

# Magnétisme des étoiles naines M : la révolution SPIRou

*Julien Morin, Stefano Bellotti, Andres Carmona, Pia Cortés-Zuleta, Paul Cristofari, Xavier Delfosse, Jean-Francois Donati, Colin Folsom, Pascal Fouque, Thomas Gastine, Laurène Jouve, Baptiste Klein, Lisa Theresa Lehmann, Claire Moutou, Pascal Petit, Bonnie Zaire*

*Laboratoire Univers et Particules de Montpellier*

*Colloque de prospective du PNPS – Marseille – 09 janvier 2024*

# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 Mesure du champ à petite échelle
- 5 Résumé et remarques finales

# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 Mesure du champ à petite échelle
- 5 Résumé et remarques finales

# SPIRou: SPectropolarimètre InfraRouge

## ■ Spectrographe nIR HR

- $0.98\text{--}2.5\ \mu\text{m}$
- $R = 75\,000$

## ■ Vélocimétrie précise

- précision RV cible  $1\ \text{m/s}$

## ■ Polarimétrie

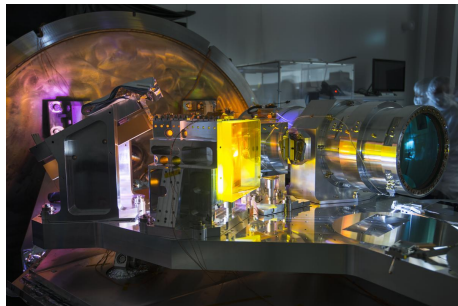
- circulaire & linéaire  $10\ \text{ppm}$

## ■ monté au TCFH 3.6 m

→ *Donati et al. (2020)*

## ■ 2 grands relevés consécutifs

- SLS (2019-2022)
- SPICE (2022-2024)
- détection/confirmation d'exoplanètes naines M
- Magnétisme et formation stellaire



*spectrographe de SPIRou*

Crédit: Équipe SPIRou / S. Chastanet – CNRS/OMP

# Synergie exoplanètes / magnétisme stellaire

## ■ Point de vue exoplanètes

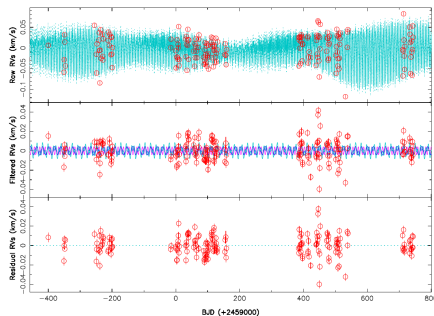
- filtrage activité stellaire
- « météo spatiale »

## ■ Point de vue stellaire

- dynamos stellaires
- cycles magnétiques
- évolution rotationnelle

## ■ Synergie

- grand échantillon
- étoiles modérément-faiblement actives
- observations répétées, échantillonnage dense



*Filtrage activité vitesses radiales AU Mic*

*Donati et al. (2023)*

# Synergie exoplanètes / magnétisme stellaire

## ■ Point de vue exoplanètes

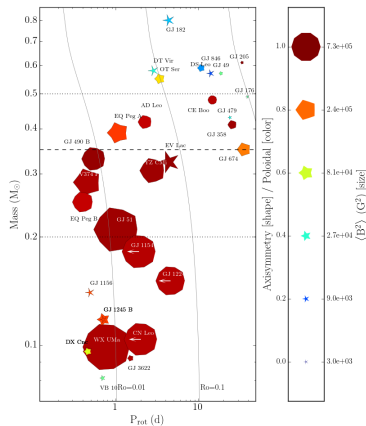
- filtrage activité stellaire
- « météo spatiale »

## ■ Point de vue stellaire

- dynamos stellaires
- cycles magnétiques
- évolution rotationnelle

## ■ Synergie

- grand échantillon
- étoiles modérément-faiblement actives
- observations répétées, échantillonnage dense



*Donati et al. (2008), Morin et al. (2008-2010), Hébrard et al. (2016), Moutou et al. (2018)*

# Synergie exoplanètes / magnétisme stellaire

## ■ Point de vue exoplanètes

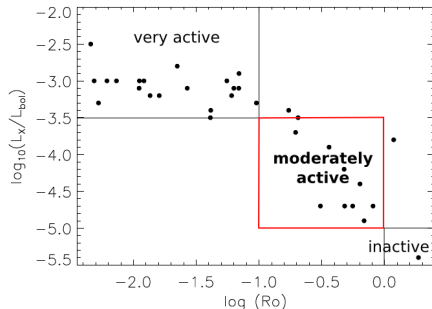
- filtrage activité stellaire
- « météo spatiale »

## ■ Point de vue stellaire

- dynamos stellaires
- cycles magnétiques
- évolution rotationnelle

## ■ Synergie

- grand échantillon
- étoiles modérément-faiblement actives
- observations répétées, échantillonnage dense



Adapted from *Reiners et al. (2009)*

# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 Mesure du champ à petite échelle
- 5 Résumé et remarques finales



# Magnétisme des rotateurs lents (1/2)

## ■ Échantillon 43 étoiles

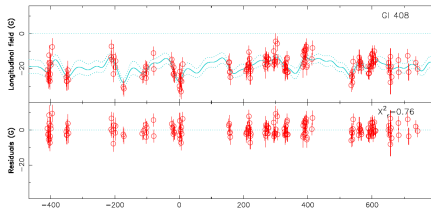
- M0V-M5.5V / 0,12-0,58  $M_{\odot}$
- biaisé vers faible activité  
*Moutou et al. (2018)*

## ■ Résultats

- 40/43 détection  $B_{\ell}$
- 30/43 détection période
- indications champ grande échelle
  - intense à  $P_{\text{rot}} > 100$  j
  - ★ tardives moins axisym.  
et variabilité plus lente

*Fouqué et al. (2023)*

*Donati et al. (2023)*



*Modulation rotationnelle  $B_{\ell}$  GI 408*

$$P_{\text{rot}} = 172 \text{ j}$$

*Donati et al. (2023)*

# Magnétisme des rotateurs lents (2/2)

## ■ Études de 6 rotateurs lents actifs

- M2.5V-M5V / 0,15-0,45  $M_{\odot}$
- $P_{\text{rot}} = 38 - 187$  j

## ■ Analyse par PCA pondérée

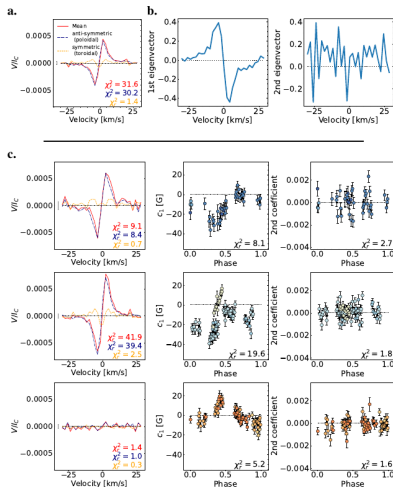
- cf. *Lehmann & Donati (2022)*
- profil moyen  $\rightarrow$  champ axisym.
- résidu  $\rightarrow$  wPCA  $\rightarrow$  non-axisym.

## ■ Analyse par ZDI

- reconstruction magnétogrammes
- $\rightarrow$  confirme déviation relation  $\text{Ro}-B_V$
- $\rightarrow$  confirme variabilité temporelle importante

## ■ Simulations numériques

- *Zaire et al. (2022)*
- Ro paramètre pertinent ?



GI 905 – décomposition PCA

*Lehmann et al. (2024)*

# Magnétisme des rotateurs lents (2/2)

## ■ Études de 6 rotateurs lents actifs

- M2.5V-M5V / 0,15-0,45  $M_{\odot}$
- $P_{\text{rot}} = 38 - 187$  j

## ■ Analyse par PCA pondérée

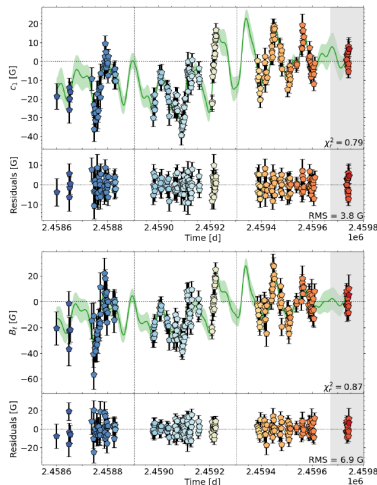
- cf. [Lehmann & Donati \(2022\)](#)
- profil moyen  $\rightarrow$  champ axisym.
- résidu  $\rightarrow$  wPCA  $\rightarrow$  non-axisym.

## ■ Analyse par ZDI

- reconstruction magnétogrammes
- $\rightarrow$  confirme déviation relation  $\text{Ro}-B_V$
- $\rightarrow$  confirme variabilité temporelle importante

## ■ Simulations numériques

- [Zaire et al. \(2022\)](#)
- Ro paramètre pertinent ?



GI 905 – modèles GP  
[Lehmann et al. \(2024\)](#)

# Magnétisme des rotateurs lents (2/2)

## ■ Études de 6 rotateurs lents actifs

- M2.5V-M5V / 0,15-0,45  $M_{\odot}$
- $P_{\text{rot}} = 38 - 187$  j

## ■ Analyse par PCA pondérée

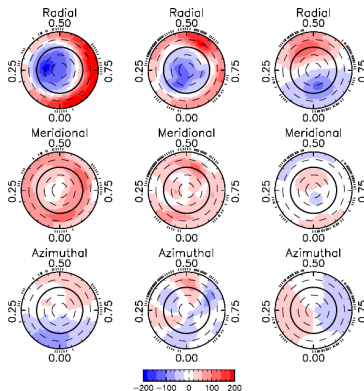
- cf. *Lehmann & Donati (2022)*
- profil moyen  $\rightarrow$  champ axisym.
- résidu  $\rightarrow$  wPCA  $\rightarrow$  non-axisym.

## ■ Analyse par ZDI

- reconstruction magnétogrammes
- $\rightarrow$  confirme déviation relation  $R_o - B_V$
- $\rightarrow$  confirme variabilité temporelle importante

## ■ Simulations numériques

- *Zaire et al. (2022)*
- $R_o$  paramètre pertinent ?



Gl 905 – cartes ZDI  
*Lehmann et al. (2024)*

# Magnétisme des rotateurs lents (2/2)

## ■ Études de 6 rotateurs lents actifs

- M2.5V-M5V / 0,15-0,45  $M_{\odot}$
- $P_{\text{rot}} = 38 - 187$  j

## ■ Analyse par PCA pondérée

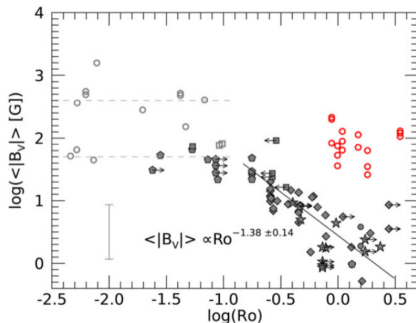
- cf. [Lehmann & Donati \(2022\)](#)
- profil moyen  $\rightarrow$  champ axisym.
- résidu  $\rightarrow$  wPCA  $\rightarrow$  non-axisym.

## ■ Analyse par ZDI

- reconstruction magnétogrammes
- $\rightarrow$  confirme déviation relation  $Ro-B_V$
- $\rightarrow$  confirme variabilité temporelle importante

## ■ Simulations numériques

- [Zaire et al. \(2022\)](#)
- $Ro$  paramètre pertinent ?



[Lehmann et al. \(2024\)](#)

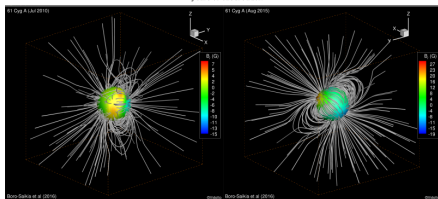
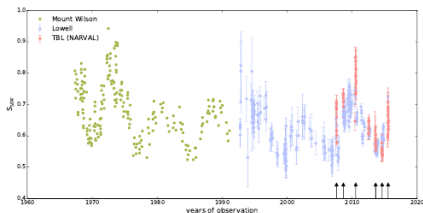
# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 Mesure du champ à petite échelle
- 5 Résumé et remarques finales

# Évolution des champs magnétiques et cycles (1/2)

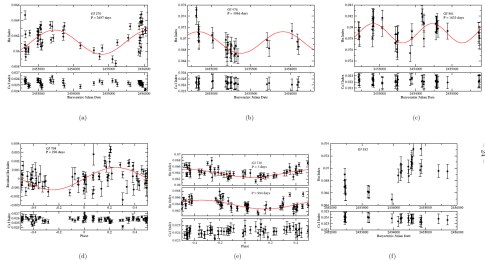
- Cycles détectés pour  $\star$  FGK
  - lien activité / inversion polarités
- Cycles d'activité pour naines M ?
  - activité chromosphérique
  - polarisation radio
  - mais pas d'observation de renversement de polarités
- Explication alternative bistabilité
  - existence de cycles long ?  
*Kitchatinov et al. (2014)*



Cycles d'activité de 61 Cyg A (K5V)  
*Boro-Saikia et al. (2016)*

# Évolution des champs magnétiques et cycles (1/2)

- Cycles détectés pour  $\star$  FGK
  - lien activité / inversion polarités
- Cycles d'activité pour naines M ?
  - activité chromosphérique
  - polarisation radio
  - mais pas d'observation de renversement de polarités
- Explication alternative bistabilité
  - existence de cycles long ?  
*Kitchatinov et al. (2014)*

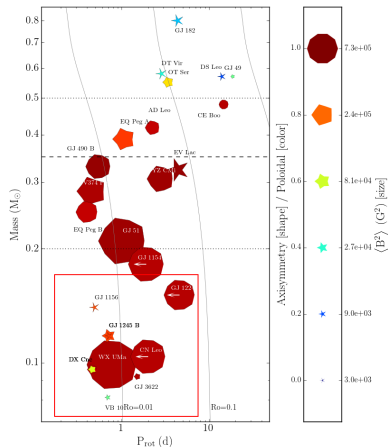


*Cycles chromosphériques naines M*  
*Robertson et al. (2013)*



# Évolution des champs magnétiques et cycles (1/2)

- Cycles détectés pour  $\star$  FGK
  - lien activité / inversion polarités
- Cycles d'activité pour naines M ?
  - activité chromosphérique
  - polarisation radio
  - mais pas d'observation de renversement de polarités
- Explication alternative bistabilité
  - existence de cycles long ?  
*Kitchatinov et al. (2014)*



*Bistabilité naines M tardives ?*  
*Morin et al. (2010)*

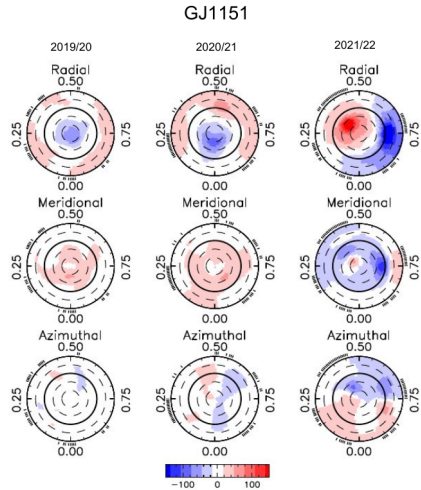
# Évolution des champs magnétiques et cycles (2/2)

## ■ Rotateurs lents

- GJ 1151 : renversement de polarités
- GJ 905 : basculement du dipôle

## ■ Rotateurs rapides

- base de  $\sim 15$  ans
- AD Leo : basculement du dipôle + évolution de  $B_I$
- évolution plus limitée pour 3 autres étoiles



*Lehmann et al. (2024)*

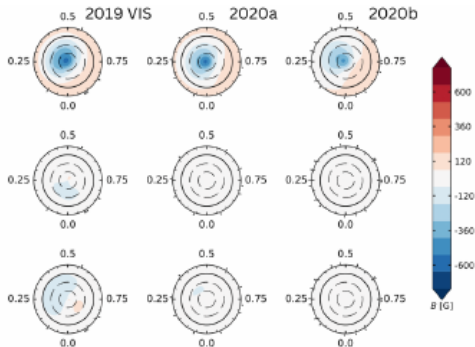
# Évolution des champs magnétiques et cycles (2/2)

## ■ Rotateurs lents

- GJ 1151 : renversement de polarités
- GJ 905 : basculement du dipôle

## ■ Rotateurs rapides

- base de  $\sim 15$  ans
- AD Leo : basculement du dipôle + évolution de  $B_l$
- évolution plus limitée pour 3 autres étoiles



AD Leo

*Bellotti et al. (2023)*

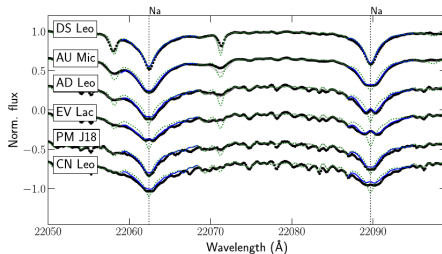
# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 **Mesure du champ à petite échelle**
- 5 Résumé et remarques finales

# Mesure du champ à petite échelle

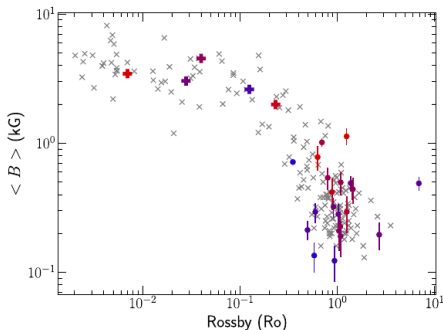
- Stokes I : pas d'annulation des polarités opposées
- Modélisation du spectre raie par raie
  - développement de ZeeTurbo
  - relation  $R_o - B_I - B_V$
  - modèle multi-composantes
  - paramètres stellaires non-biaisés
- Modélisation simultanée I V
  - développement de ZeeTurbo
  - modèle compatible IV
  - généralisable ?
- Prise en compte raies moléculaires



*Cristofari et al. (2023a)*

# Mesure du champ à petite échelle

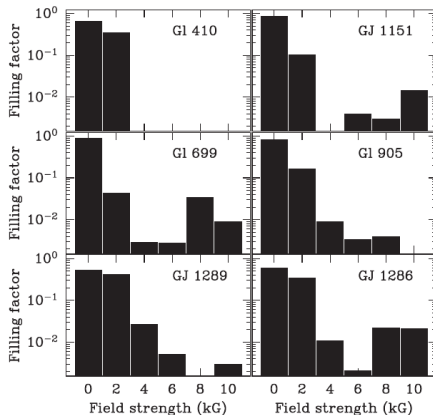
- Stokes I : pas d'annulation des polarités opposées
- Modélisation du spectre raie par raie
  - développement de ZeeTurbo
  - relation  $Ro-B_I-B_V$
  - modèle multi-composantes
  - paramètres stellaires non-biaisés
- Modélisation simultanée I V
  - développement de ZeeTurbo
  - modèle compatible IV
  - généralisable ?
- Prise en compte raies moléculaires



*Cristofari et al. (2023b)*

# Mesure du champ à petite échelle

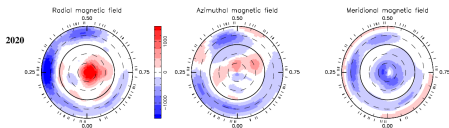
- Stokes I : pas d'annulation des polarités opposées
- Modélisation du spectre raie par raie
  - développement de ZeeTurbo
  - relation  $R_0 - B_I - B_V$
  - modèle multi-composantes
  - paramètres stellaires non-biaisés
- Modélisation simultanée I V
  - développement de ZeeTurbo
  - modèle compatible IV
  - généralisable ?
- Prise en compte raies moléculaires



*Cristofari et al. (2023b)*

# Mesure du champ à petite échelle

- Stokes I : pas d'annulation des polarités opposées
- Modélisation du spectre raie par raie
  - développement de ZeeTurbo
    - relation  $R_o$ - $B_I$ - $B_V$
    - modèle multi-composantes
    - paramètres stellaires non-biaisés
- Modélisation simultanée I V
  - développement de ZeeTurbo
    - modèle compatible IV
    - généralisable ?
- Prise en compte raies moléculaires



*Magnétogramme IV pour AU Mic*  
*Donati et al. (2023)*



# Outline

---

- 1 SPIRou et les grands relevés TCHF
- 2 Magnétisme des rotateurs lents
- 3 Évolution des champs magnétiques et cycles
- 4 Mesure du champ à petite échelle
- 5 Résumé et remarques finales

# Résumé et remarques finales

## ■ SPIRou et relevés SLS/SPICE

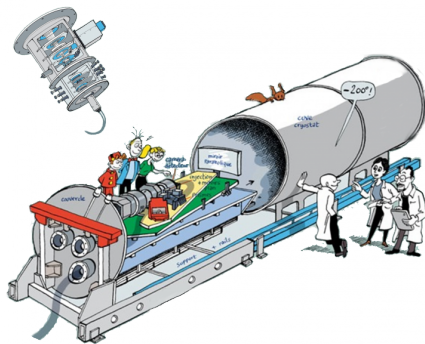
- optimisé pour étude étoiles froides
- synergie programmes exoplanètes

## ■ Résultats

- développement de nouveaux outils
- rotateurs lents
- cycles magnétiques
- mesures champ à petite échelle

## ■ Perspectives

- exploitation relevé SPICE
- extension SpT tardifs
- lien magnétisme / rotation
- synergies autres domaines / instruments



*SPIRou – Credit: Éditions Dupuis*