

Magnétisme stellaire à travers la limite entièrement convective

Julien Morin

Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse–Tarbes
Dublin Institute for Advanced Studies

J. F. Donati, P. Petit
X. Delfosse, T. Forveille
M. M. Jardine

LATT – CNRS / Université de Toulouse
LAOG – CNRS / Université de Grenoble
University of St Andrews

Forum de renouvellement du PNPS 6–8 Octobre 2010 Marseille



Dynamos solaire et stellaires

Champ magnétique

- Source d'énergie de l'activité
- Cycles magnétiques

Dynamo $\alpha\Omega$

- Rotation différentielle
- Convection cyclonique

Partiellement convectives

- Relation rotation-activité, cycles
- Structure interne
- ➡ Dynamo similaire au Soleil

Dynamos solaire et stellaires

Champ magnétique

- Source d'énergie de l'activité
- Cycles magnétiques

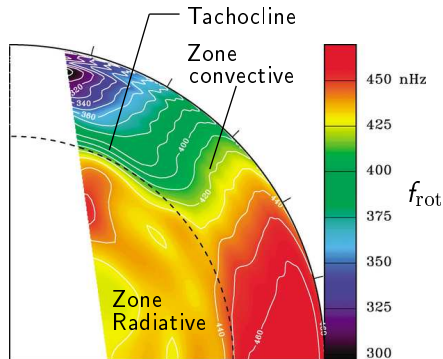
Dynamo $\alpha\Omega$

- Rotation différentielle
- Convection cyclonique

➔ Tachocline : rôle crucial ?

Partiellement convectives

- Relation rotation-activité, cycles
 - Structure interne
- ➔ Dynamo similaire au Soleil



Schou et al. (1998); d'après données SOHO-MDI

Dynamos solaire et stellaires

Champ magnétique

- Source d'énergie de l'activité
- Cycles magnétiques

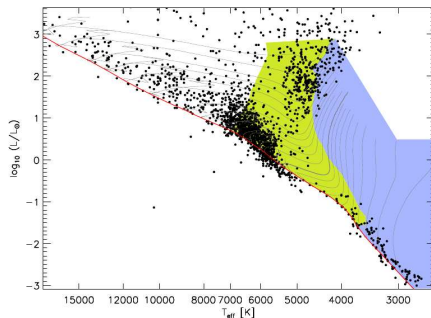
Dynamo $\alpha\Omega$

- Rotation différentielle
- Convection cyclonique

➔ Tachocline : rôle crucial ?

Partiellement convectives

- Relation rotation-activité, cycles
 - Structure interne
- ➔ Dynamo similaire au Soleil



Reiners (2007), d'après modèles de Siess et al. (2002)

Dynamo des étoiles entièrement convectives

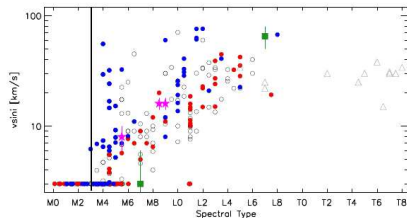
Limite EC : $M_{\star} \sim 0.35 M_{\odot}$ (M3)

- ~~Tachocline~~ → ~~dynamo solaire~~
- Activité / Champ magnétique
- Rotation / Temps d'activité

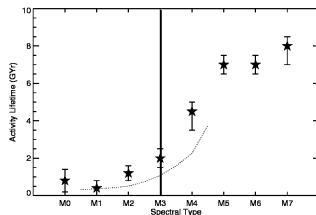
- Champ à grande échelle
- Topologie plus simple

Modélisation

- Études théoriques
 - Durney et al. (1993) Chabrier & Kaler (2000)
- Simulations numériques
 - Dobler et al. (2006) Browning (2008)



Reiners & Basri (2008)



West et al. (2008)

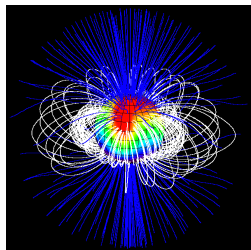
Dynamo des étoiles entièrement convectives

Limite EC : $M_{\star} \sim 0.35 M_{\odot}$ (M3)

- ~~Tachocline~~ → ~~dynamo solaire~~
 - Activité / Champ magnétique
 - Rotation / Temps d'activité
-
- Champ à grande échelle
 - Topologie plus simple

Modélisation

- Études théoriques
 - ▶ Durney et al. (1993) Chabrier & Kaler (2006)
- Simulations numériques
 - ▶ Dobler et al. (2006) Browning (2008)



Donati et al. (2006)

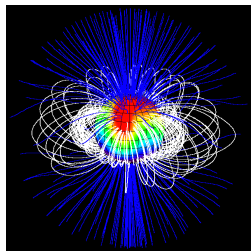
Dynamo des étoiles entièrement convectives

Limite EC : $M_{\star} \sim 0.35 M_{\odot}$ (M3)

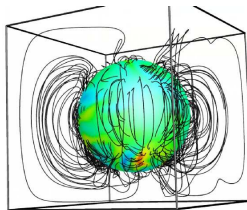
- ~~Tachocline~~ → ~~dynamo solaire~~
 - Activité / Champ magnétique
 - Rotation / Temps d'activité
-
- Champ à grande échelle
 - Topologie plus simple

Modélisation

- Études théoriques
 - ▶ *Durney et al. (1993) Chabrier & Küker (2006)*
- Simulations numériques
 - ▶ *Dobler et al. (2006) Browning (2008)*



Donati et al. (2006)



Dobler et al. (2006)

Dynamo des étoiles entièrement convectives

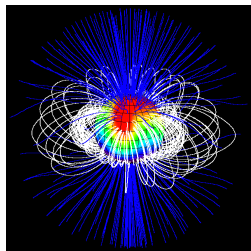
Limite EC : $M_{\star} \sim 0.35 M_{\odot}$ (M3)

- ~~Tachocline~~ → ~~dynamo solaire~~
 - Activité / Champ magnétique
 - Rotation / Temps d'activité
-
- Champ à grande échelle
 - Topologie plus simple

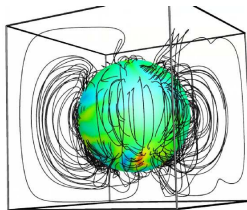
Modélisation

- Études théoriques
 - ▶ *Durney et al. (1993) Chabrier & Küker (2006)*
- Simulations numériques
 - ▶ *Dobler et al. (2006) Browning (2008)*

- Génération / Propriétés de **B** ?
- Survey spectropolarimétrique



Donati et al. (2006)



Dobler et al. (2006)

Spectropolarimétrie et Imagerie Zeeman-Doppler

Effet Zeeman

- Élargissement des raies (I)
- Signatures polarisées (Q,U,V)
 - ➔ Géométrie/Composante grande échelle

ZDI : principe

- Effect Doppler
- Modulation rotationnelle
 - ▶ Magnétogramme vecteur **B**

Description de **B**

- SH + Poloïdal/Toroïdal
 - ▶ Champ physique
 - ▶ Topologies globales
- Rotation différentielle

Spectropolarimétrie et Imagerie Zeeman-Doppler

Effet Zeeman

- Élargissement des raies (I)
- Signatures polarisées (Q,U,V)
 - ➔ Géométrie/Composante grande échelle

ZDI : principe

- Effect Doppler
- Modulation rotationnelle
 - ▶ Magnétogramme vecteur **B**

Description de **B**

- SH + Poloïdal/Toroïdal
 - ▶ Champ physique
 - ▶ Topologies globales
- Rotation différentielle

Présentation de l'étude

- Multi-raies + Nouvelle génération d'instruments ESPaDOnS/NARVAL
- ➔ Étude systématique du diagramme H-R

Objectifs

- Masse
 - ▶ Profondeur/présence de la zone convective
- Rotation
 - ➔ Topologie magnétique
 - ➔ Rotation différentielle

Échantillon

- 23 étoiles M0–M8
 - ▶ $0.08 < M_* < 0.75 M_\odot$
 - ▶ $0.33 < P_{\text{rot}} < 18.6 \text{ j}$
- Actives ➔ *Delfosse et al. (1998)*

Paramètres stellaires

- Masse : luminosité nR
- Rotation
 - ▶ Spectropolarimétrie
 - ▶ Photométrie (8 étoiles)

Observations

- Séries temporelles
- Polarisation circulaire
- Polarisation linéaire
 - ▶ Faible amplitude
 - ▶ Reconstruction possible

Présentation de l'étude

- Multi-raies + Nouvelle génération d'instruments ESPaDOnS/NARVAL
- ➔ Étude systématique du diagramme H-R

Objectifs

- Masse
 - ▶ Profondeur/présence de la zone convective
- Rotation
 - ➔ Topologie magnétique
 - ➔ Rotation différentielle

Échantillon

- 23 étoiles M0–M8
 - ▶ $0.08 < M_{\star} < 0.75 M_{\odot}$
 - ▶ $0.33 < P_{\text{rot}} < 18.6 \text{ j}$
- Actives ➔ *Delfosse et al. (1998)*

Paramètres stellaires

- Masse : luminosité nLR
- Rotation
 - ➔ Spectropolarimétrie
 - ➔ Photométrie (8 étoiles)

Observations

- Séries temporelles
- Polarisation circulaire
- Polarisation linéaire
 - ➔ Faible amplitude
 - ➔ Reconstruction possible

Présentation de l'étude

- Multi-raies + Nouvelle génération d'instruments ESPaDOnS/NARVAL
- ➔ Étude systématique du diagramme H-R

Objectifs

- Masse
 - ▶ Profondeur/présence de la zone convective
- Rotation
- ➔ Topologie magnétique
- ➔ Rotation différentielle

Échantillon

- 23 étoiles M0–M8
 - ▶ $0.08 < M_{\star} < 0.75 M_{\odot}$
 - ▶ $0.33 < P_{\text{rot}} < 18.6 \text{ j}$
- Actives ➔ *Delfosse et al. (1998)*

Paramètres stellaires

- Masse : luminosité nLR
- Rotation
 - ▶ Spectropolarimétrie
 - ▶ Photométrie (8 étoiles)

Observations

- Séries temporelles
- Polarisation circulaire
- Polarisation linéaire
 - ▶ Faible amplitude
 - ▶ Reconstruction possible

Présentation de l'étude

- Multi-raies + Nouvelle génération d'instruments ESPaDOnS/NARVAL
- ➔ Étude systématique du diagramme H-R

Objectifs

- Masse
 - ▶ Profondeur/présence de la zone convective
- Rotation
 - ➔ Topologie magnétique
 - ➔ Rotation différentielle

Échantillon

- 23 étoiles M0–M8
 - ▶ $0.08 < M_{\star} < 0.75 M_{\odot}$
 - ▶ $0.33 < P_{\text{rot}} < 18.6 \text{ j}$
- Actives ➔ *Delfosse et al. (1998)*

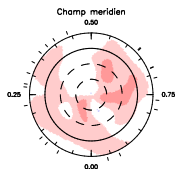
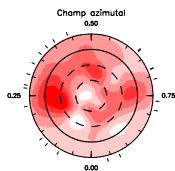
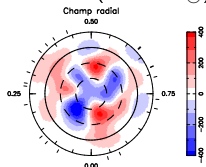
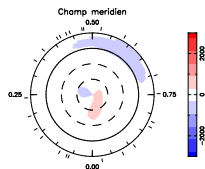
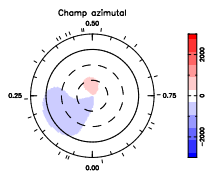
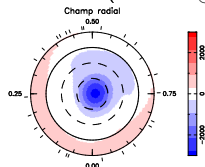
Paramètres stellaires

- Masse : luminosité nR
- Rotation
 - ▶ Spectropolarimétrie
 - ▶ Photométrie (8 étoiles)

Observations

- Séries temporelles
- Polarisation circulaire
- ~~Polarisation linéaire~~
 - ▶ Faible amplitude
 - ▶ Reconstruction possible

Exemples de reconstruction

DT Vir (0.59 M_{\odot})YZ CMi (0.25 M_{\odot})

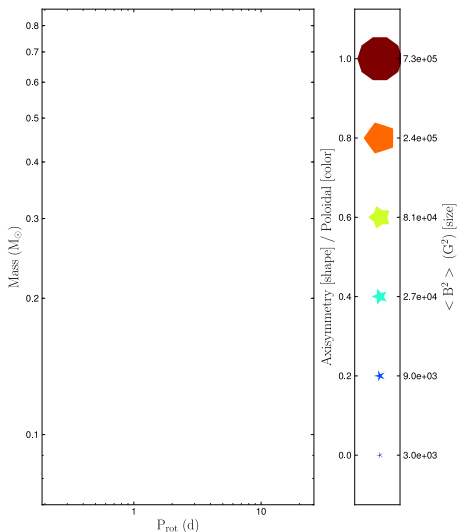
DT Vir

- Partiellement convective
- B_r complexe
- Anneau coaxial B_{ϕ}
- $\langle B \rangle = 150$ G
- $B_{\max} = 500$ G
- $d\Omega \gtrsim d\Omega_{\odot}$

YZ CMi

- Entièrement convective
- Tache polaire B_r
- Axisymétrique
 - ▶ $\langle B \rangle = 560$ G
 - ▶ $B_{\max} = 2900$ G
- $d\Omega < \frac{d\Omega_{\odot}}{10}$

Diagramme masse–période



Paramètres stellaires

- Masse
- Période de rotation

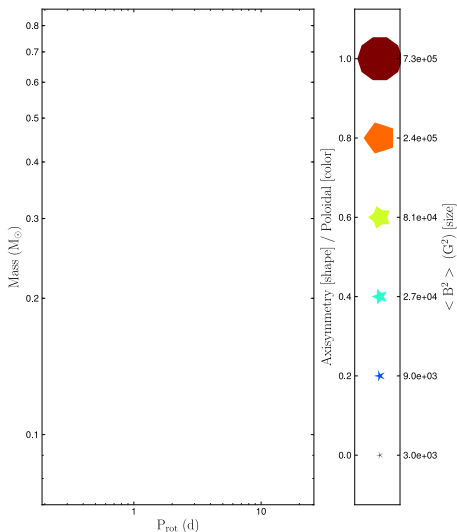
Topologies magnétiques

- Énergie magnétique
- Poloïdal/toroïdal
- Axisymétrie

Nombre de Rossby

$$Ro = \frac{P_{\text{rot}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force de Coriolis}}$$

Diagramme masse–période



Paramètres stellaires

- Masse
- Période de rotation

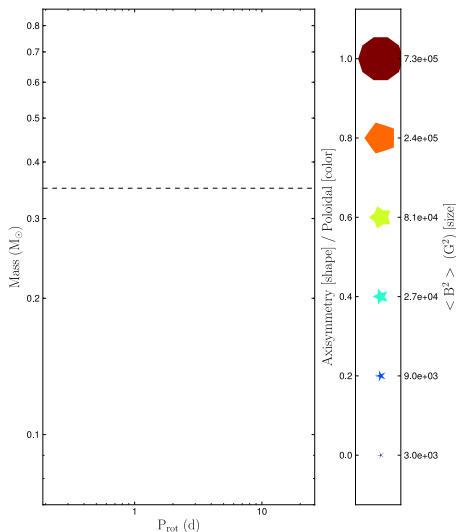
Topologies magnétiques

- Énergie magnétique
- Poloïdal/toroïdal
- Axisymétrie

Nombre de Rossby

$$Ro = \frac{P_{\text{rot}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force de Coriolis}}$$

Diagramme masse–période



Paramètres stellaires

- Masse
- Période de rotation

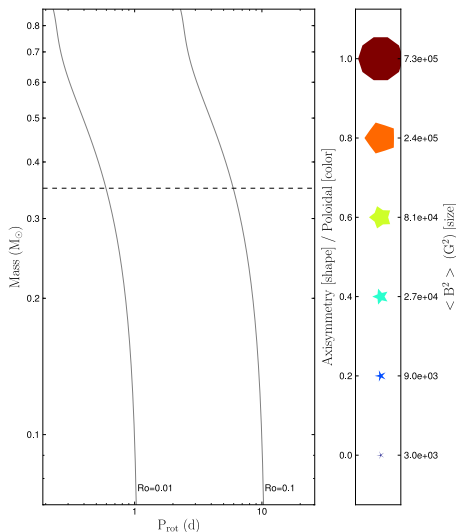
Topologies magnétiques

- Énergie magnétique
- Poloïdal/toroïdal
- Axisymétrie

Nombre de Rossby

$$Ro = \frac{P_{\text{rot}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force de Coriolis}}$$

Diagramme masse–période



Paramètres stellaires

- Masse
- Période de rotation

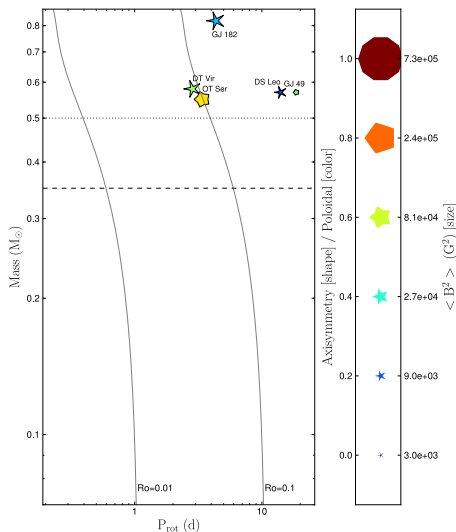
Topologies magnétiques

- Énergie magnétique
- Poloïdal/toroïdal
- Axisymétrie

Nombre de Rossby

$$Ro = \frac{P_{\text{rot}}}{\tau_{\text{conv}}} = \frac{\text{Force d'inertie}}{\text{Force de Coriolis}}$$

Résultats : $M_{\star} > 0.5 M_{\odot}$



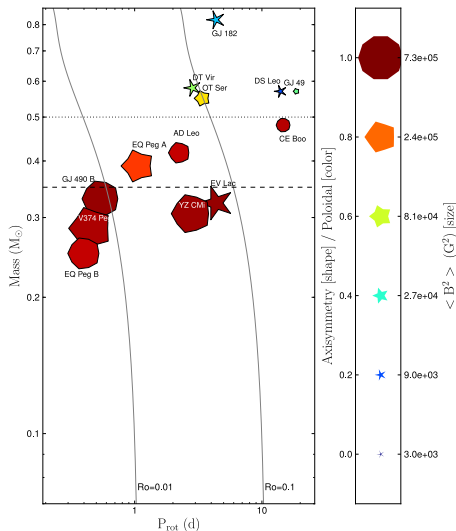
Champ magnétique

- Composante toroïdale
 - ▶ Significative voire prépondérante
- Composante poloïdale
 - ▶ Non-axisymétrique

Rotation différentielle

- $d\Omega \gtrsim d\Omega_{\odot}$
- Courte durée de vie des structures

Donati et al. (2008)

Résultats : $0.2 < M_{\star} < 0.5 M_{\odot}$ 

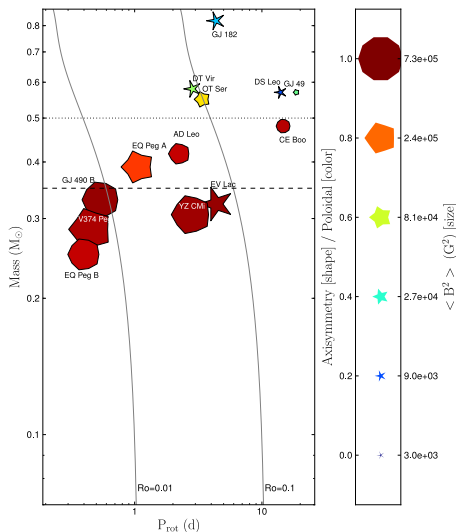
Champ magnétique

- Poloïdal
- Axisymétrique
- Plus intense
- ↪ \sim Dipôle

Rotation différentielle

- $d\Omega \simeq \frac{d\Omega_{\odot}}{10}$
- Structures stables

Morin et al. (2008a,b) Phan-Bao et al. (2009)

Résultats : $0.2 < M_{\star} < 0.5 M_{\odot}$ 

Champ magnétique

- Poloïdal
- Axisymétrique
- Plus intense
- ↪ ~ Dipôle

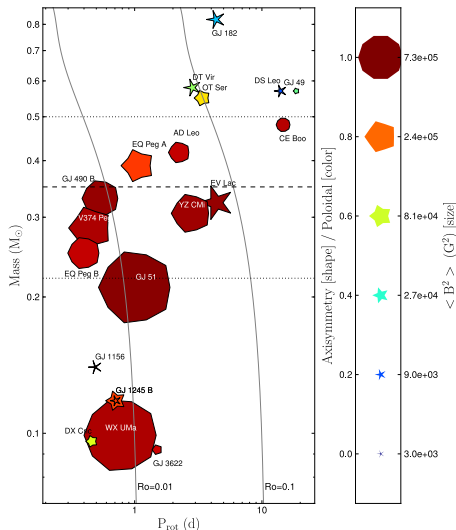
Rotation différentielle

- $d\Omega \simeq \frac{d\Omega_{\odot}}{10}$
- Structures stables

- ➔ Transition rapide
 - ➔ Limite entièrement convective
 - ➔ Accord partiel avec DNS
- Browning (2008)*

Morin et al. (2008a,b) Phan-Bao et al. (2009)

Résultats : $M_{\star} < 0.2 M_{\odot}$



Deux groupes d'étoiles

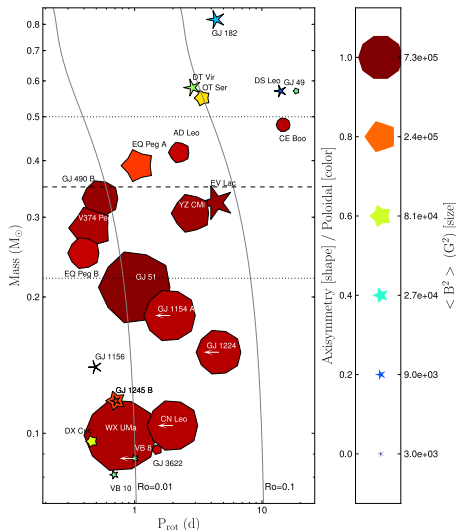
- Champs magnétiques différents
 - ▶ \sim dipole intense
 - ▶ champ plus faible, non-axisymétrique
- Param. stellaires similaires
- Pas d'état intermédiaire?

Explication ?

- 2 modes dynamos possibles ?
- Basculement entre 2 états ?

Morin et al. (2010)

Résultats : $M_{\star} < 0.2 M_{\odot}$



Deux groupes d'étoiles

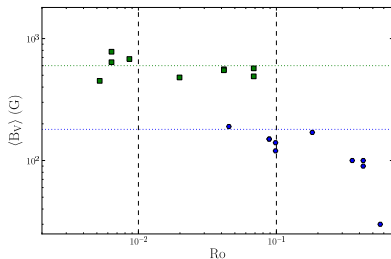
- Champs magnétiques différents
 - ▶ \sim dipole intense
 - ▶ champ plus faible, non-axisymétrique
- Param. stellaires similaires
- Pas d'état intermédiaire?

Explication ?

- 2 modes dynamos possibles ?
- Basculement entre 2 états ?

Morin et al. (2010)

Résultats : effets de la rotation



Large-scale magnetic flux

■ Frontière à $0.4 M_{\odot}$

- ▶ $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 180 \text{ G}$
- ▶ $M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 600 \text{ G}$

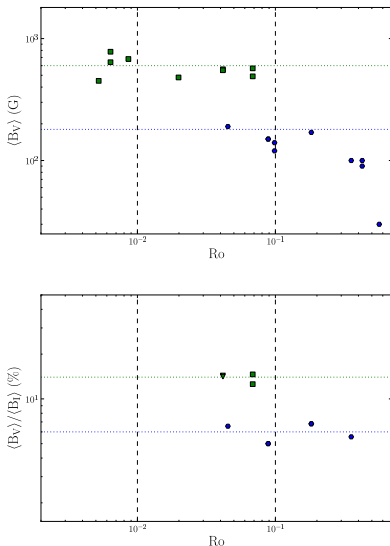
Rapport des flux magnétiques à grande échelle et total

■ Intensité / raies moléculaires FeH

▶ *Reiners & Basri (2007)*

- $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 6\%$
- $0.2 < M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 14\%$

Résultats : effets de la rotation



Large-scale magnetic flux

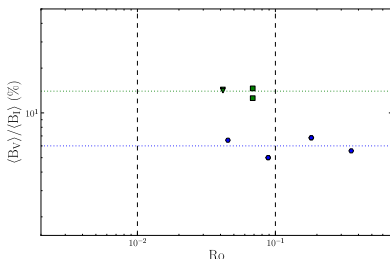
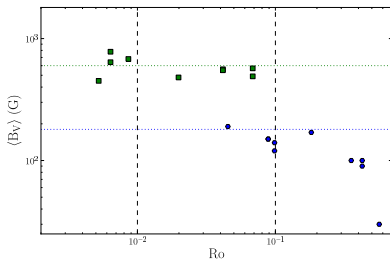
- Frontière à $0.4 M_{\odot}$
 - ▶ $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 180$ G
 - ▶ $M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 600$ G

Rapport des flux magnétiques à grande échelle et total

- Intensité / raies moléculaires FeH
 - ▶ *Reiners & Basri (2007)*
- $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 6\%$
- $0.2 < M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 14\%$

Donati et al. (2008)

Résultats : effets de la rotation



Large-scale magnetic flux

- Frontière à $0.4 M_{\odot}$
 - $M_{\star} > 0.4 M_{\odot} : B_{\text{sat}} \simeq 180 \text{ G}$
 - $M_{\star} < 0.4 M_{\odot} : B_{\text{sat}} \simeq 600 \text{ G}$

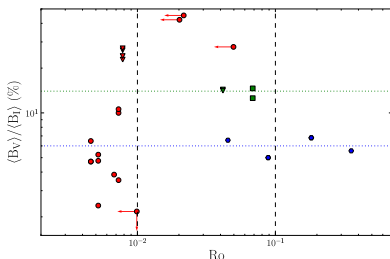
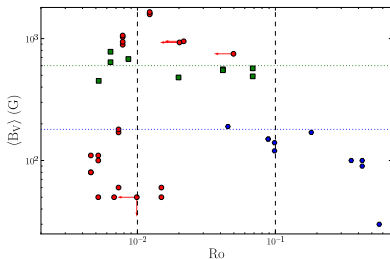
Rapport des flux magnétiques à grande échelle et total

- Intensité / raies moléculaires FeH
 - *Reiners & Basri (2007)*
- $M_{\star} > 0.4 M_{\odot} : \simeq 6\%$
- $0.2 < M_{\star} < 0.4 M_{\odot} : \simeq 14\%$

Génération plus efficace
de champ à grande échelle

Donati et al. (2008)

Résultats : effets de la rotation



Large-scale magnetic flux

■ Frontière à $0.4 M_{\odot}$

- ▶ $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 180 \text{ G}$
- ▶ $M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $B_{\text{sat}} \simeq 600 \text{ G}$

Rapport des flux magnétiques à grande échelle et total

■ Intensité / raies moléculaires FeH

▶ *Reiners & Basri (2007)*

- $M_{\star} > 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 6\%$
- $0.2 < M_{\star} < 0.4 M_{\odot}$: $\simeq 14\%$

Génération plus efficace
de champ à grande échelle

Donati et al. (2008) Morin et al. (2010)

Résumé et Perspectives

- Méthodes multi-raies + spectropolarimètres de nouvelle génération
- ➔ Étude d'un échantillon de part et d'autre de la limite EC

Résultats principaux

- Limite EC : transition abrupte
 - ➔ Topologie magnétiques
 - ➔ Spectre d'énergie magnétiques
- Très faibles masses : 2 groupes
 - ▶ Topologies très différentes
 - ▶ Paramètres stellaires similaires

Travaux en cours et futurs

- Suivi long-terme / extension
- Champs magnétique des cTTS
- Évolution du moment angulaire
- SPIRou@CFHT : nIR (2015)

