ATELIER CESAM / 19 & 20 mai 2003

Observatoire de la Côte d'azur

MELANGE ROTATIONNEL

Transport dans les zones radiatives stellaires

Stéphane MATHIS & Jean-Paul ZAHN

Observatoire de Paris – Section de Meudon

L.U.T.H.

Mélange rotationnel

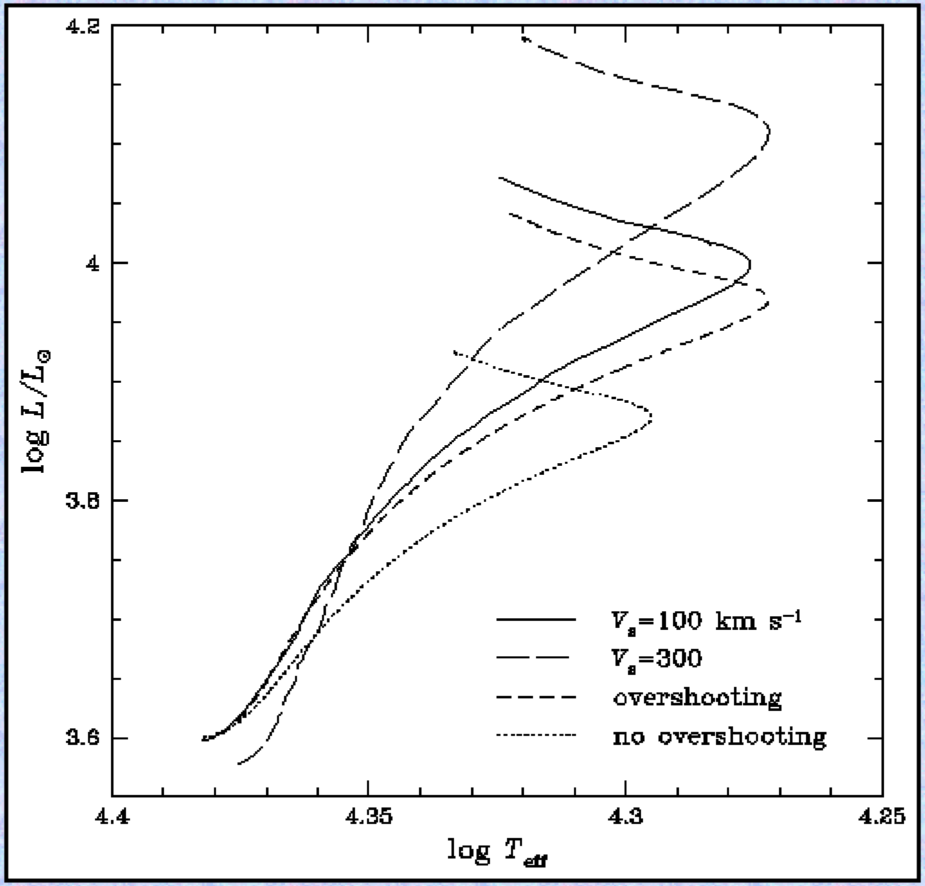
Modèle standard :

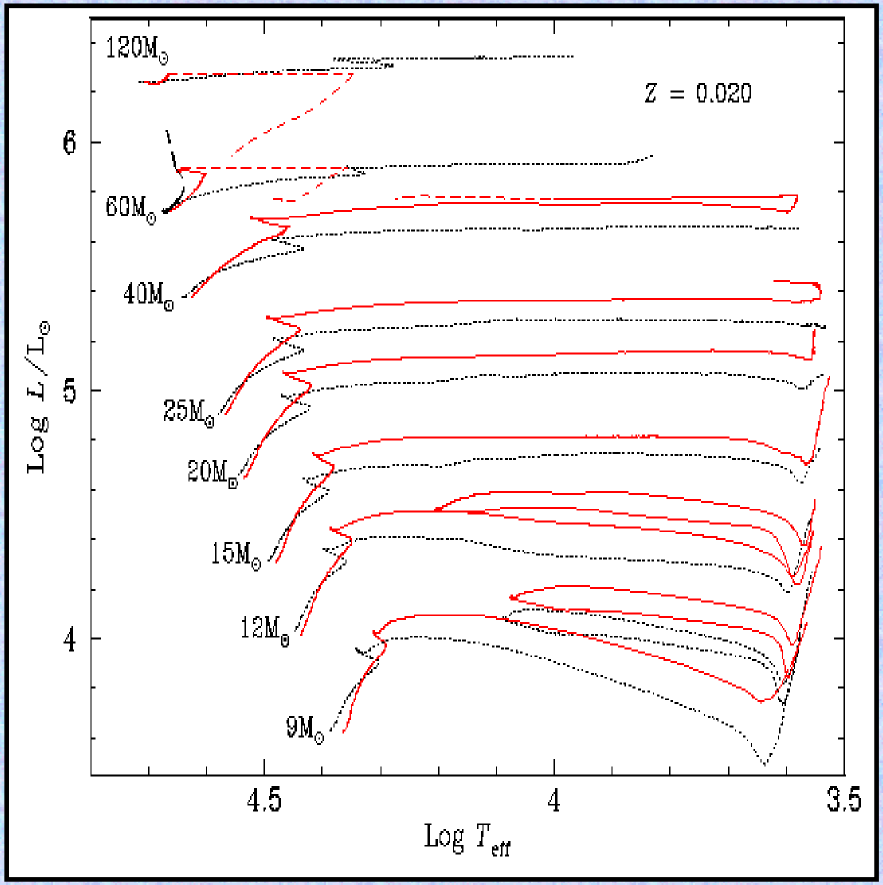
- pas de mélange dans zones radiatives
- pas de perte de masse

Ces processus ont un impact
sur la structure et l'évolution de l'étoile

Ils sont inclus dans certains codes numériques :
Yale, Genève-Toulouse, Genève, Grenoble

Impact du mélange rotationnel sur l'évolution stellaire





Influence de la rotation sur le trajet évolutif d'une étoilede 9 masses solaires dans le diagramme HR.
D'après Talon et al., 1997.

Trajets évolutifs pour des étoiles sans (pointillés), puis avec (lignes continues) rotation.
D'après Meynet & Maeder, 2000.

Principal responsable du mélange : la rotation (différentielle)

La rotation induit :

- circulation méridienne
- probablement de la turbulence

Ces processus transportent :

- matière
- moment cinétique

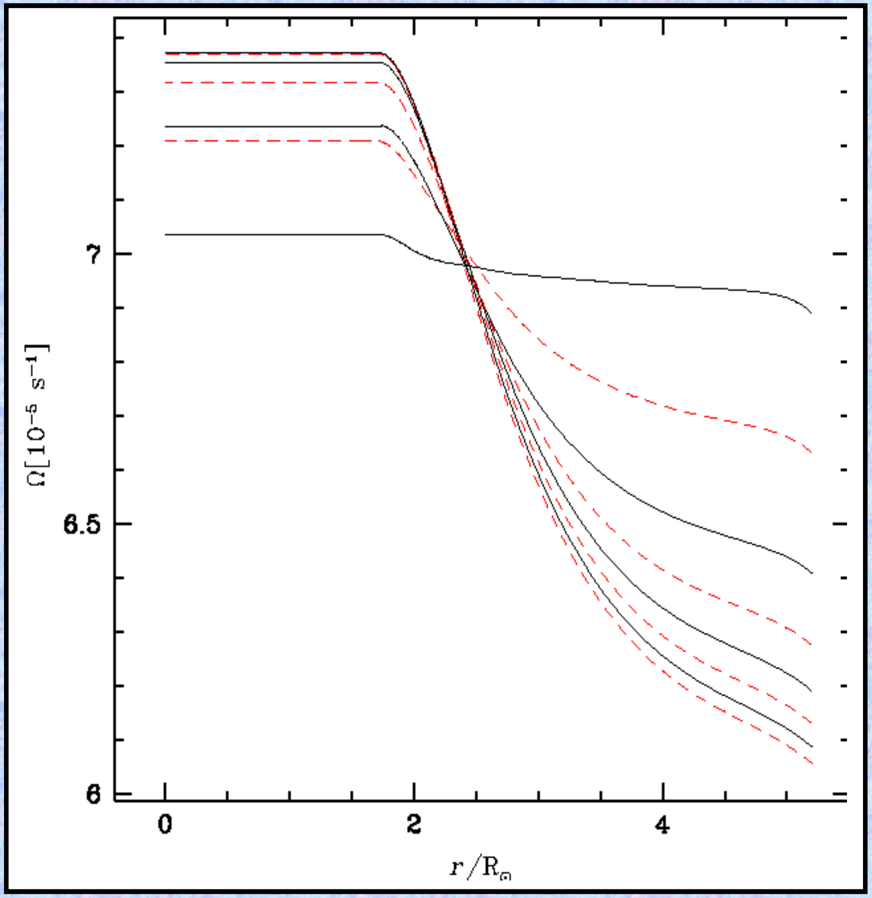
Ces transports modifient :

- composition chimique
- loi de rotation

Nature du transport : diffusif (turbulence) et advectif (circulation)

$\rightarrow$ nécessité d'un traitement 2D

Le transport de moment angulaire: un processus advectif



Evolution de la loi de rotation à partir d'un profil plat pour une étoile de 20 masses solaires.
D'après Meynet & Maeder, 2000.

Succès et faiblesse du mélange rotationnel

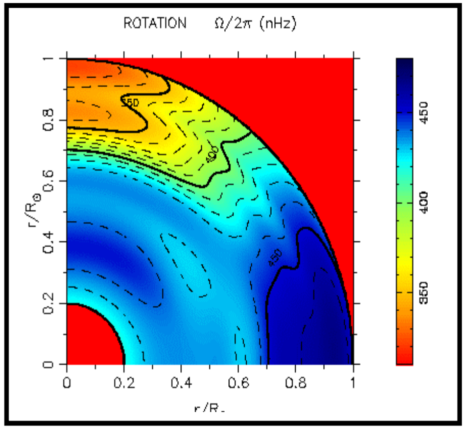
Succès du mélange rotationnel:

Reproduit bien les propriétés des étoiles massives qui sont des rotateurs rapides (Talon et al., 1997; Meynet & Maeder, 2000)

Faiblesse du mélange rotationnel:

Problèmes avec les étoiles de faible masse qui sont des rotateurs lents

Incapacité à reproduire le profil de rotation plat de l'intérieur radiatif du Soleil (Pinsonneault et al., 1989; Chaboyer et al., 1995; Matias & Zahn, 1997)



→ *Recherche d'autres processus et amélioration de ceux déjà introduits*

Nouveaux processus physiques à étudier:

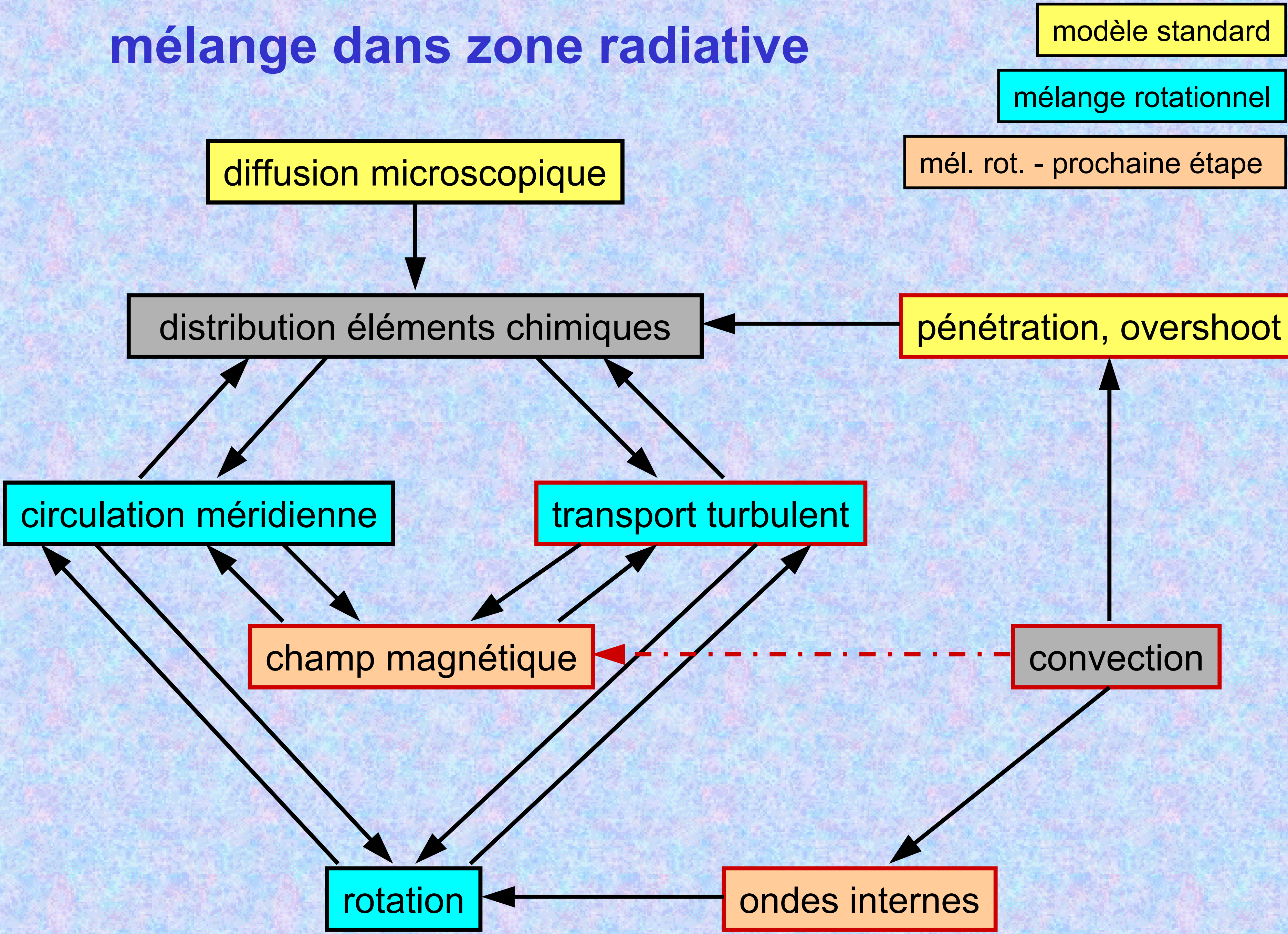
- ***Transport de moment angulaire par couple magnétique***

- ***Transport de moment angulaire par ondes internes (ondes dont la force de rappel est la force d'Archimède et qui ont la capacité, via la dissipation radiative, de déposer ou d'extraire du moment angulaire dans l'étoile)***

ou à améliorer:

- ***Recherche d'un meilleur traitement de la turbulence***

mélange dans zone radiative



Modèle à 1.5 D

Stratification ***stable des intérieurs radiatifs***

Transport anisotrope où les gradients horizontaux sont plus faibles que les gradients verticaux

Ceci suggère:

$$X(\bar{r},\theta) = \overline{X}(\bar{r}) + \sum_{s>0} \tilde{X}_s(\bar{r}) P_s(\cos\theta)$$

avec: $\overline{X}(\bar{r}) \gg \tilde{X}_s(\bar{r})$

où $\bar{r}$ désigne le rayon moyen d'une isobare

$\bar{r}$	ρ_2	ρ_4
P	T_2	T_4
$\overline{T}$	$\overline{\Omega}$	Ω_2
$\overline{L}$	U_2	U_4
$\overline{C}^j$	C_2^j	C_4^j
4 + j eq.	4 + j eq.	4 + j eq.
	équations pour le champ magnétique	

etc ...

Nouvelles équations pour le transport dans les zones radiatives

Avec:

- *Champ magnétique axisymétrique*
- *Développement à l'ordre supérieur de la rotation différentielle en latitude*

Nous avons obtenu:

- *Equation de transport pour le champ magnétique*
- *Equation de transport pour le moment angulaire (avec couple de Lorentz)*
- *Equation de transport pour la température*
- *Equation de transport pour les éléments chimiques*

Exemple: équation pour le transport de moment angulaire

$$\Omega(r,\theta)=\overline{\Omega}(r)+\hat{\Omega}(r,\theta)$$

$$\vec{U}(r,\theta)=\sum_{s=1}^{2}\left\{U_{2s}(r)P_{2s}(\cos\theta)\hat{e}_r+V_{2s}(r)\frac{dP_{2s}(\cos\theta)}{d\theta}\hat{e}_\theta\right\}$$

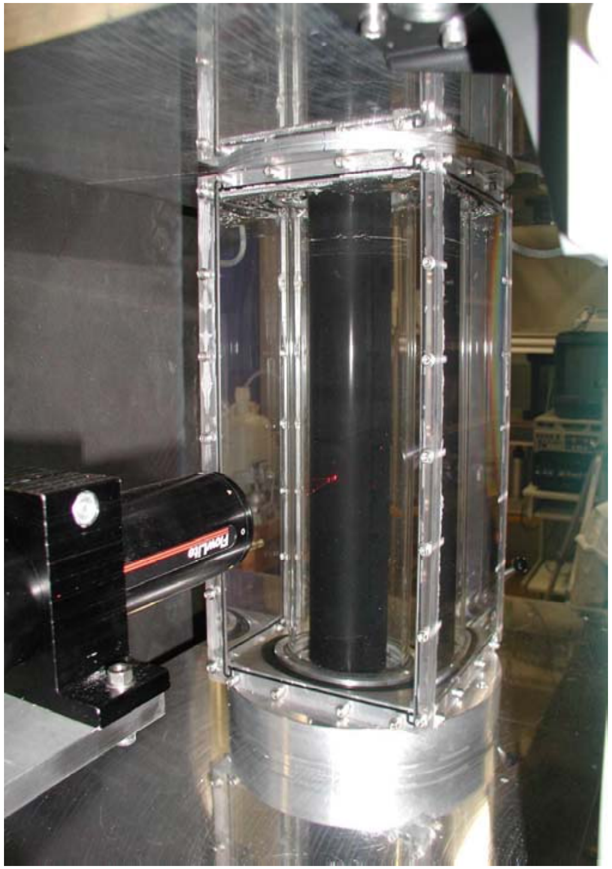
$$\partial_t(\rho r^2\overline{\Omega})-\frac{1}{5r^2}\partial_r(\rho r^4\overline{\Omega}[U_2(r)-5\dot{r}])=\frac{1}{r^2}\partial_r(\rho\nu_V r^4\partial_r\overline{\Omega})+\Gamma_{L,0}(r)-\frac{1}{5}\Gamma_{L,2}(r)$$

Advection **Diffusion** **Source**

$$\partial_t(\rho r^2\Omega_2)-2\rho\overline{\Omega}r[2V_2(r)-\alpha(r)U_2(r)]=\frac{1}{r^2}\partial_r(\rho\nu_V r^4\partial_r\Omega_2)-10\rho\nu_H\Omega_2+\Gamma_{L,2}(r)$$

avec: $$\alpha(r)=\frac{1}{2}\frac{d\ln(r^2\overline{\Omega})}{d\ln r}$$ ***et:*** $$V_2(r)=\frac{1}{6r\rho}\frac{d[\rho r^2U_2(r)]}{dr}$$

Une nouvelle prescription pour le transport horizontal: la prescription _



L'expérience de Couette - Taylor la plus récente (D. Richard, J.-P. Zahn (LUTH - OBSPM); O. Dauchot, F. Daviaud, B. Dubrulle (GIT - CEA))

Expérience de laboratoire pour mieux comprendre la turbulence produite par la rotation différentielle

→ *Nouvelle prescription de viscosité turbulente: la prescription β*

$$\boxed{\nu_t = \beta s^3 \left| \frac{d\Omega(s)}{ds} \right|}$$

(Richard & Zahn, 1999)

En l'appliquant à l'équation pour Ω(θ), on obtient:

$$\boxed{\nu_H = \beta' r^2 \left| \Omega_2 \right|}$$

avec:

$$\boxed{\beta' = \frac{\beta}{2}}$$

$$\downarrow$$

Nouvelle prescription pour les coefficients de transport horizontaux

PERSPECTIVES

Perspectives théoriques

<u>Champ magnétique non-axisymétrique:</u>

Etablir les équations de transport dans le cas où le champ magnétique présente une dépendance azimutale (cas où l'axe du champ magnétique ne coïncide pas avec l'axe de rotation, <u>exemples:</u> étoiles Ap ou certaines étoiles chaudes).

<u>Ondes internes:</u>

- **Emises à l'interface avec les zones convectives**
- **Transportent du moment angulaire (Talon et al.)**
- **Incertitudes: flux émis, spectre de fréquences (Travaux en cours: M. Kiriga, N. Brummel et al.)**

<u>Travail à effectuer:</u>

- **Effet de la rotation**
- **Filtrage par le champ magnétique**

Perspectives numériques

Introduire les nouvelles équations dans les codes numériques d'évolution stellaire existants pour modéliser l'évolution des étoiles en rotation.
CESAM & STAREVOL