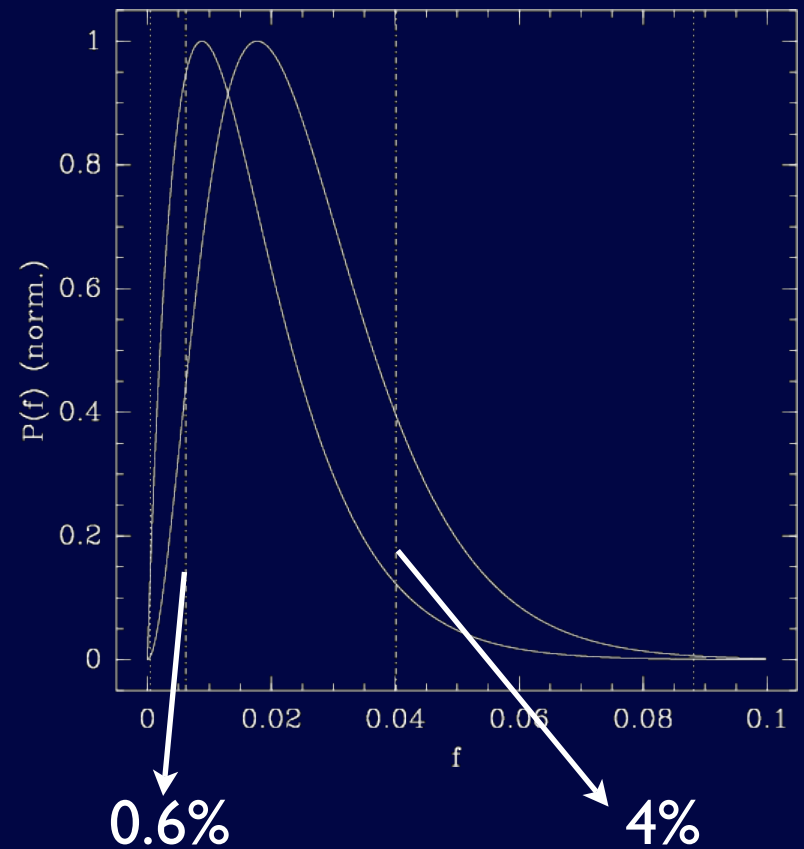
Jupiters chauds

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\min} = 0 \\ N_{\max} = 0 \\ N_{\text{étoiles}} = 114 \end{array} \right.$$



Planètes géantes, $P < 1500$ jours

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\min} = 1 \\ N_{\max} = 2 \\ N_{\text{étoiles}} = 113.66 \end{array} \right.$$



		min	max
M	Jupiters chauds	-	$f < 1\%$
	Géantes à longue période	$f > 0$	$f < 4\%$
	Neptunes	$\sim 3 / 100$	-
FGK	Jupiters chauds	$f \sim 1\%$	
	Géantes à longue période	$f \sim 4-5\%$	



à partir de notre seul échantillon le déficit de planètes géantes est seulement suggestif mais il donne du poids à l'estimation globale

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

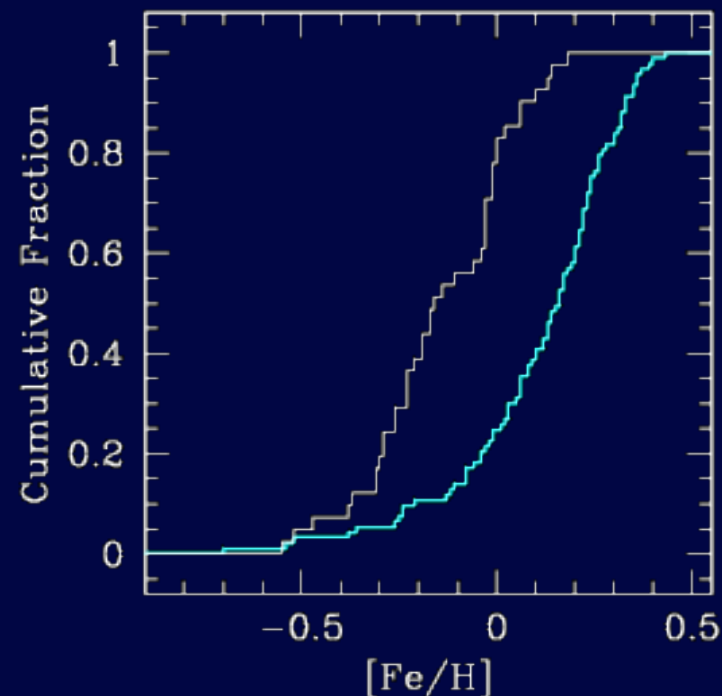
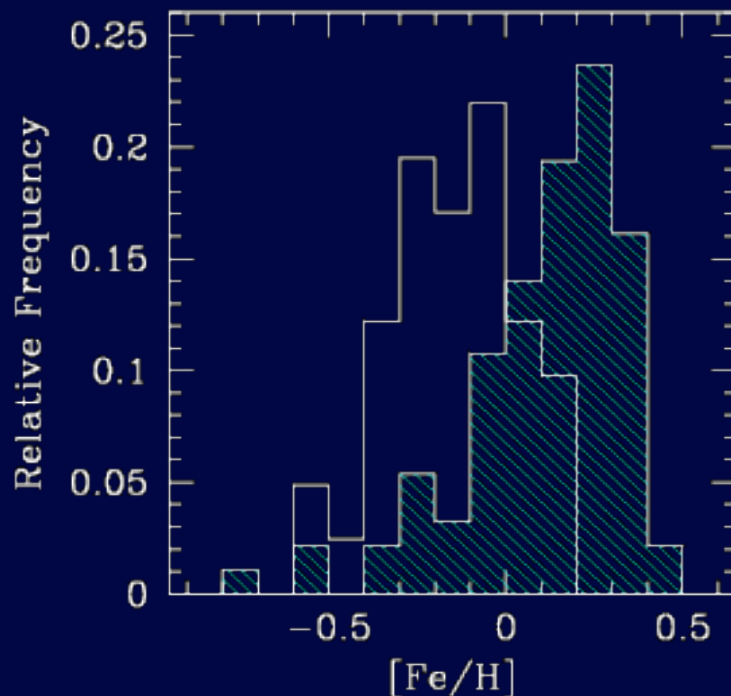
1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

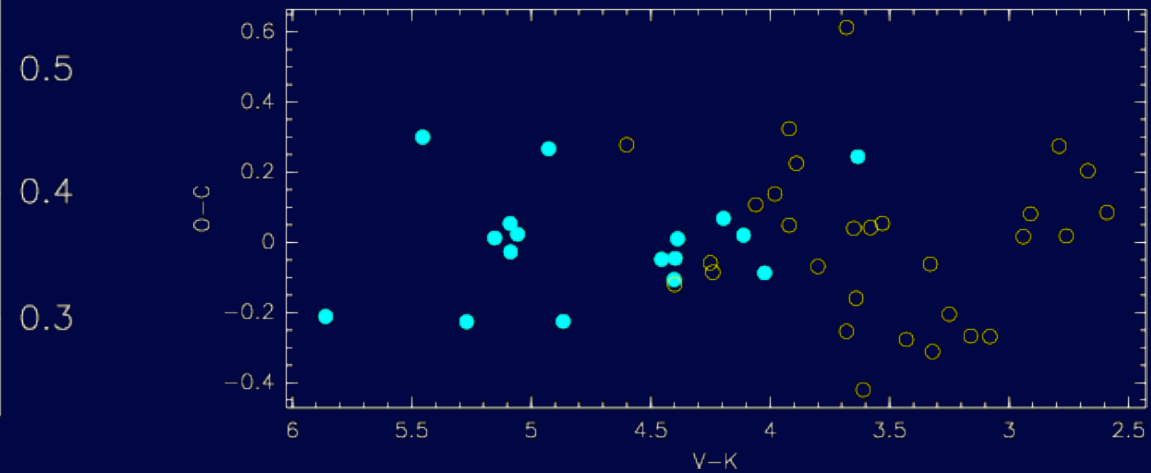
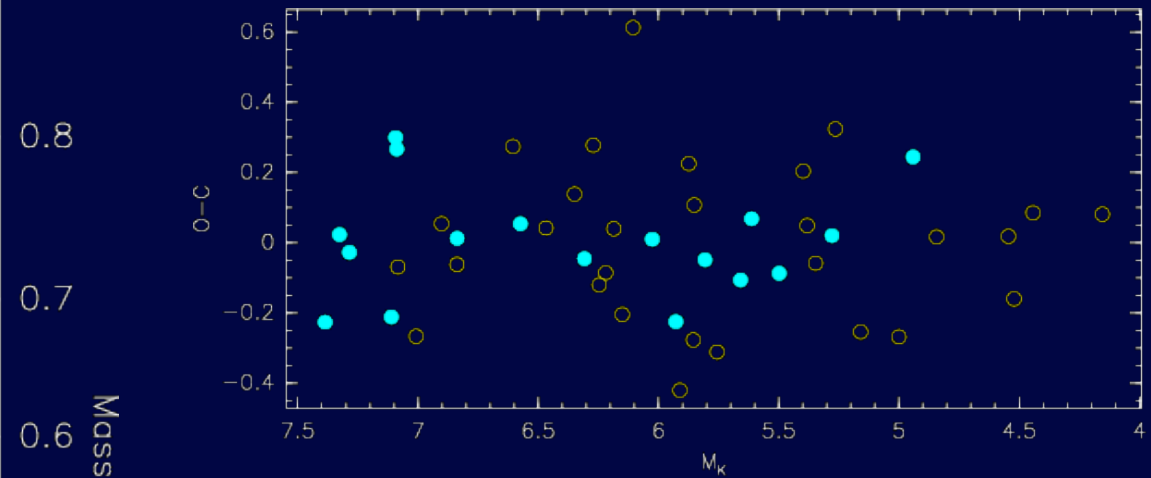
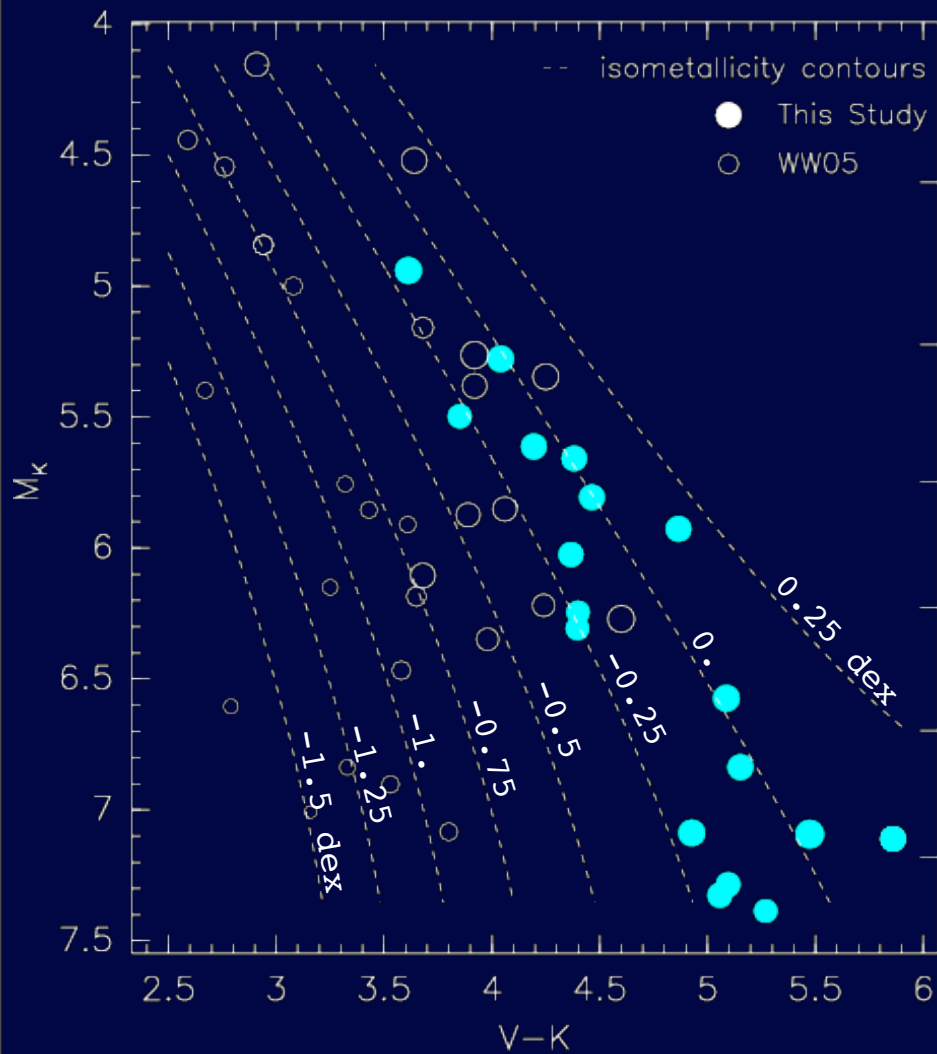
La métallicité : v.1 Métallicité & formation planétaire

- **Les étoiles-à-planètes sont statistiquement plus riches en métaux que les étoiles-sans-planète**
 - observé par Gonzalez (1997) à partir des 4 premières étoiles-à-planètes
 - mais... sujet à caution (échantillons de comparaison biaisés)
 - étude non biaisée de Santos et al (2001) confirme cette excès
 - aujourd'hui : propriété communément admise (Gonzalez 2003; Santos et al. 2004; ...; Fisher & Valenti 2005;...)
- **Scénarios**
 - pollution
 - primordiale (composition chimique originelle)
- **Intérêts pour les M**
 - est-ce vrai pour les étoiles de très faible masse ?
 - différentier l'effet de métallicité de l'effet de la masse de la primaire



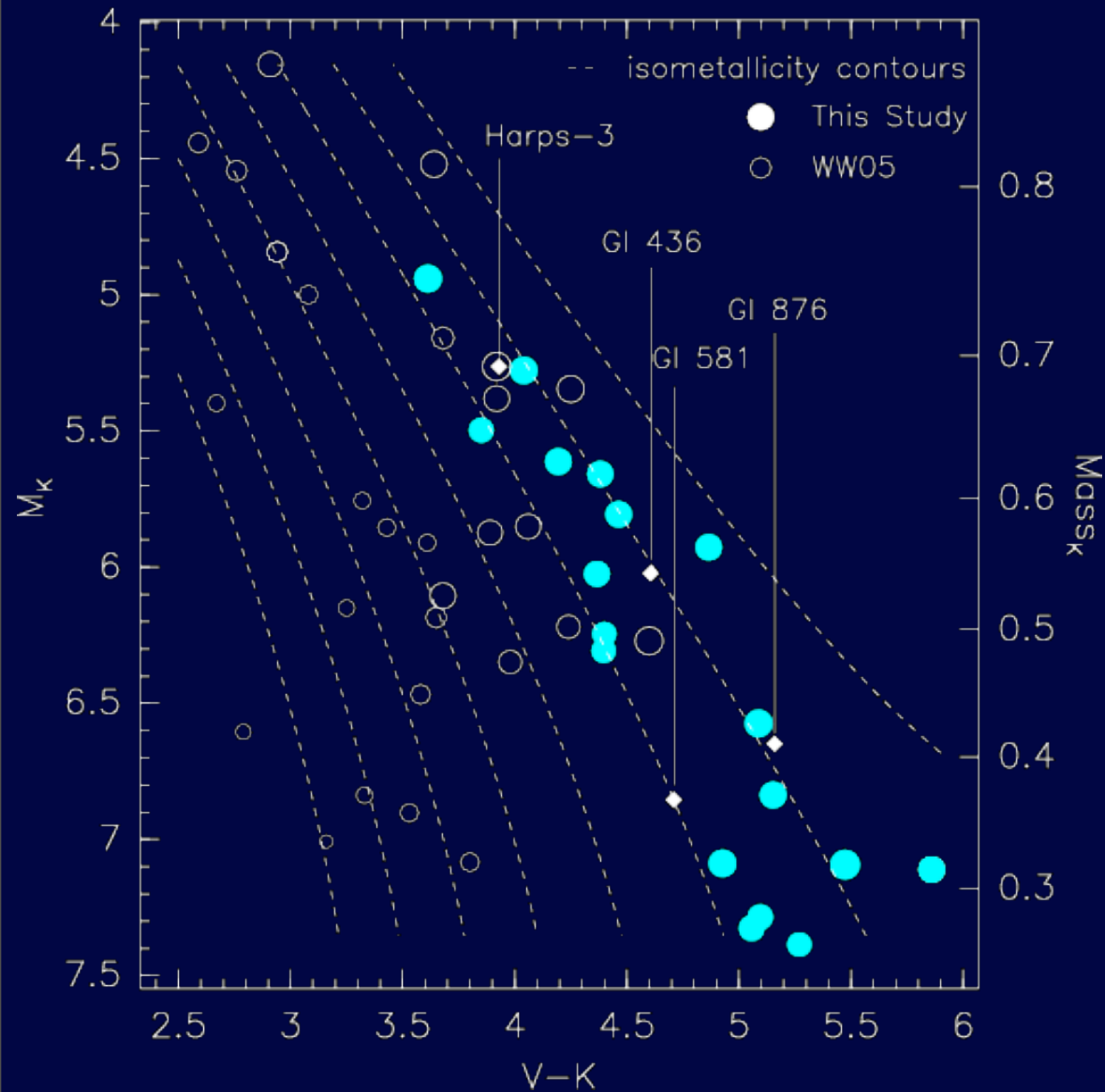
- **pour les étoiles de type solaire (FGK)**
 - mesure des largeurs équivalentes de Fe I et Fe II
 - 4 paramètres de l'atmosphère influencent les raies de Fe : T_{eff} , $\log g$, ξ_t , $[\text{Fe}/\text{H}]$
 - programme MOOG calcule $[\text{Fe}/\text{H}]$ pour chaque raie spectrale en interpolant une grille d'atmosphères (générées par le modèle Kurucz)
 - les paramètres atmosphériques sont changés et une nouvelle atmosphère hypothétique est générée jusqu'à obtenir une convergence (critères de convergence définis par la physique stellaire)
- **pour les naines M**
 - les bandes moléculaires effacent le continuum
 - analyse "raie-par-raie" impossible pour les étoiles de types spectraux tardifs
- **stratégie alternative**
 - chercher les naines M appariées à des étoiles plus chaudes
 - nous avons maintenant un atlas de ~80 couples composés d'une étoile primaire de type F, G ou K et d'une étoile secondaire de type M

La métallicité : v.2 Une calibration photométrique



$$[Fe/H] = 0.295 - 1.548 M_K + 0.094 M_K^2 + 1.858(V - K) - 0.139(V - K)^2$$

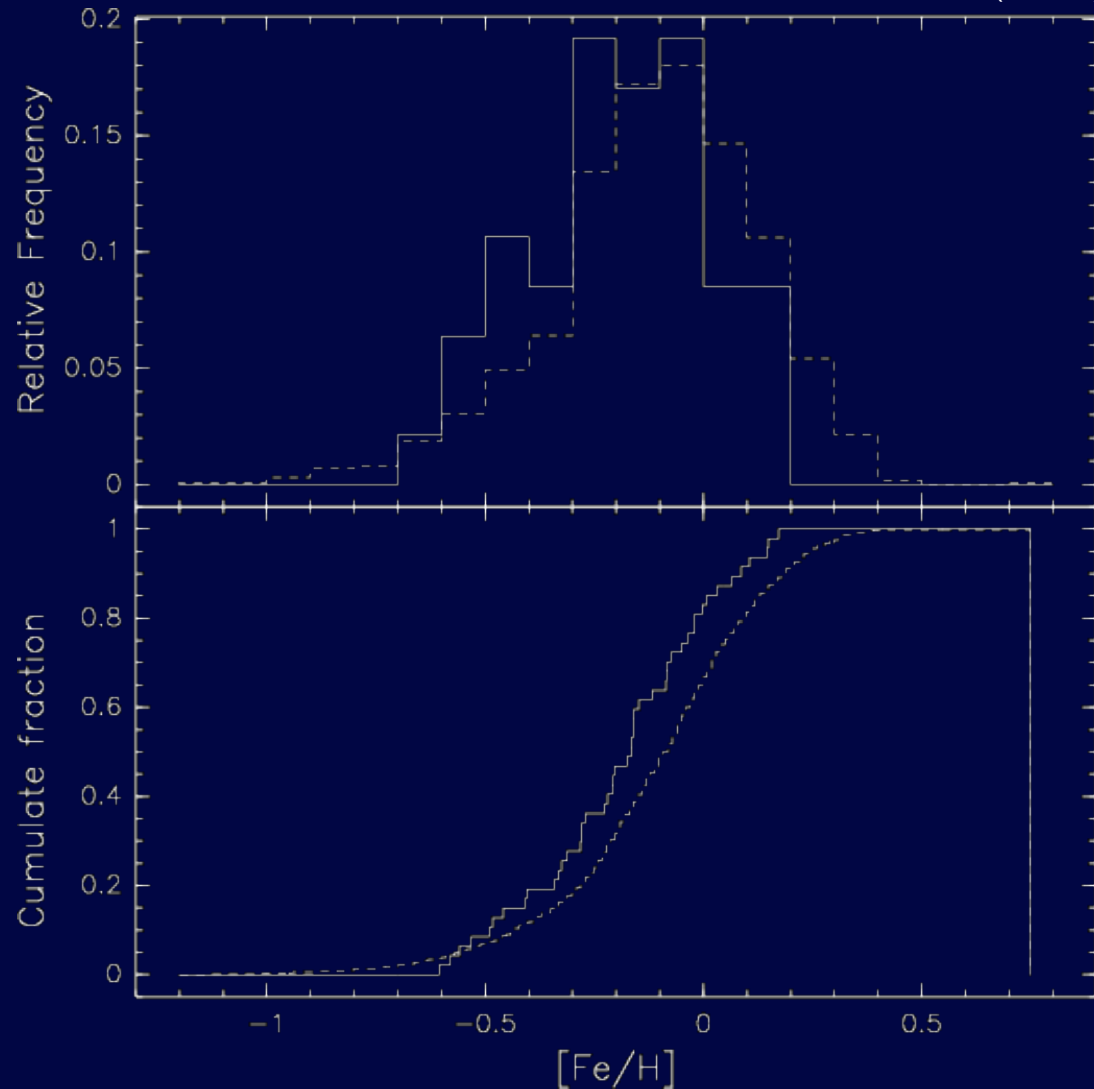
La métallicité : V.3 Les naines M à planètes

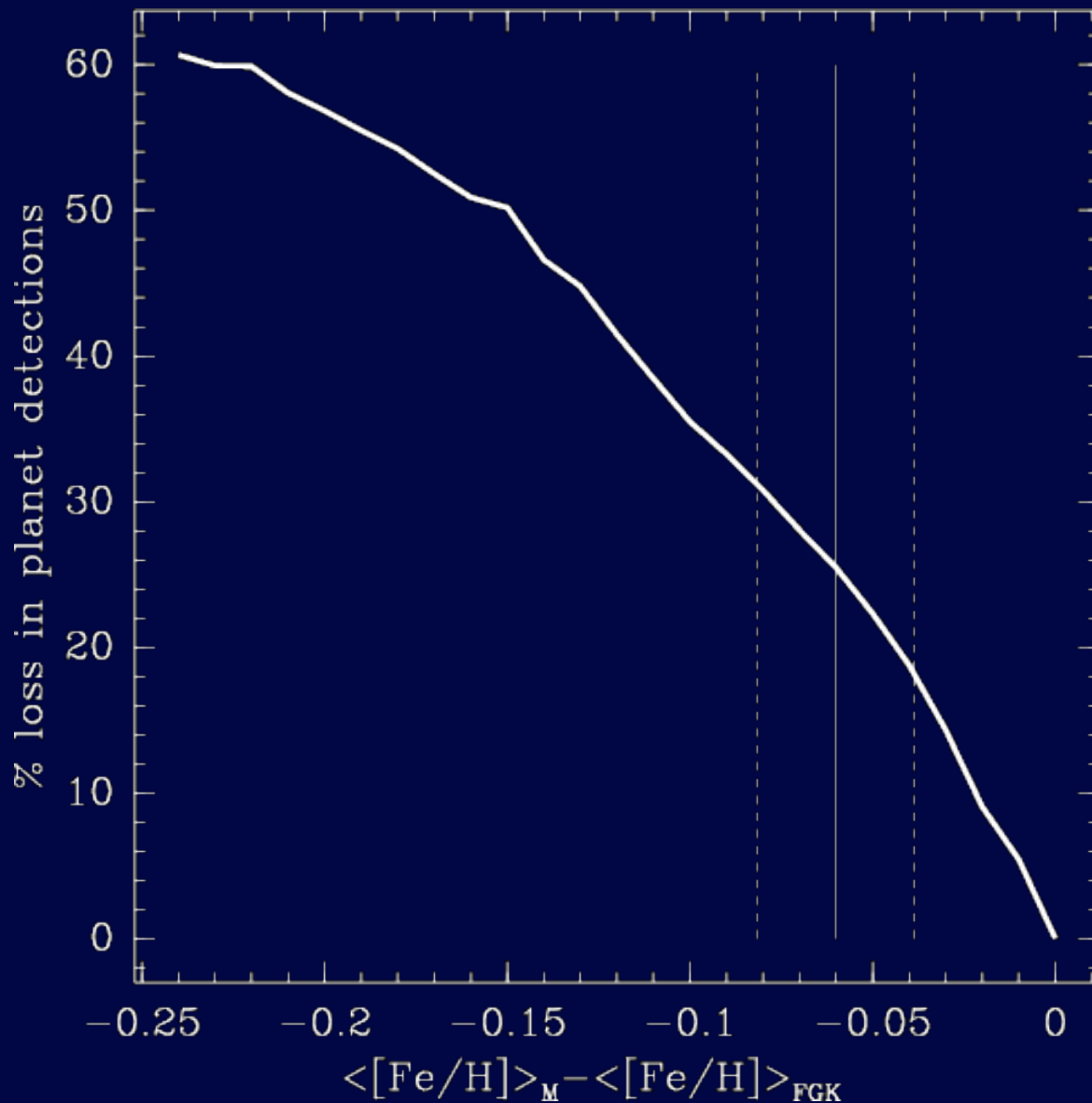


$[\text{Fe}/\text{H}](\text{GI 876}) = 0.02 \text{ dex}$
 $[\text{Fe}/\text{H}](\text{GI 436}) = -0.03 \text{ dex}$
 $[\text{Fe}/\text{H}](\text{GI 581}) = -0.25 \text{ dex}$
 $[\text{Fe}/\text{H}](\text{Harps-3}) = -0.09 \text{ dex}$

- on applique la calibration photométrique à l'échantillon ELODIE (limité en volume et nettoyé des binaires)
- comparaison avec l'échantillon des FGK de CORALIE
- Test K-S donne $P=6\%$
- Naines M semblent légèrement sous-métalliques (**0.06 dex**) avec un niveau de confiance de 2.6 sigma

Bonfils et al. (2005a)





- La différence de métallicité mesurée entre naines M et étoiles FGK implique un taux de détection de 20-30% inférieur
- Explique **une partie** du déficit de planètes géantes observé, mais une partie seulement...
- on observe donc une dépendance en m_1

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives

I. Introduction

1. Les exoplanètes
2. Les naines M
3. Intérêts de l'étude

II. Méthode

1. Vitesses radiales
et corrélation croisée numérique
2. Limitations de la méthode choisie

III. Nos programmes de recherche

1. Instruments, échantillons
et précisions
2. Des planètes et des imposteurs

IV. Etude statistique

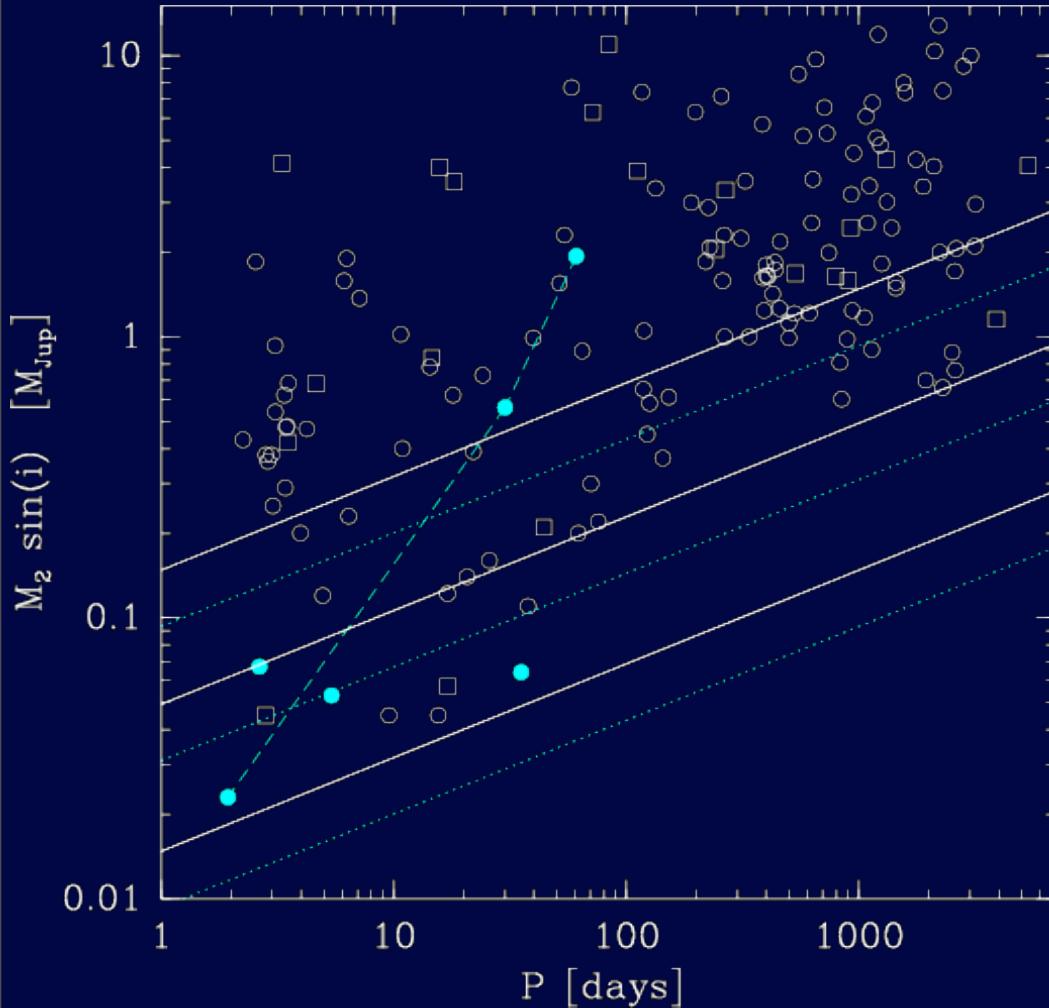
1. Aperçu
2. Simulations
3. Fréquence de planètes géantes

V. La métallicité des naines M

1. Métallicité et formation planétaire
2. Méthodes
3. Une calibration photométrique
4. La métallicité des M à planètes
5. La métallicité moyenne des M
6. Impact statistique

VI. Conclusion

1. Observations & Théorie
2. Réalisations
3. Perspectives



Observations :

- un déficit de planètes géantes
- une partie est due à $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle$ plus petit
- déjà de nombreuses planètes de la masse de Neptune

Théorie :

- “accrétion de coeur” prédit peu de planètes géantes et ...
- de nombreuses planètes de la masse de Neptune ! (Laughlin et al. 2004; Ida & Lin 2005)
- “instabilité gravitationnelle” prédit un taux de planètes géantes semblable pour les naines M et les étoiles FGK (si la masse des disques est identique) (Boss 2006)

Nos observations favorisent le scénario de formation par accrétion de coeur ou des disques peu massifs pour les naines M

Conclusions : VI.2 Réalisations

Détections :

- GI 581 b Bonfils et al. A&A 443, L15-18 (2005)
- Harps-3 b article A&A in prep. (2006)
- ...

Statistique :

- estimation du taux de naines M avec planètes
- comparaison aux étoiles de type solaire

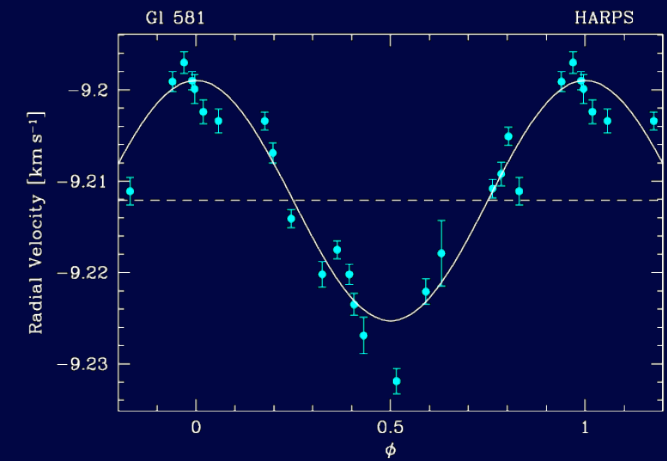
Bonfils et al. OHP Conf. (2005)

Bonfils et al. A&A in prep. (2006)

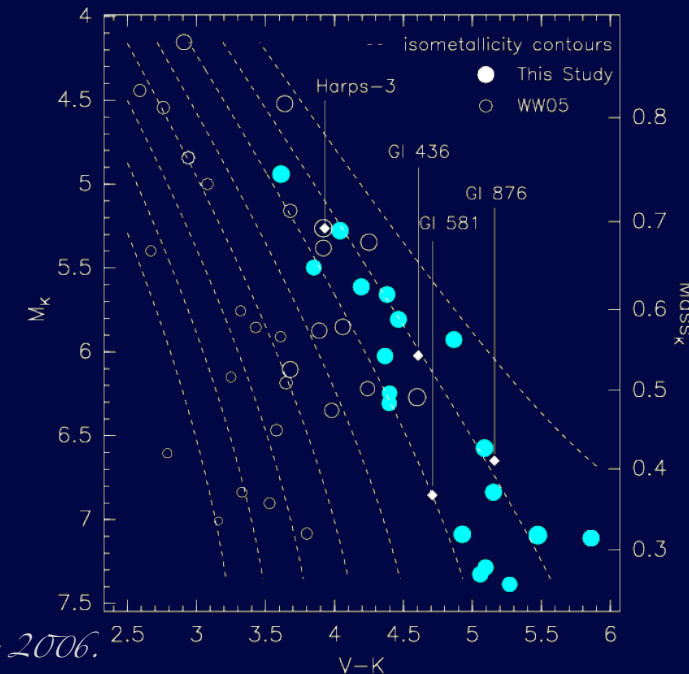
Métallicité :

- de nouvelles déterminations
- une calibration photométrique
- la métallicité des étoiles à planètes
- la métallicité moyenne des naines M
- impact statistique pour la détection

Bonfils et al. A&A 442, 635-642 (2005)



$$0.6\% < f < 4\%$$



Détections et étude statistique :

- les nouvelles mesures HARPS vont encore beaucoup contraindre l'estimation statistique
- un nouveau programme > 200 objets avec SOPHIE

- préciser le taux de naines M à planètes
- de nouvelles propriétés statistiques accessibles

Métallicité :

- augmenter la couverture spectrale et $[Fe/H]$ de notre calibration
- calibration spectroscopique

- préciser la différence de $[Fe/H]$ entre M et FGK
- vérifier la corrélation “planète-métallicité” / M

Activité :

- développer l'aspect quantitatif des outils
- caractériser les variations photométriques de Harps-2

- estimer l'activité a priori
- inclure l'activité dans les simulations

Etc ... :

- suivi transit des candidats

- obtenir des rayons planétaires pour des Neptunes

Fin...