

# Que nous apprennent les simulations numériques sur le magnétisme stellaire?

Laurène JOUVE

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)

Février 2014

# Magnétisme stellaire interne

## Quelques questions ouvertes

- Origine (dynamo, fossile)
- Configuration (topologie, amplitude)
- Evolution temporelle (cycles, variabilité)
- Transport et manifestations en surface (taches)
- Effets sur la structure et l'évolution (transport du moment cinétique)

# L'approche par les simulations numériques

## 2D vs 3D

### Approche 2D :

- Version simplifiée des équations
- Plus rapide/efficace

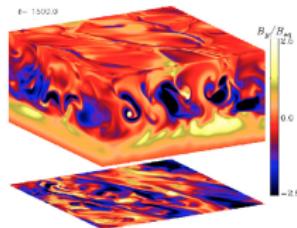
### Approche 3D :

- Version plus complète des équations
- Plus difficile à mettre en place

## Locales vs Globales

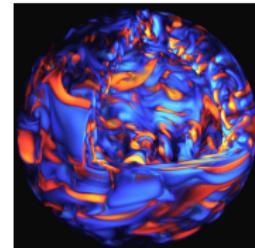
### Locales :

- Etude détaillée d'un processus physique particulier

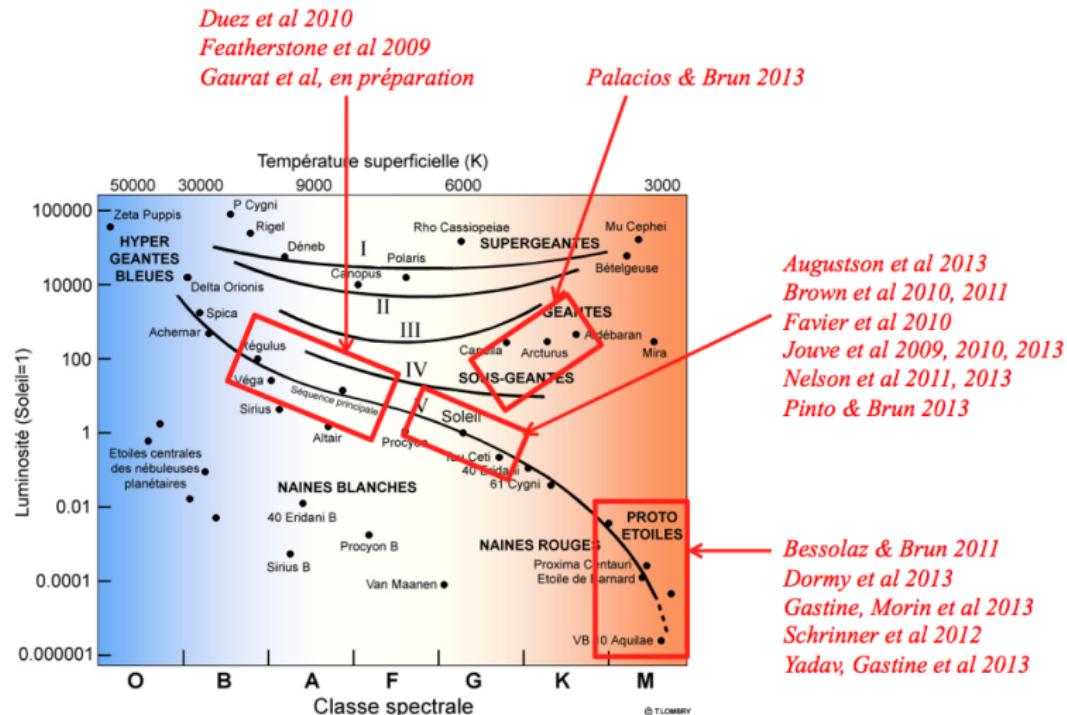


### Globales :

- Effets de la géométrie parfois essentiels

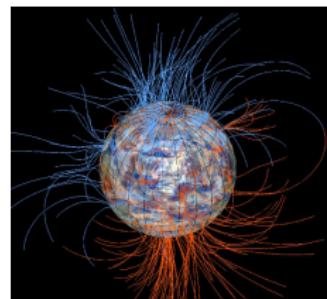
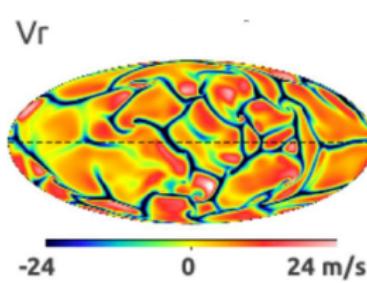


# Diverses études numériques pour divers types d'étoiles



# Diverses études numériques pour divers types d'étoiles

- Bistabilité du champ magnétique des étoiles M  
*(Présentation de J. Morin)*
- Cycles magnétiques dans les étoiles de type solaire  
*(Présentation de S. Brun)*
- Première simulation MHD 3D globale d'une étoile géante  
*(Présentation de M. Aurière et Palacios & Brun, 2013)*



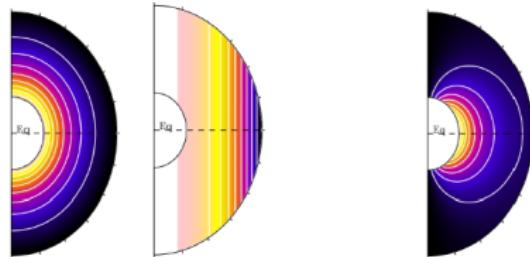
- Etudes 2D et 3D du magnétisme des étoiles de masse intermédiaire  
*(Présentation de F. Lignières)*

# Premier exemple :

## Le magnétisme des étoiles de masse intermédiaire

### L'approche 2D...

- Idée : Caractériser le champ toroidal maximum créé par l'effet de la rotation différentielle sur un champ dipolaire d'amplitude variable
- Pas de circulation méridienne.
- Pas d'évolution du champ poloidal.
- Domaine 2D (axisymétrique) avec un profil initial de  $\Omega$  et un champ dipolaire. (*code STELEM*)
- On obtient :
$$\text{Max} \left( \frac{B_\phi}{B_p} \right) = \alpha \frac{R \Omega_S}{V_{aps}}$$
où  $\alpha$  dépend du profil de  $\Omega$  et de  $\rho$  et de  $Rm$  et  $Pm$ .  
(Gaurat et al. 2014, en prep.)
- La configuration du champ toroidal est susceptible d'être instable.

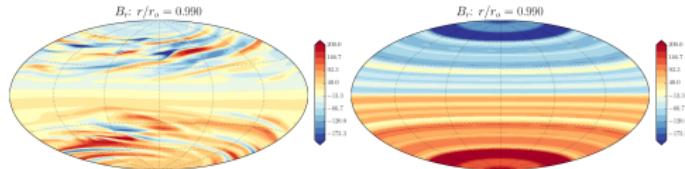


# Premier exemple :

## Le magnétisme des étoiles de masse intermédiaire

...complémentaire de l'approche 3D.

- Idée : Les configurations dominées par un champ toroidal sont susceptibles d'être instables vis-à-vis d'une instabilité non-axisymétrique
- Le champ de vitesse complet est pris en compte.
- Le champ poloidal est libre d'évoluer.
- Domaine 3D sphérique avec un profil initial de  $\Omega$  et un champ dipolaire.  
(code *MAGIC*)
- On obtient des configurations stables ou instables selon les valeurs initiales de  $\frac{R\Omega_S}{V_{aps}}$ .

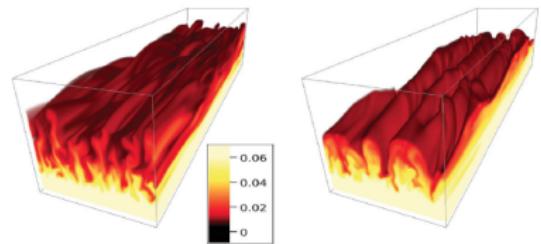
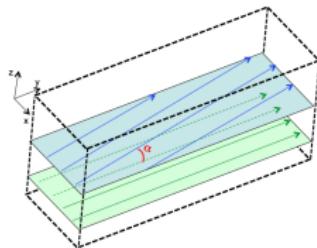


# Deuxième exemple :

## L'émergence de flux magnétique dans le Soleil

L'approche locale...

- Idée : de fortes concentrations de champ toroidal sont créées à la base de la zone convective des étoiles de type solaire. Comment se forment les structures susceptibles de gagner la surface ?
- Etude précise en 3D des instabilités magnétiques d'une nappe de champ.
- Simulation locale compressible.  
*(code de Cambridge)*
- Si  $\alpha \neq 0$ , on obtient des tubes de flux torsadés susceptibles de monter vers la surface en gardant leur cohérence.  
*(Favier, Jouve et al 2012)*

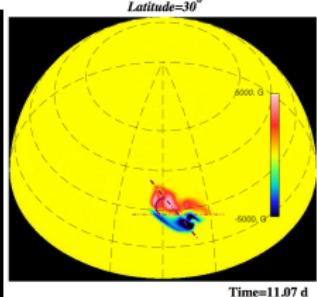
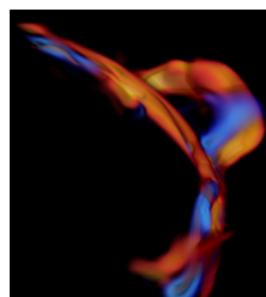
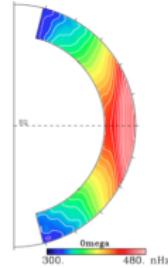
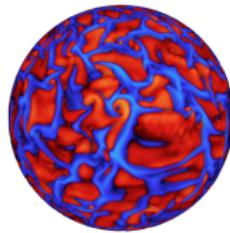


## Deuxième exemple :

### L'émergence de flux magnétique dans le Soleil

...complémentaire de l'approche globale.

- Idée : comment les tubes de flux ainsi créés traversent-ils la zone convective pour émerger en surface sous forme de taches ?
- Influence de la convection et des écoulements moyens associés sur les tubes de flux.
- Simulation globale 3D anélastique.  
*(code ASH)*
- On obtient des régions émergentes possédant un tilt, de l'hélicité et une position dépendante de la latitude initiale  
*(Jouve, Brun & Aulanier 2013)*



# Perspectives

## Simulations MHD des intérieurs stellaires

- Magnétisme des massives et de masse intermédiaire (*ANR Imagine*) :
  - Champ critique des étoiles Ap
  - Origine du magnétisme des étoiles de type Véga
- Magnétisme des géantes (*atelier PNPS géantes*) :
  - Instabilités MHD liées à la présence de rotation différentielle
  - Impact sur la structure et l'évolution
- Magnétisme des étoiles froides (*ANR Toupies, B Cool, Spirou*) :
  - Bistabilité du champ des étoiles M
  - Cycles et transport de flux dans les étoiles F, G, K

### THÉMATIQUES COMMUNES :

- Intéraction entre rotation différentielle et champ magnétique dans les étoiles
- Transport lié au champ magnétique dans les étoiles