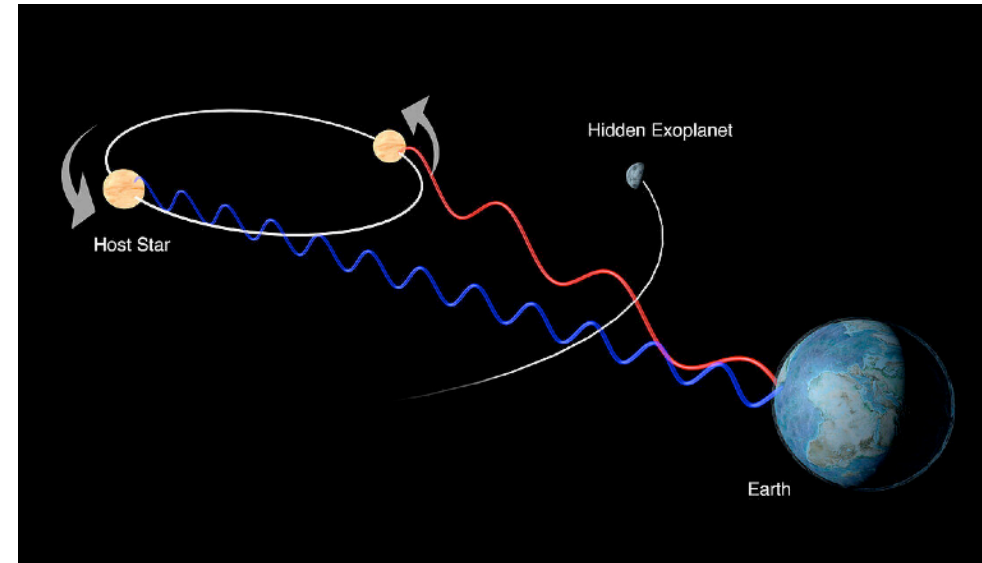
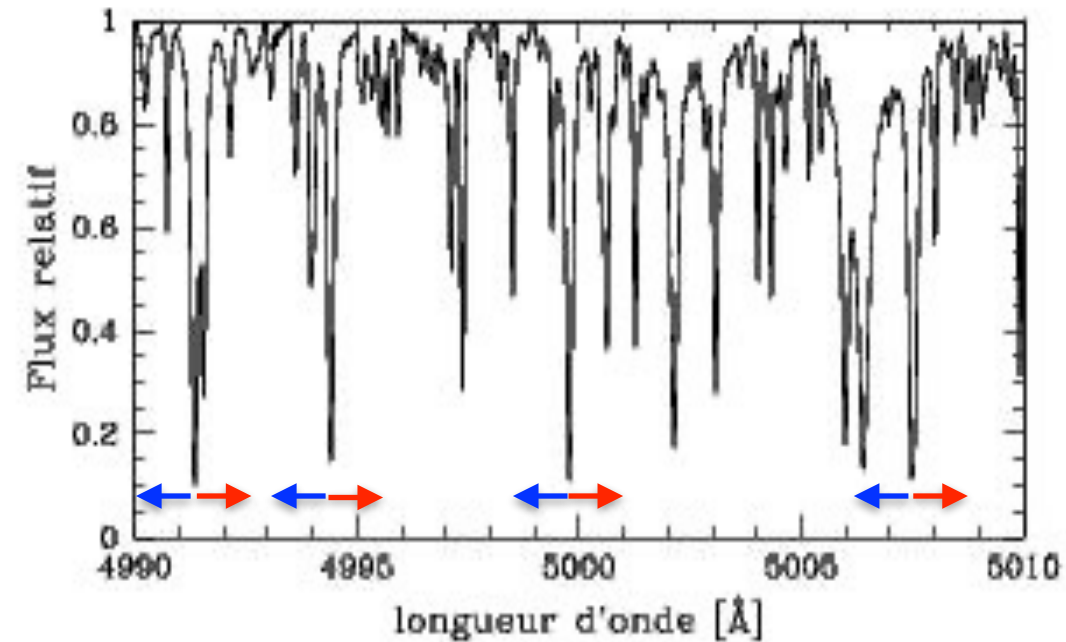


Spectroscopie haute résolution et Science des Exoplanètes en France

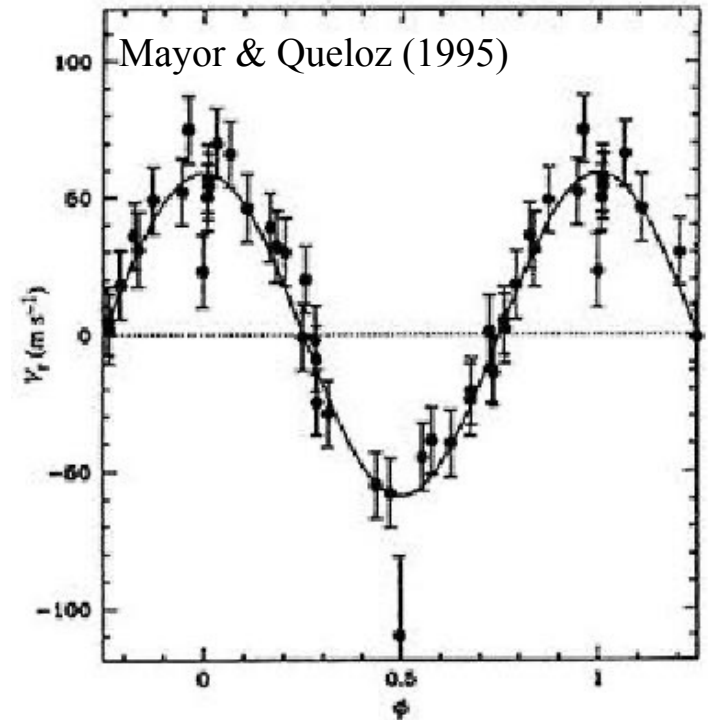


Objectifs scientifiques

1./ Vitesse radiale : mesurer l'étoile pour détecter la planète

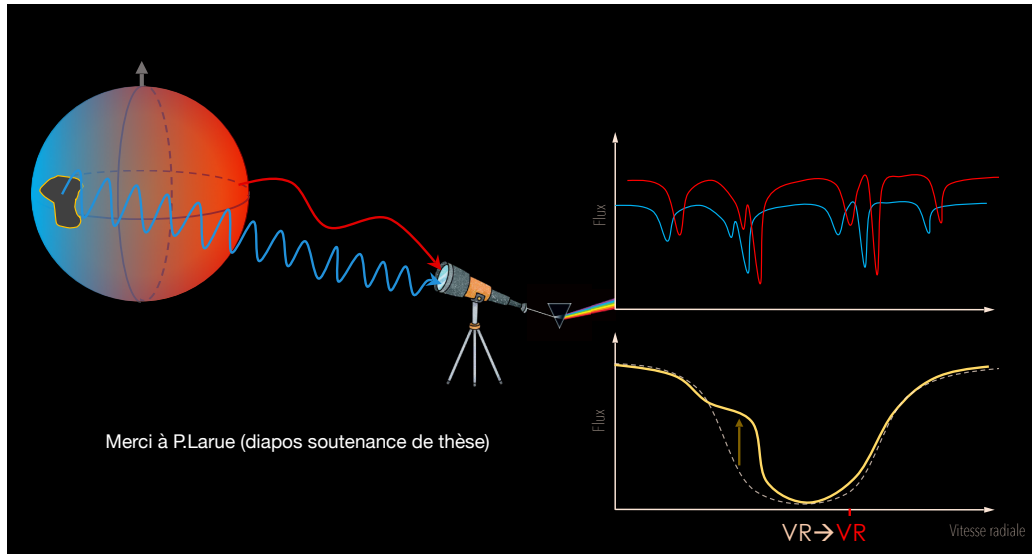


- ◆ Décalage Doppler global de toutes les raies du spectre
- ◆ Mesure de la variation de vitesse stellaire
- ◆ Détection de planète, mesure des paramètres orbitaux (période, Ecc, ...) et de la masse planétaire projetée

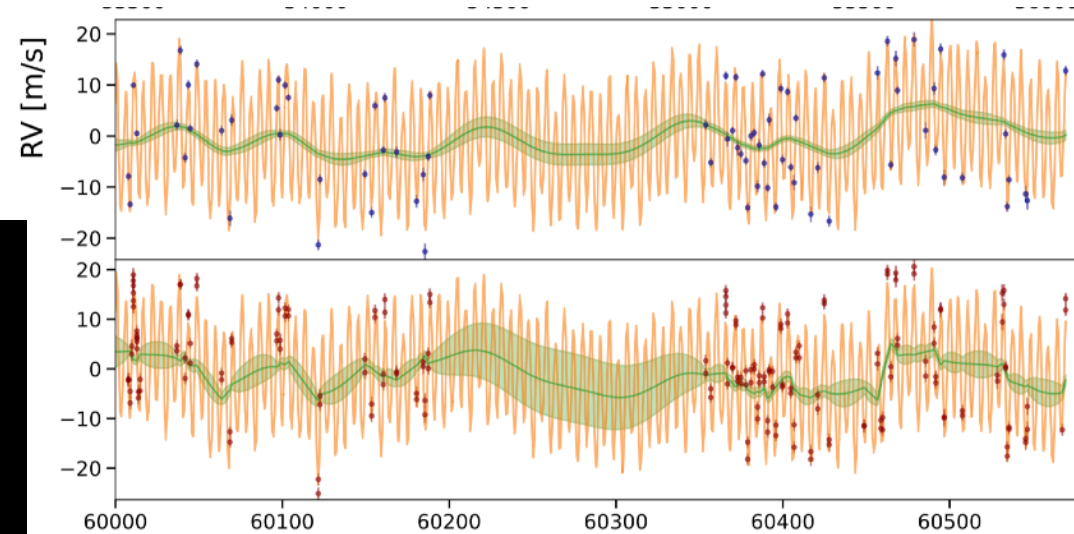


Objectifs scientifiques

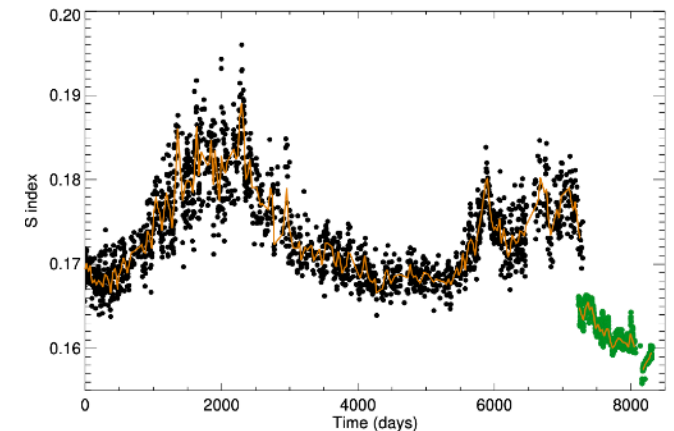
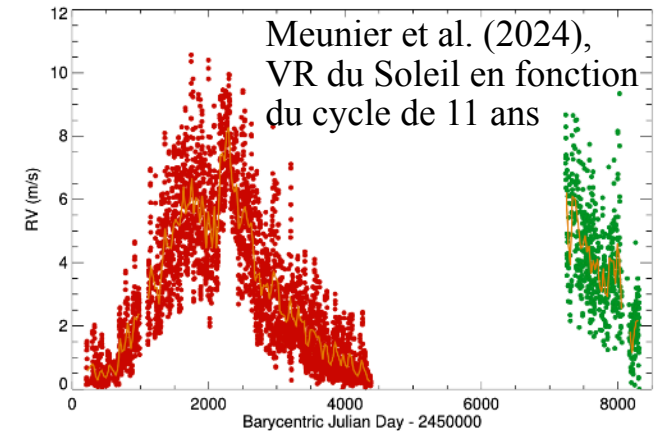
2./ Activité Stellaire : connaître l'étoile pour connaître la planète



- ◆ La déformation des raies indique des inhomogénéités de surface, possédant un décalage Doppler due à la rotation
- ◆ L'activité stellaire peut mimer la présence d'une planète en vitesse radiale
 - ▶ Doit être connu pour être soustrait
- ◆ Raies émises dans la chromosphère (Ca H&K, Ha, ...)
 - ▶ Détermination de la période de rotation stellaire
 - ▶ Interaction étoile-planète
 - ▶ Détermination de l'âge du système (gyrochronologie)

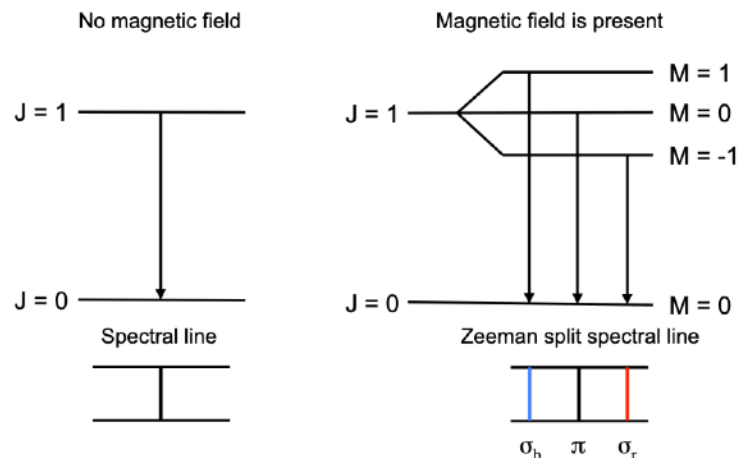


Effet de l'activité
Effet de 3 planètes
Larue et al. (soumis)

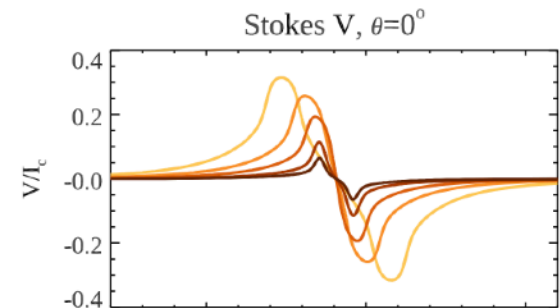
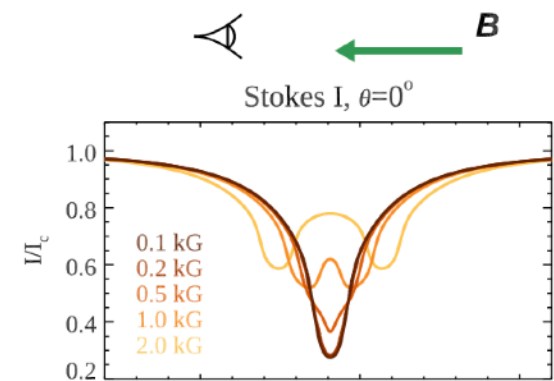
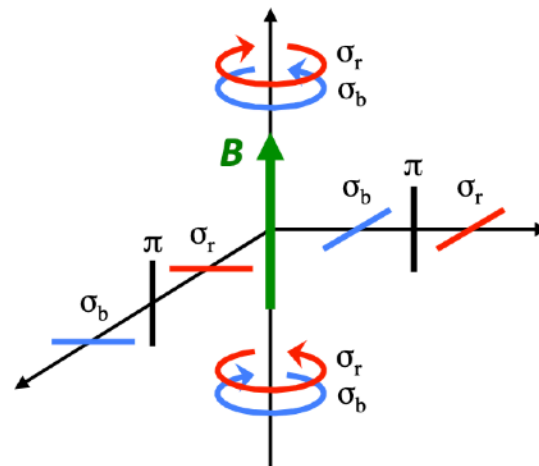


Objectifs scientifiques

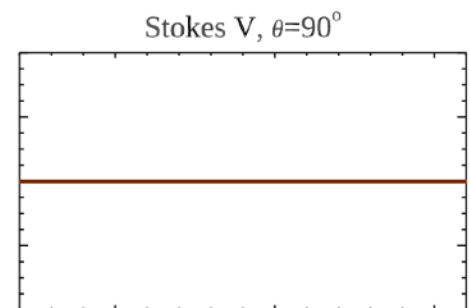
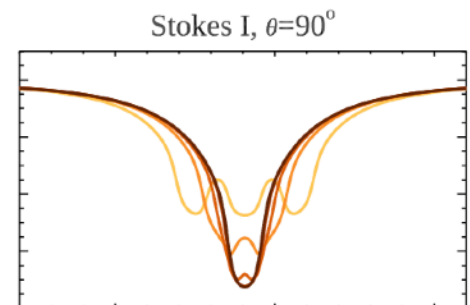
3./ Spectro-polarimétrie : connaître l'étoile pour connaître la planète



Kochukhov (2018)

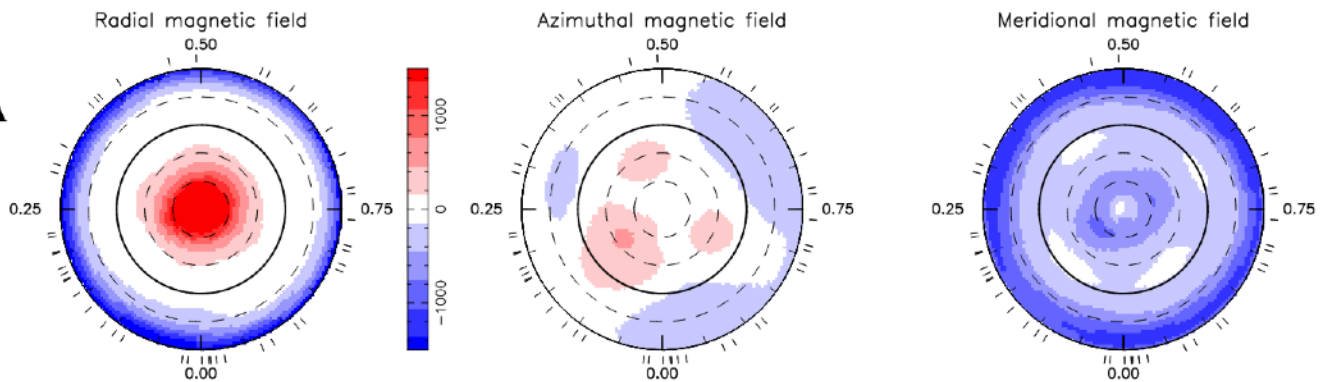


Stokes V = différence entre les 2 polarisations circulaire

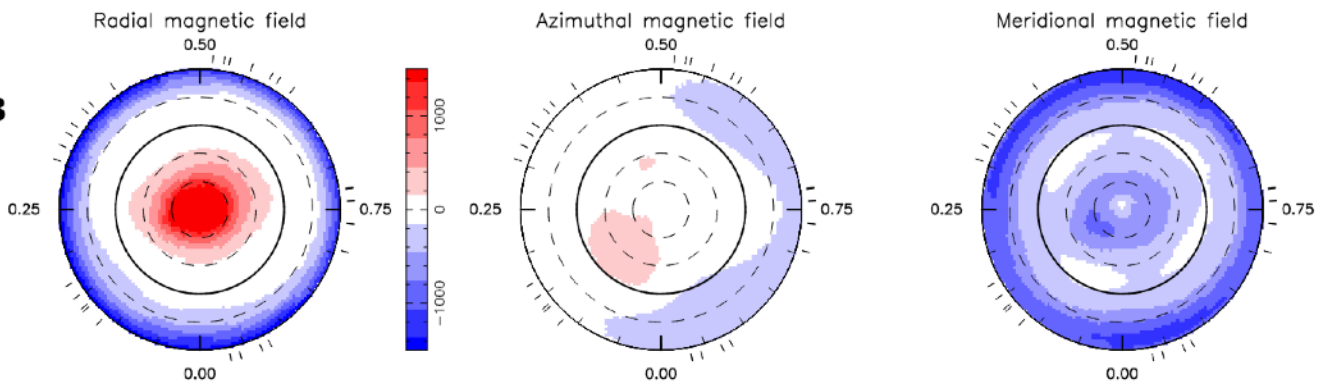


- ◆ Effet Zeeman : le champ magnétique sépare les raies en 3 composantes
- ◆ Composantes qui ont des propriétés de polarisations différentes en fonction de l'axe du champs magnétique
- ◆ Coupler polarisation et spectro haute résolution
 - ▶ Détermination de B_l (champs magnétique longitudinal)
 - ▶ éventuellement reconstruction d'une carte magnétique

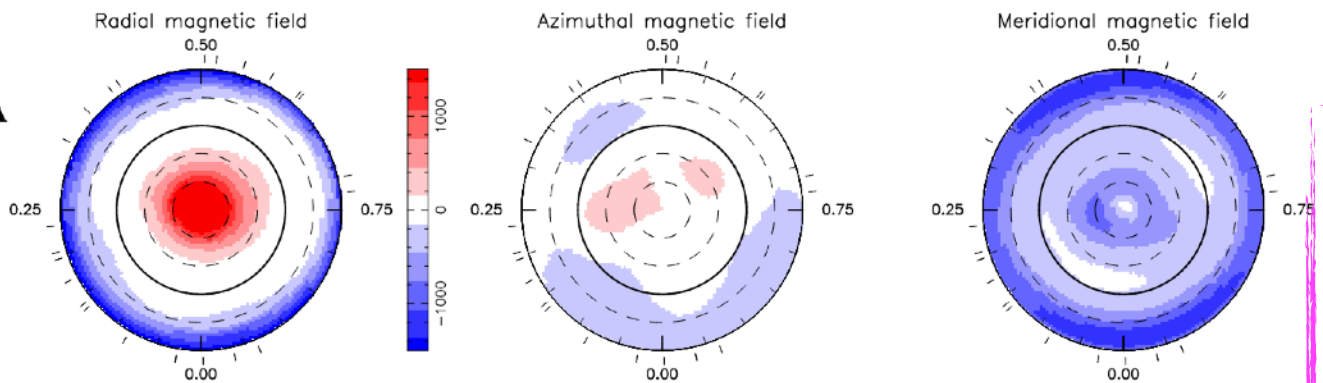
2023A



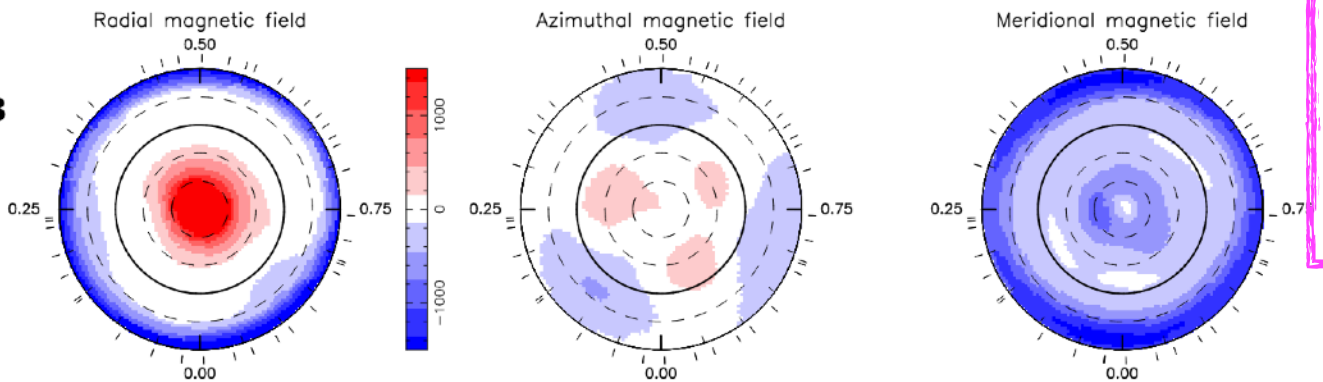
2023B



2024A



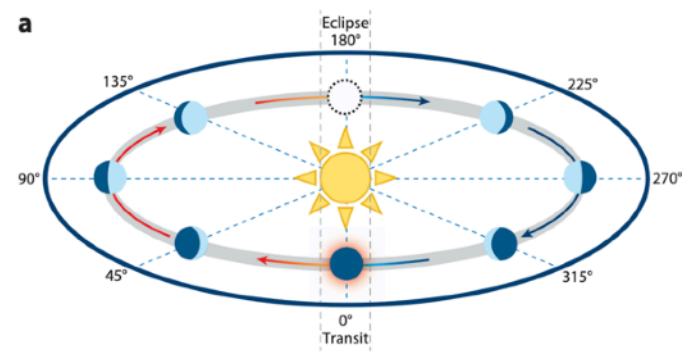
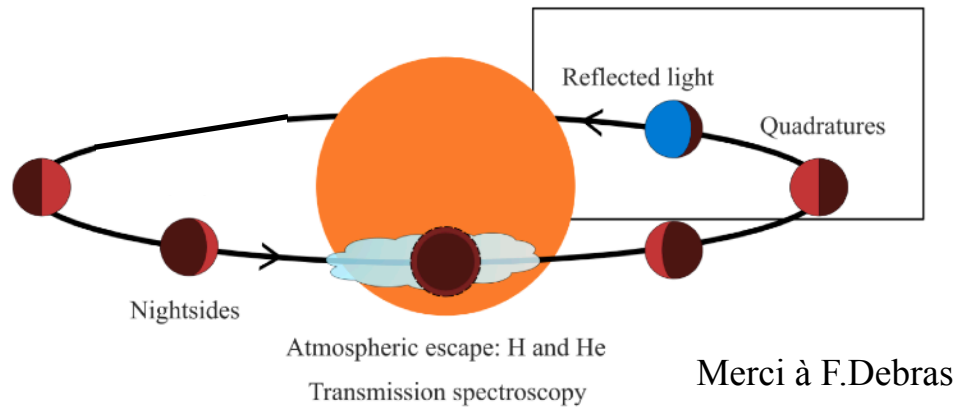
2024B



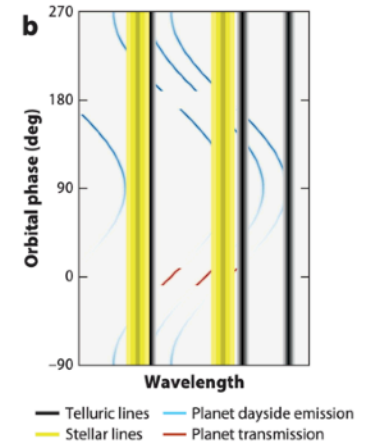
- ◆ Ex : AU Mic avec SPIRou (Donati et al. 2025)
- ◆ Interaction magnétique étoile-planète
- ◆ Rotation étoile, ...

Objectifs scientifiques

4./ Caractérisation atmosphérique : connaître la planète



Snellen 2025



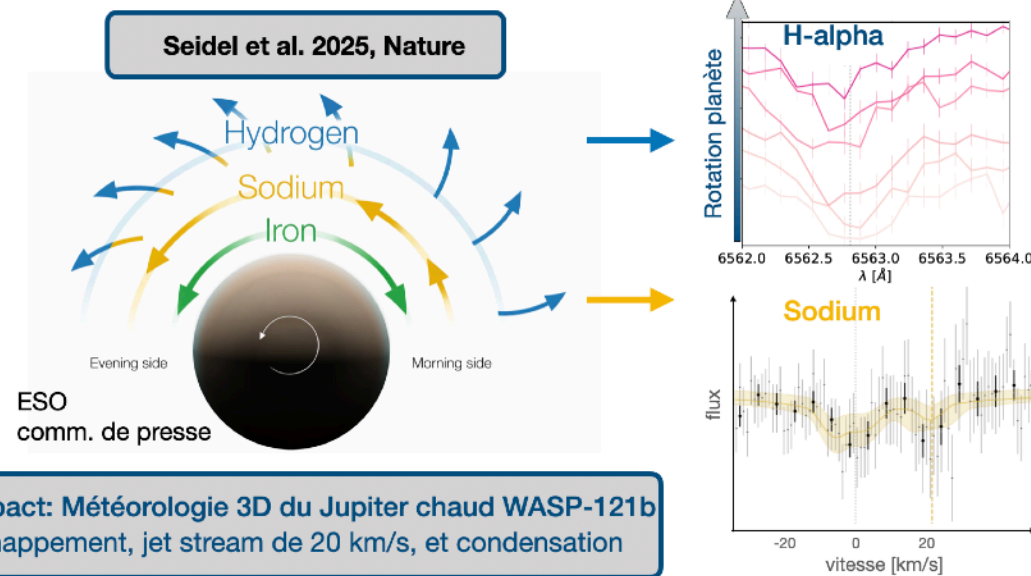
- ◆ Observation du système à haute résolution spectrale

- ▶ Séparation des signaux planétaires/stellaires grâce aux décalage Doppler

- ◆ Détections d'éléments atmosphériques durant transit

- ◆ Explore la structure 3D de la planète

- ◆ Phénomène d'échappement de l'atmosphère

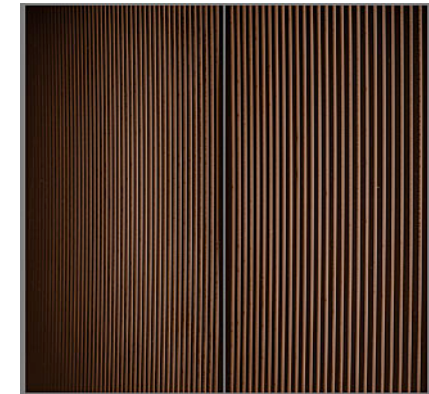
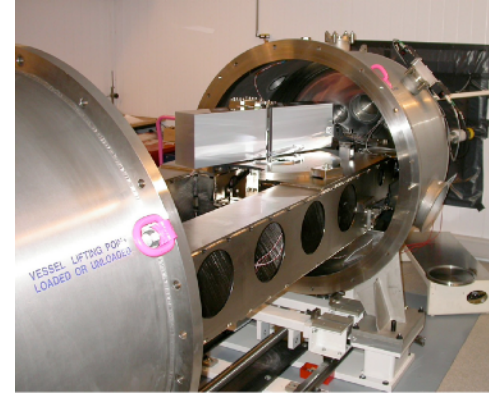


Positionnement de la communauté française

Velocimètre optique

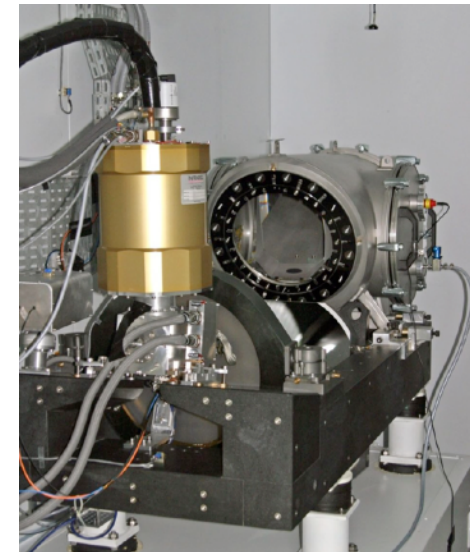
HARPS / 3.6- CFHT

- R ~ 120 000
- Couverture spectrale : 378nm - 691nm
- Stabilité vitesse radiale : < 1m/s
- Début des opérations : 2003
- France Co-I



SOPHIE / 1.93-m OHP

- R ~ 75 000
- Couverture spectrale : 387nm - 694nm
- Stabilité vitesse radiale : ~ 1-2 m/s
- Début des opérations : 2006
- France PI



Positionnement de la communauté française

Spectropolarimètre optique

ESPaDOoS / 3.6- CFHT



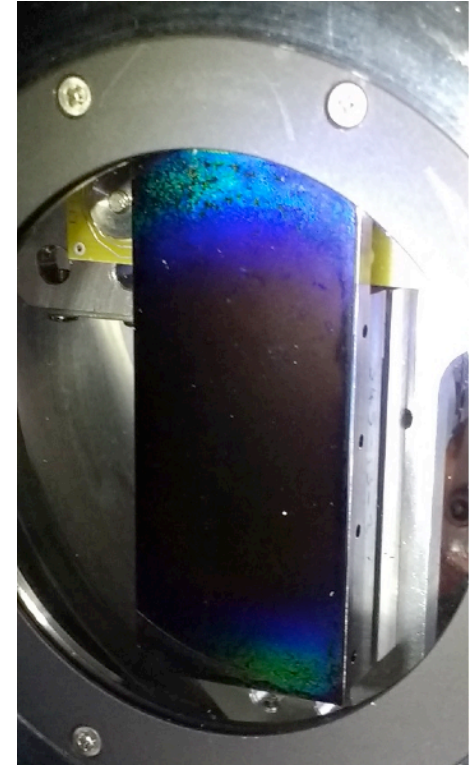
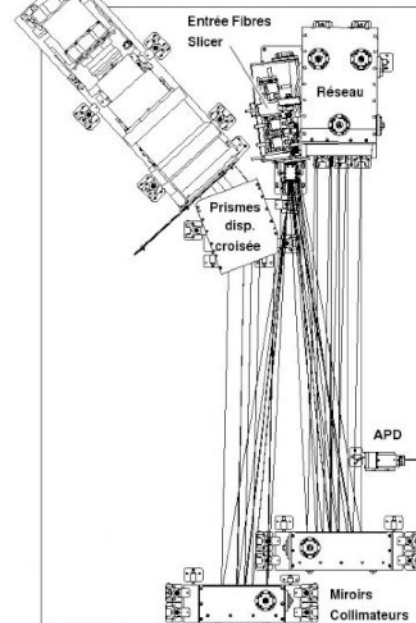
- $R \sim 68\,000 - 81\,000$
- Couverture spectrale : 370nm – 1050 nm
- Stabilité vitesse radiale : non, calibration sur raies tellurique (~ 10 m/s)
- Spectropolarimétrie
- **Début des opérations : 2004**

Néo-Narval / TBL

- $R \sim 65\,000$
- Couverture spectrale : 375nm – 1050 nm
- Stabilité vitesse radiale : < 3 m/s (objectif)
- Spectropolarimétrie
- **Début des opérations : 2019**



Cryostat CCD



Positionnement de la communauté française

Vélocimètre-Spectropolarimètre nIR

SPIRou / 3.6- CFHT

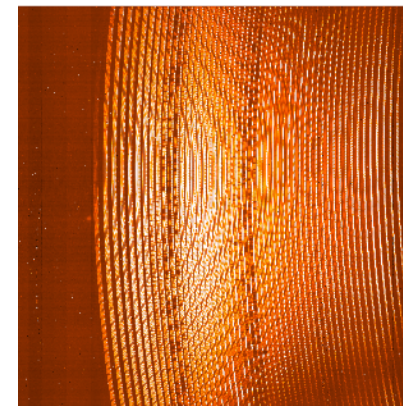
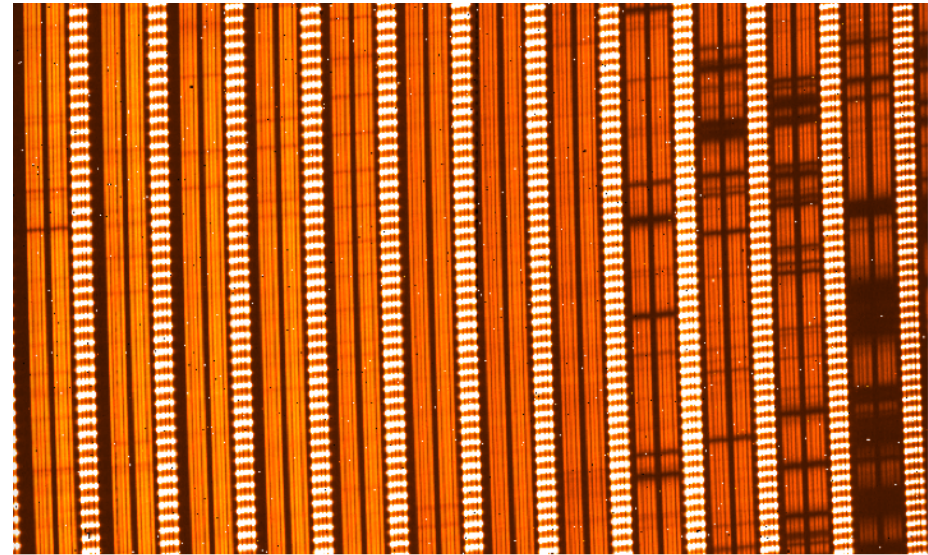
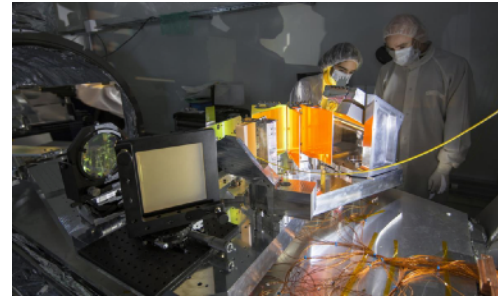


- R ~ 70 000
- Couverture spectrale : 0.98 – 2.35 μm
- Stabilité vitesse radiale : 1m/s
- Spectropolarimétrie
- Début des opérations : 2019
- France PI

NIRPS / 3.6-m ESO



- R ~ 72 000
- Couverture spectrale : 0.98 – 1.8 μm
- Stabilité vitesse radiale : < 1m/s
- Début des opérations : 2023
- France Co-I



1^{ere} lumière **SPIRou**
en Avril 2018

Positionnement de la communauté française

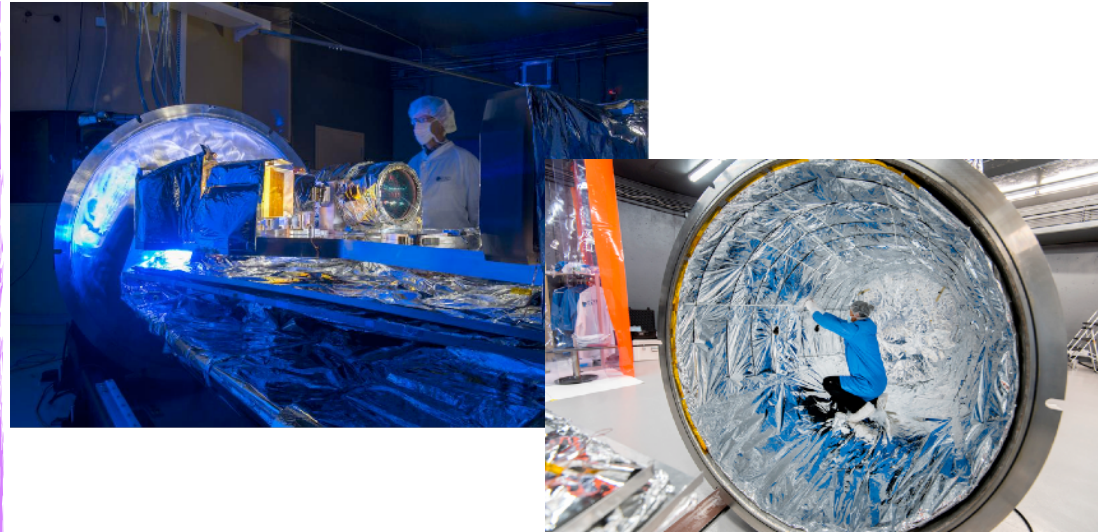
Point de vue instrumental :

Une filière instrumentale avec forte expertise

- ◆ Spectroscopie HR stabilisée
 - ▶ Injection fibrée ultra-stable
 - ▶ Spectro thermalisé ($\sim 1/1000\text{K}$), sous vide ou pression constante
 - ▶ Spectro-Polarimétrie
 - ▶ Extraction optimisée du signal
 - ▶ Développements R&D spectro compact

La suite

- ◆ SOPHIE-red @ OHP (2026)
- ◆ SPIP @ OHP (2026)
- ◆ Projets VLT beyond 2030
 - ▶ ESPRESSO-red (PI Genève, France Co-I)
 - ▶ VIPER (PI : IRAP)
- ◆ ELT : on en parle plus tard...



Point de vue des observations

- ◆ **Un accès privilégiés sur un temps long**
 - ▶ Série temporelle dense et longue
 - ▶ clé pour les programme vitesse radiale et de mesure du champ magnétique
- ◆ **Organisé en consortium avec accès à des LP**
 - ▶ SPIRou, NIRPS, SOPHIE, ...
 - ▶ ! Données publiques au bout de 1 ou 2 ans... après les observation ou après fin du LP
- ◆ Accès à d'autres spectro : ESPRESSO, CRIRES, ...

Positionnement de la communauté française

SNO SHARP

(Spectroscopie HAute résolution, vitesse Radiale & Polarimétrie)

- ANO3 télescope de 193@OHP (SOPHIE-red)
 - ANO3 télescope Bernard Lyon, (néo-NARVAL)
 - ANO3 CFHT, (ESPaDOnS et SPIROu)
 - ANO5 PolarBase
 - ANO5 POLLUX
- Futur proche ? : ANO2 ANDES, ANO3 SPIP, ANO4 Amakihi (CFHT), ANO4 NIRPS (ESO)...

De fortes synergies entre ces différentes taches :

Développements d'outils d'analyse :

- Pipelines optimisés spectro-polar et vélocimétrie
- Outil d'analyse : magnétisme stellaire, détection système planétaire, caractérisation des exoplanètes, ...
- ...

Développement de base de données

- Liés au télescope nationaux (PolarBase, SOPHIE, ...)
- Données théoriques : POLLUX

Coordination de grands relevés

- Production de données homogènes
- Mesure de la stabilité long terme des instrument, contrôle qualité des données
- ...



OSUG

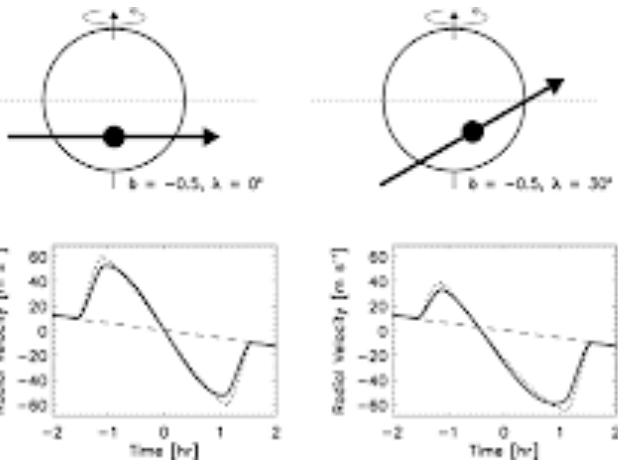
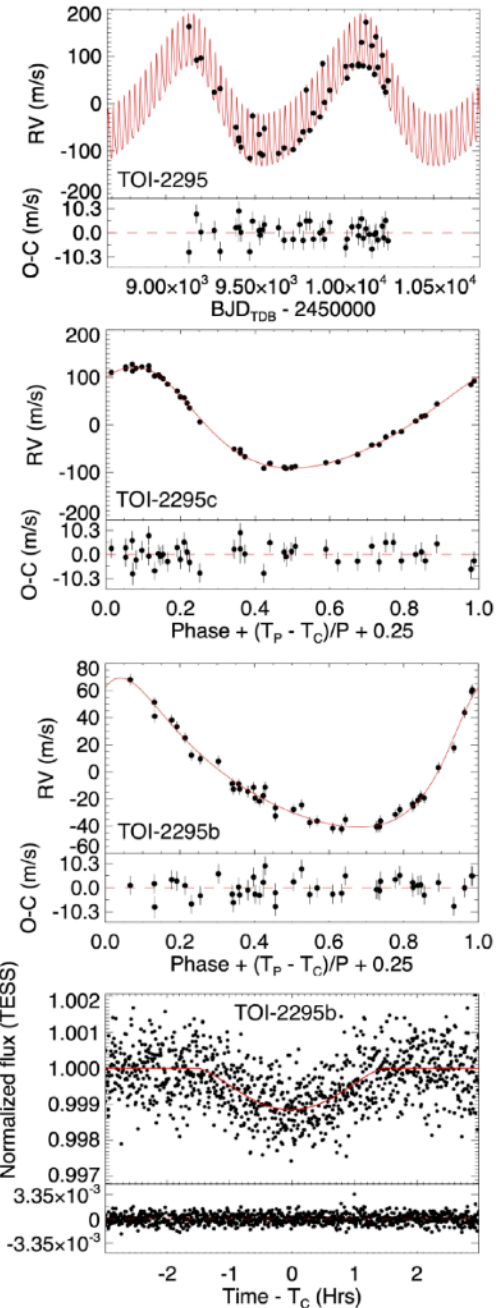
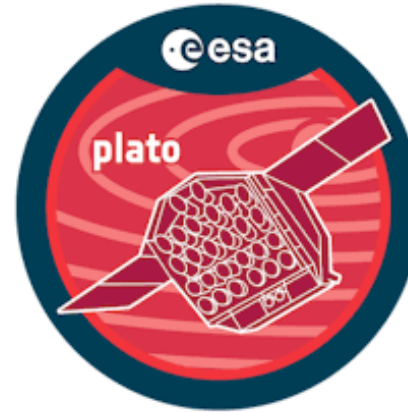
Observatoire des Sciences
de l'Univers de Grenoble



Synergie avec les autres moyens d'observation

Vitesse radiale et transit (TESS, PLATO)

- ◆ Confirmation de la planète transistante et recherche de planètes supplémentaires
- ◆ Mesure de la masse et donc de la densité
 - ▶ contraintes structure planétaire
- ◆ Effet Rossiter McLaughlin



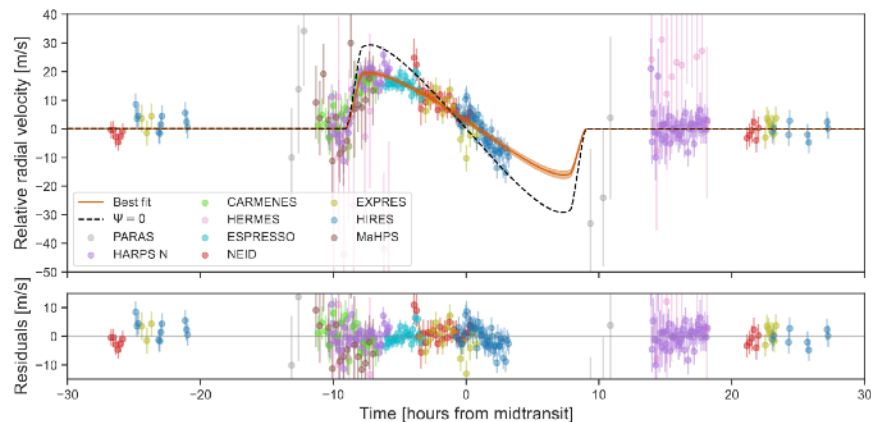
Effet Rossiter McLaughlin:
planète à 542j de période et dés-alignée

Grouffal et al. 2025

Suivi VR d'une planète en transit :

densité de la planète
découverte planète supplémentaire

Heidari et al. 2025



Synergie avec les autres moyens d'observation

Vitesse radiale et **astrométrie** (GAIA)

- ◆ Caractérisation orbitale des objets ayant un résidus astrométrique trop important
- ◆ Filtrage des faux positifs GAIA DR4 (binaires de masse égale)
- ◆ Architecture des systèmes : interne avec VR et intermédiaire avec GAIA DR4
- ◆ ...

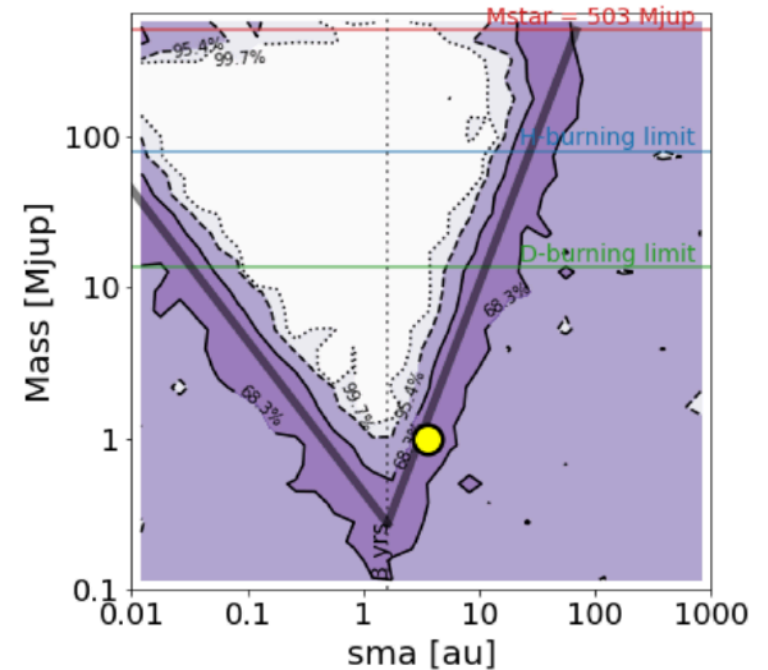
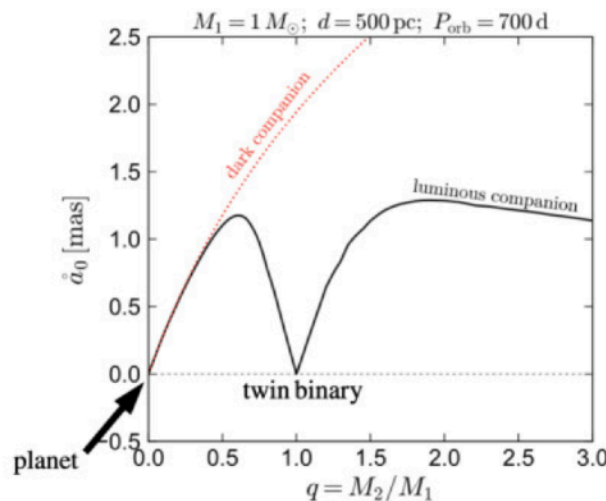
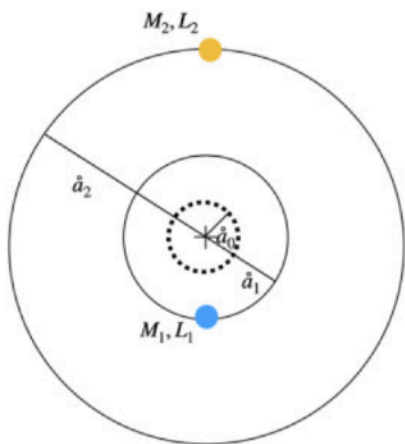
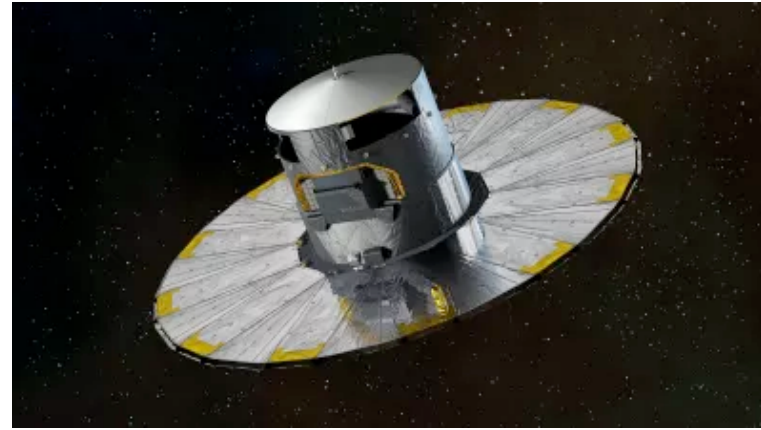
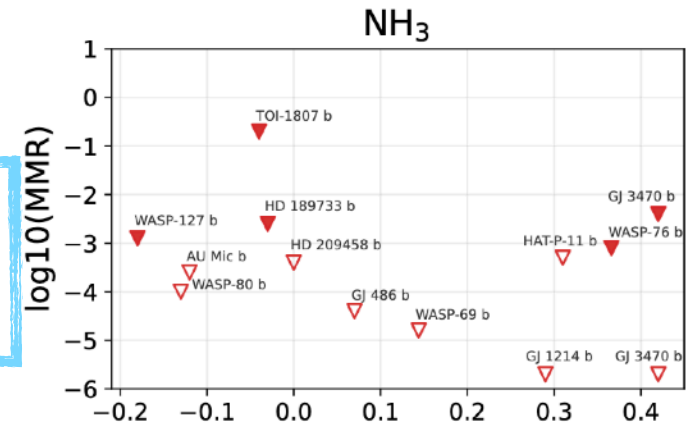
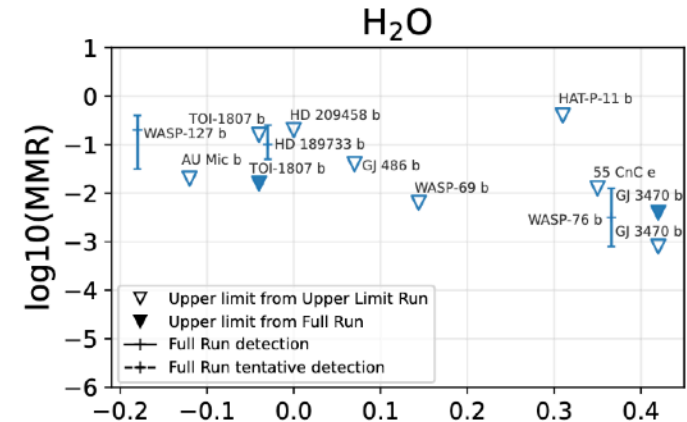


Fig. 1. GaiaPMEX confidence map of the mass and sma of a companion around GJ 832 constrained by the ruwe. The darkest area delineated

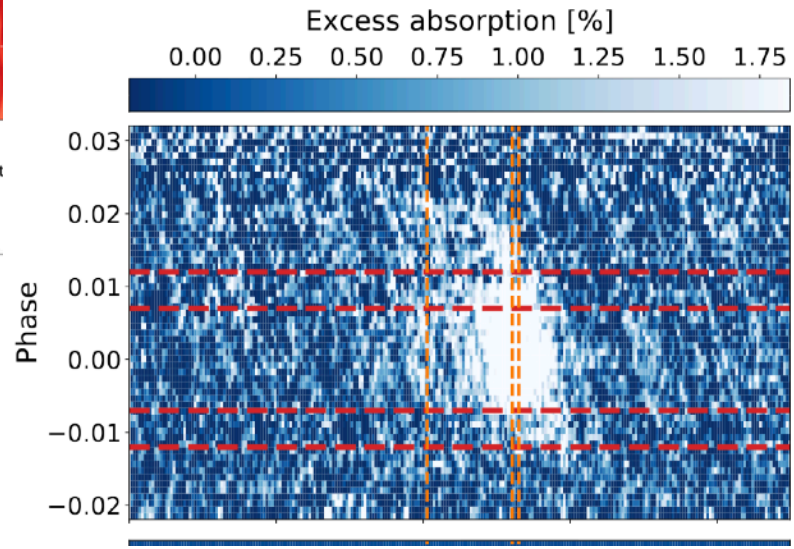
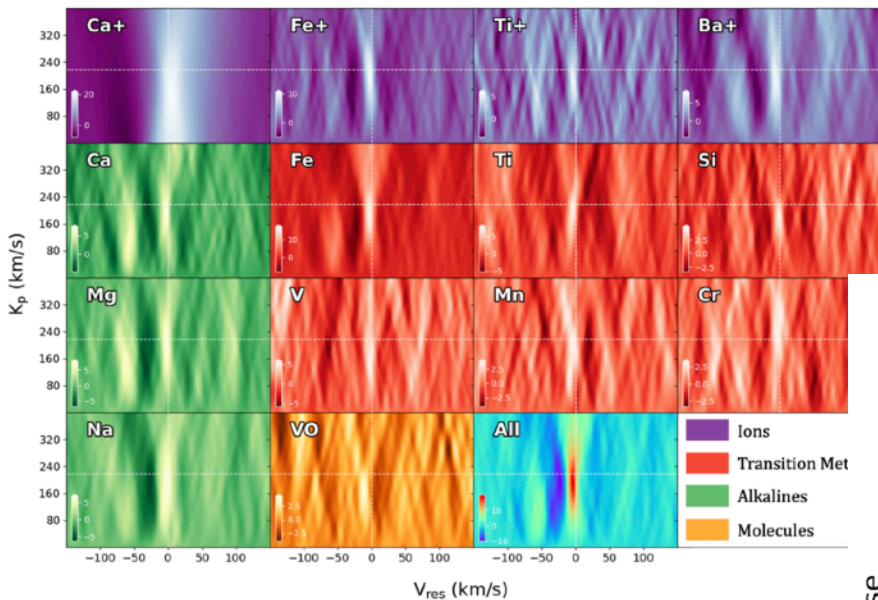
Synergie avec les autres moyens d'observation

Caractérisation à haute résolution spectrale versus JWST

- ◆ Détection d'éléments indétectables avec JWST (ex : atomes réfractaires)
- ◆ Accès à la déformation ou décalage Doppler des raies : information 3D, vents, ...
- ◆ Evaporation des atmosphères (He, H)



Signatures moléculaires :
 14 planètes avec SPIRou
 Masson et al. 2026



Evaporation
 atmosphérique d'un
 Saturne :
 He résolue spatialement
 et temporellement
 (NIRPS)
 Allart et al. 2025

Atomes réfractaire (non détectable avec JWST) dans l'atmosphère d'un Jupiter ultra chaud

Simonnin et al. 2025

Synergie avec les autres moyens d'observation

Spectroscopie haute résolution et imagerie haut contraste

◆ Cibles possibles ELT (ANDES / PCS) :

- ▶ Très proche voisinage solaire : **5-10pc**
- ▶ Seul VR peut les détecter

◆ Architecture des systèmes

- ▶ Planètes internes (VR), planètes externes (imagerie)

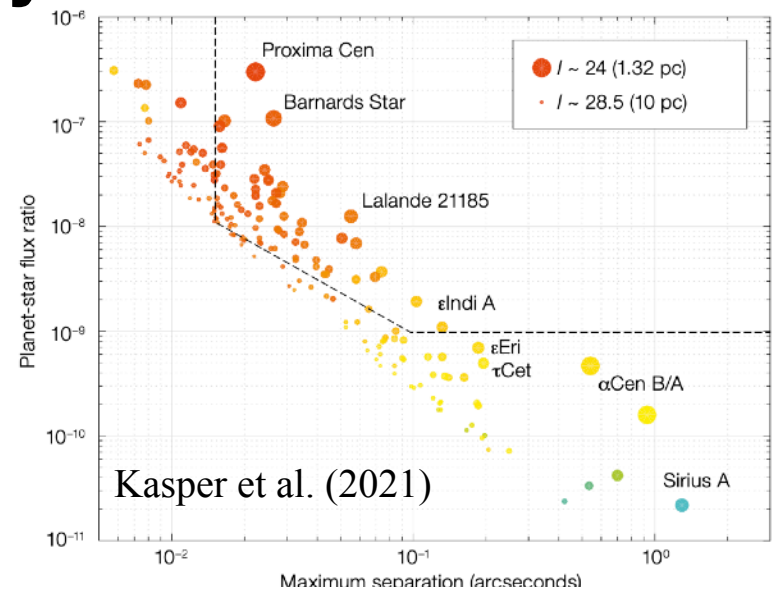
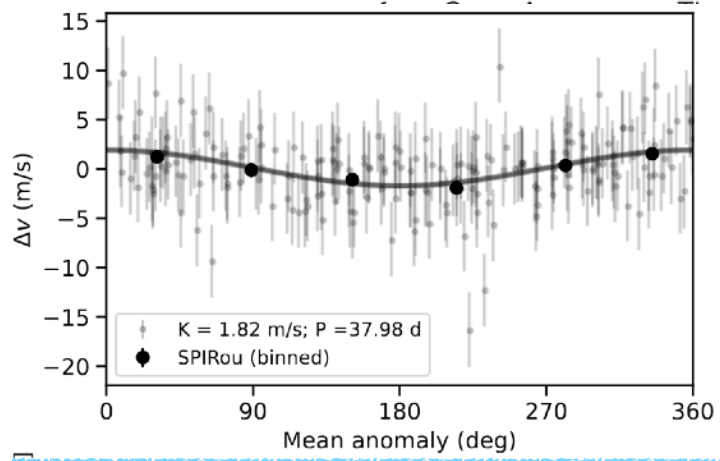
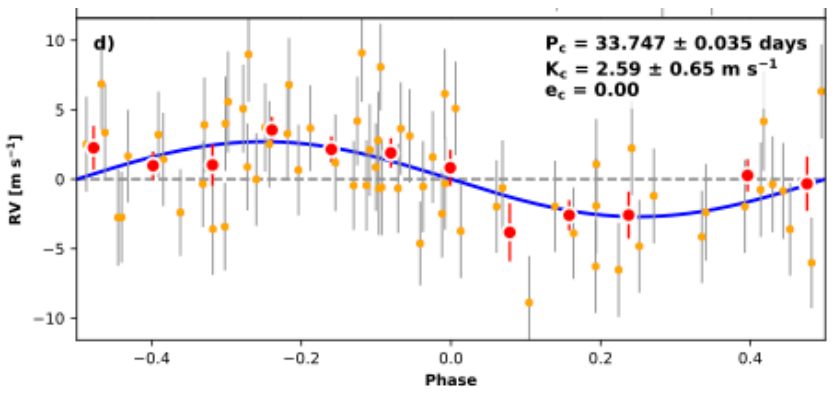


Figure 1. Angular separation and I-band flux ratio between hypothetical exoearths (Earth size and insolation, one per star) and parent stars within 10 pc (from the Hipparcos catalogue) observable

1 Super Terre et 1 SubNeptune à 7.2pc

GJ 4274b : 3 M_{\oplus} at $P_{orb} \sim 1.7$ d
 GJ 4274c : 8.5 M_{\oplus} at $P_{orb} \sim 70$ d, proche limite externe HZ

Charpentier et al. 2025, SPIRou



Seconde plus proche super Terre en zone habitable

GJ 725Bb : 3.5 M_{\oplus} at $P_{orb} \sim 37.9$ d ; d = 3.5pc

Ould Elhkim et al. 2025, SPIRou

Synergie avec les autres moyens d'observation

Fusion

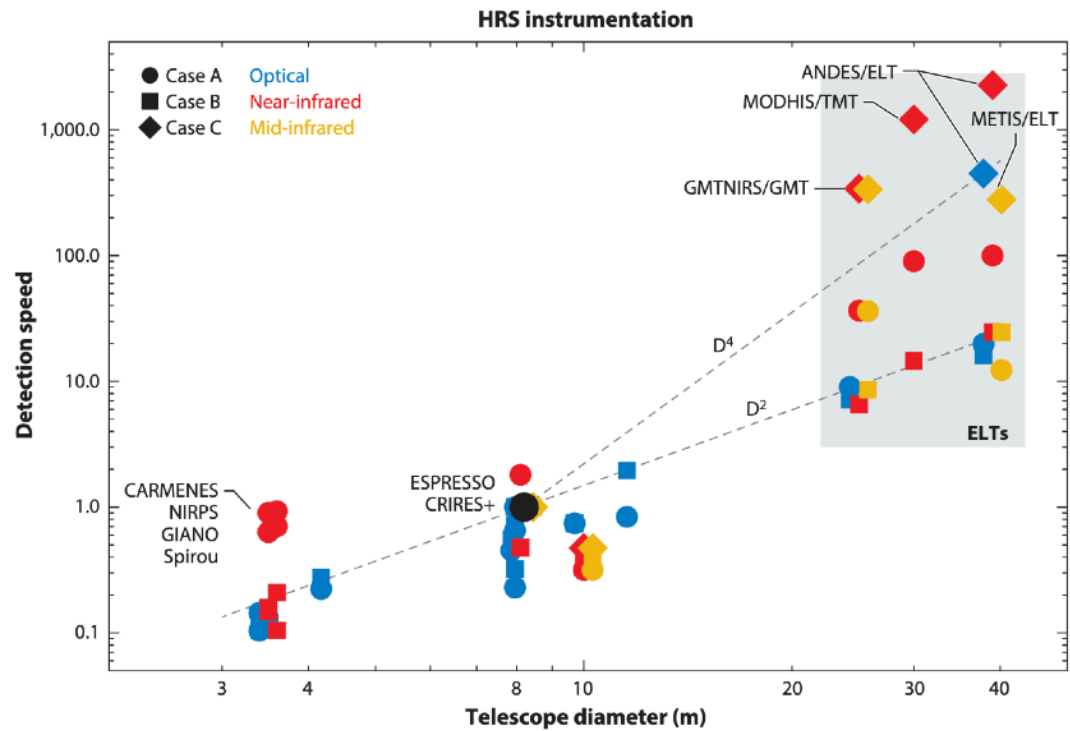
Spectroscopie haute résolution et **imagerie HC**

ELT : ANDES et PCS

◆ Cumuler :

- ▶ haute résolution angulaire
- ▶ Spectroscopie à haute résolution stable

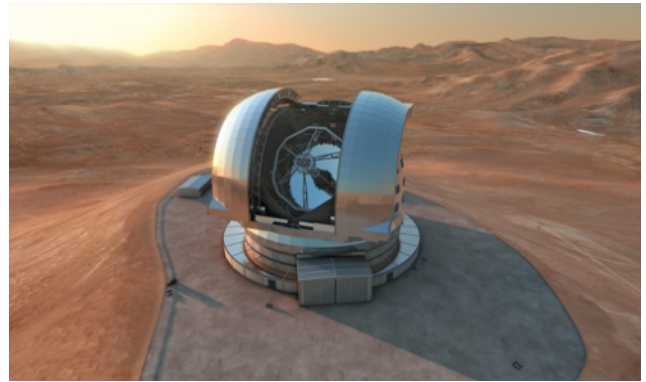
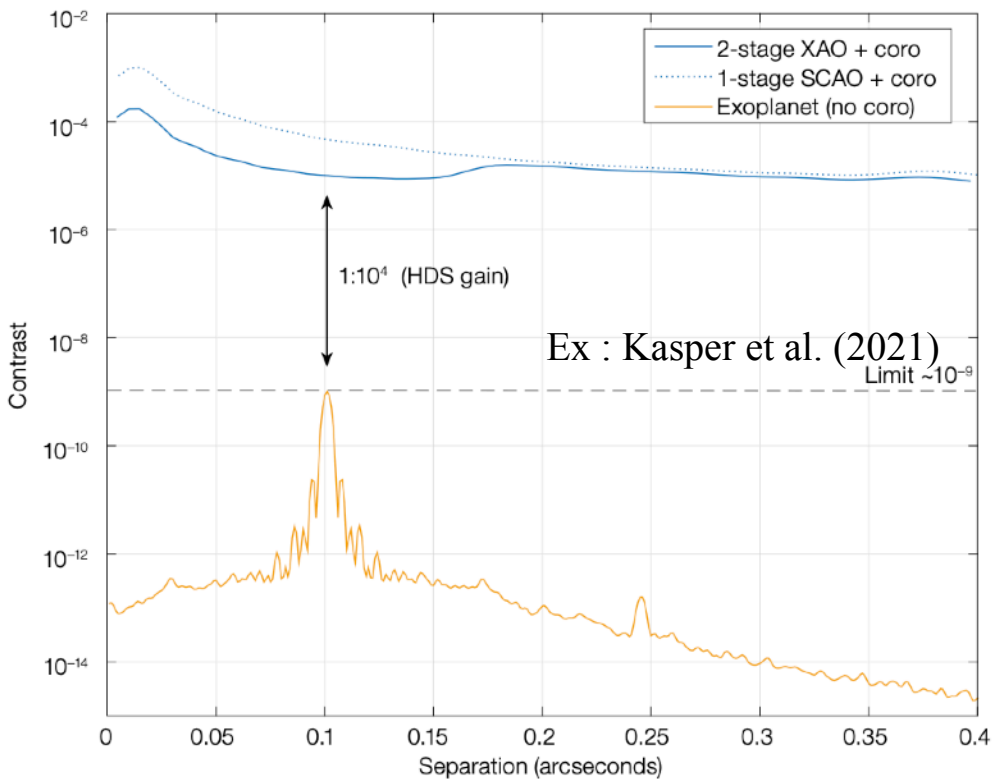
Descendant des 2 filières instrumentales



Cas A : spectroscopie haute résolution spectroscopie, large domaine spectrale

Cas C : haute résolution + couplage haut contraste

Snellen et al. 2025



Spectroscopie haute résolution et Science des Exoplanètes en France

ASTRONOMY & ASTROPHYSICS
SUPPLEMENT SERIES

OCTOBER II 1996, PAGE 373

Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **119**, 373-390 (1996)

ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements

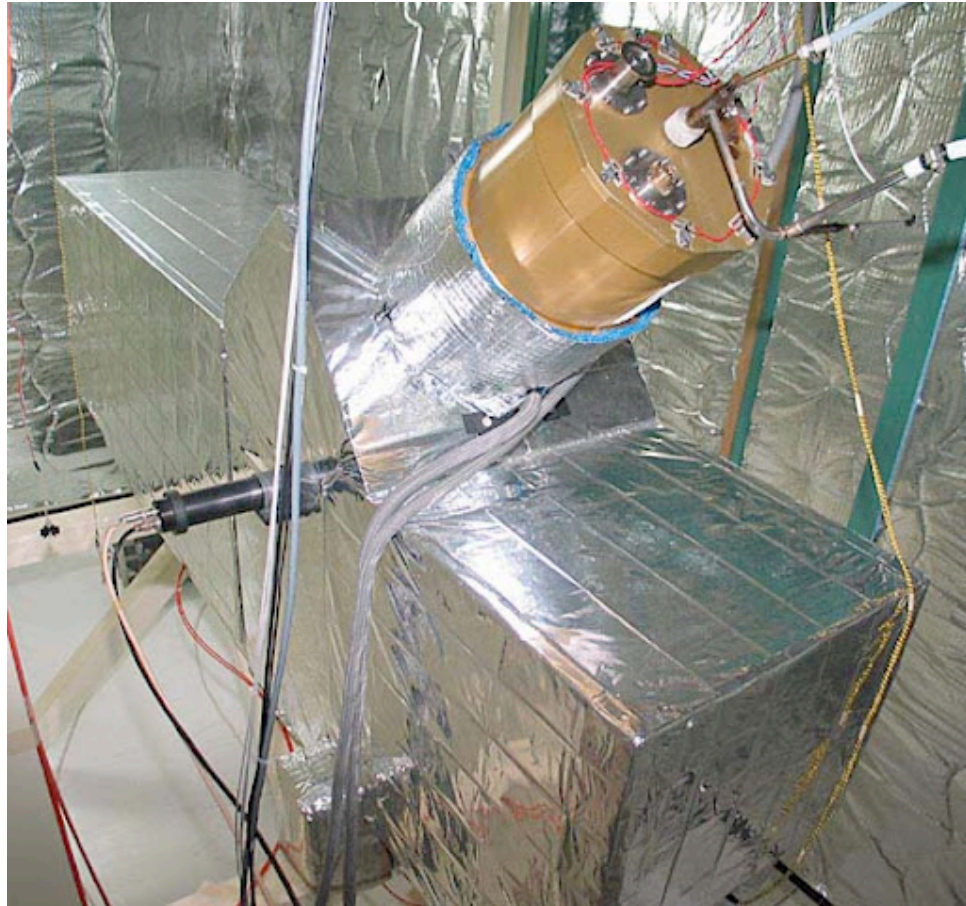
A. Baranne¹, D. Queloz², M. Mayor², G. Adrianzyk³, G. Knispel³, D. Kohler³, D. Lacroix³, J.-P. Meunier³, G. Rimbaud³ and A. Vin³

¹ Observatoire de Marseille, 2 Place Le Verrier, F-13248 Marseille, France

² Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

³ Observatoire de Haute-Provence, F-04870 Saint Michel l'Observatoire, France

Received September 28, 1995; accepted February 15, 1996



OHP

CNRS

En 1995, sur le télescope de 193cm
équipé du spectrographe ELODIE,
Michel Mayor et Didier Queloz
découvraient la première planète
extrasolaire 51 Pegb autour
d'une étoile autre que le Soleil.