

La Tachocline

Allan Sacha Brun

Service d'Astrophysique, CEA Saclay

(avec S. Turck-Chièze, J.-P. Zahn, L. Piau et P. Morel)

- La Tachocline Solaire (Obs & Modèles)
- Formulation pour CESAM
- Impacts pour les modèles solaires

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

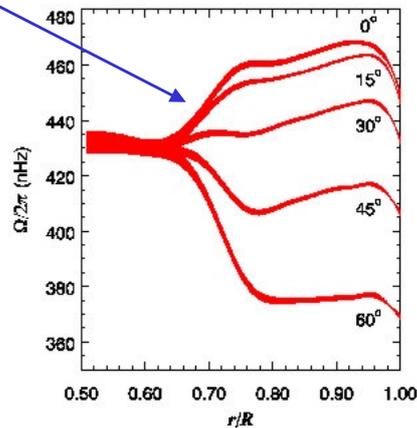
Tachocline Solaire (I)

- Les inversions héliosismiques ont permis de mettre en évidence la présence d'une **zone de transition** entre la zone convective et la zone radiative du Soleil, où la rotation change de solide à différentielle
Différentielle -> Rotation Solide
- Cette couche limite s'étend sur $h < 0.05 R_o$ (~35000 km) (Corbard et al. 1999, Charbonneau 1998)
- Elle est localisée à la même position qu'un pic très visible sur la différence des profils de vitesses du son entre modèles et observations ($r \sim 0.7 R$)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Rotation Solaire (donnees GONG)

tachocline



NSO/NSF

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Tachocline Solaire (II)

- Pourquoi est-elle si fine? S'il n'y a ni anisotropie de la turbulence ou un champ magnétique B , cette couche s'élargirait/répondrait sur un temps thermique par diffusion radiative (e.g. $\hat{\Omega}(\theta) \Rightarrow \nabla T(\theta)$)
- La stratification stable ($N^2 > 0$) réduit la propagation, car le moment cinétique ne peut plus être transporté que par circulation méridienne en l'absence de turbulence, mais la tachocline s'étendrait tout de même sur $h \sim 0.3 R$ à l'âge actuel du Soleil

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Tachocline Solaire (III)

- Quels processus pourraient réduire l'extension?

Champ magnétique, turbulence anisotrope, μ -gradient

- Gilman et al. et Gough & McIntyre favorisent le **champ magnétique**

- Spiegel & Zahn ont développé un modèle basé sur l'**anisotropie de la turbulence** avec un transport visqueux effectif plus fort en horizontal qu'en vertical (e.g $v_H \gg v_V$, with $v_H \sim 10^5 - 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)

- Ils ont aussi montré que le μ -gradient, augmenterait la **diffusion** (tachocline plus épaisse)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Tachocline Solaire (IV)

- Quel peut être la source de l'anisotropie de la turbulence?

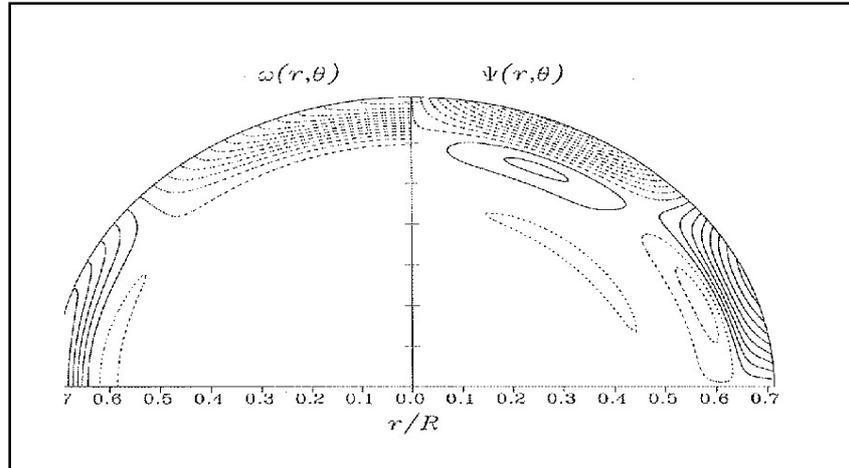
Le profil en latitude $\Omega(\theta)$ est probablement marginalement instable d'après le critère de Rayleigh même sans champ magnétique B

- De toute façon, un flot cisailé peut être **non-linéairement instable** si le nombre de Reynolds Re est suffisamment grand!

- La turbulence 3D sera plutôt horizontale à cause de la **stratification** => **anisotropie**

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Un Modèle 2D de la Tachocline (Elliott 1997 d'après Spiegel & Zahn 1992)



A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Formulation pour CESAM

Une Diffusion Turbulente D_T pour décrire la Tachocline

Equation pour l'évolution temporelle des espèces chimiques:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = - \frac{\partial(4\pi r^2 X_i V_i)}{\partial m} + \text{nuclear terms}$$

avec $V_i = -4\pi r^2 (D_i + D_T) \frac{\partial \ln X_i}{\partial m} + v_i$

La diffusion anisotrope ($v_H \gg v_V$) invoquée par Spiegel & Zahn (1992) pour stopper l'extension de la tachocline plus profondément dans la zone radiative, va aussi interférer avec le transport advectif des espèces chimiques (Michaud & Zahn 1998). Chaboyer & Zahn (1992) ont montré que le résultat est un transport diffusif dans la direction verticale, avec une diffusivité effective donnée par:

$$D_T = \frac{r^2}{D_H} \sum_n \frac{U_n^2(r)}{n(n+1)(2n+1)}$$

A partir de l'expression déduite de S&Z pour la vitesse verticale u , on a:

$$D_T(r) = \frac{4}{405} v_H \left(\frac{d}{r_{\text{bez}}} \right)^2 \mu_4 Q_4^2 \exp(-2\zeta) \cos^2(\zeta) + \text{higher order terms}$$

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Modifications de CESAM (4.0)

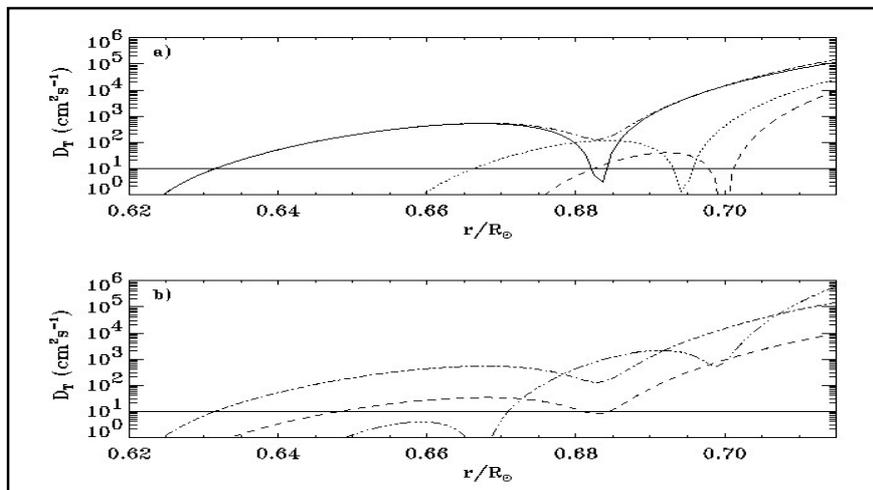
Routines modifiées:

diff_z16.f => diff_tacho.f et diff_elliott.f
cesam.f
resout.f
lim_zc.f

Pour ingrédients physiques microscopiques:
ppcno13e, rq_reac, diff_tacho (pour D_i)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

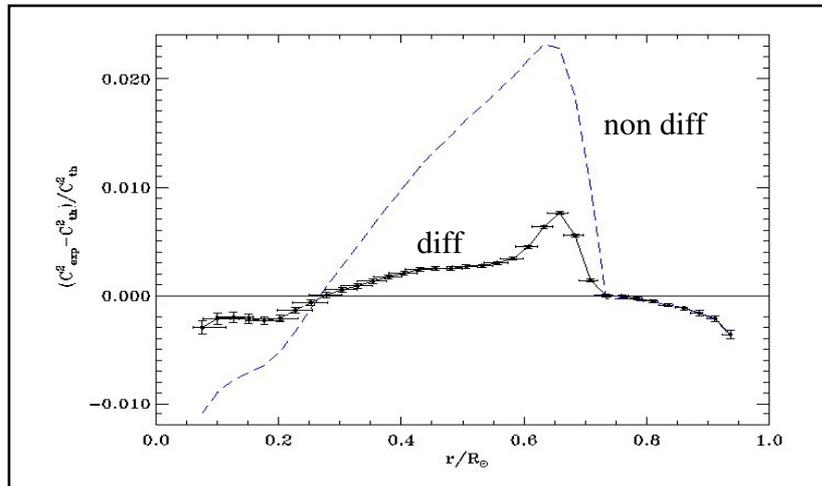
Coefficient de diffusion turbulente D_T



A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Résultats Obtenus avec CESAM

**Différence relative des vitesses du son (Soleil-mod)/mod
avec & sans diffusion microscopique
(Brun, Turck-Chièze & Morel 1998, ApJ 510, 913)**

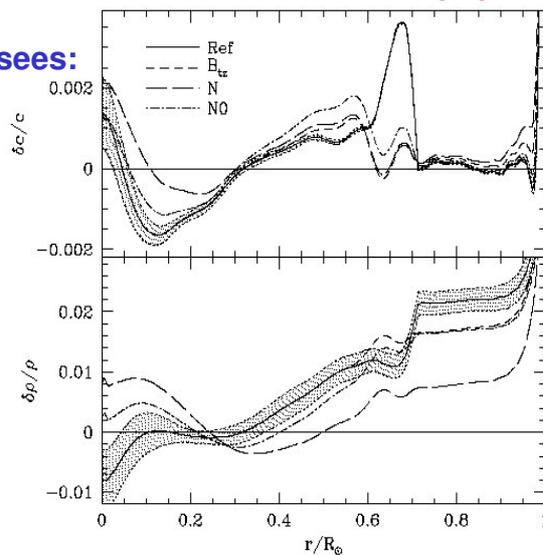


A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

**Différence relative des vitesses du son (Soleil-mod)/mod
avec & sans diffusion macroscopique + pp**

Routines Utilisées:

etat_opal
opa_houdek2
conv_jmj
ppcno13e
lim_atm
K5750
diff_tacho
perte_ext



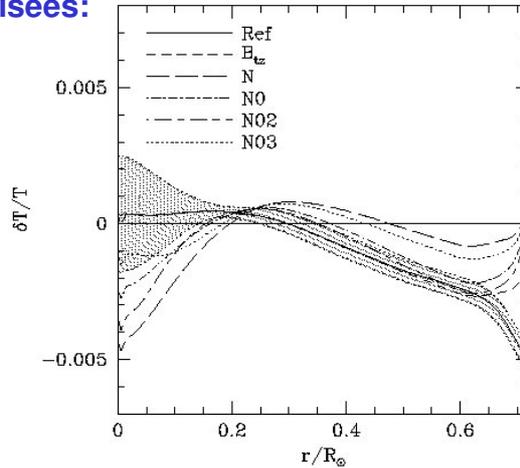
Brun, Turck-Chièze, Zahn, 1999
Brun, Antia, Chitre & Zahn 2002 (collaboration franco-indienne)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

**Difference relative des températures (Soleil-mod)/mod
avec & sans diffusion macroscopique
et modif reactions nucléaires S_{11}, S_{33}, S_{34}**

Routines Utilisees:

etat_opal
opa_houdek2
conv_jmj
ppcno13e
lim_atm
K5750
diff_tacho
perte_ext



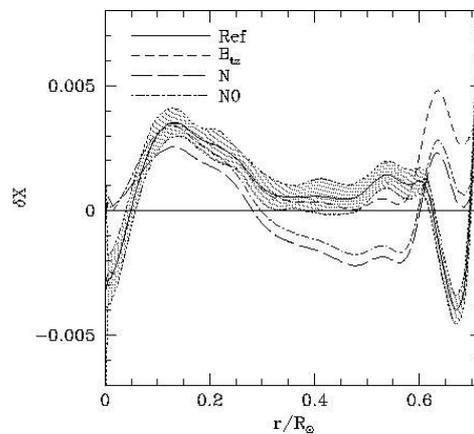
Brun, Turck-Chieze, Zahn, 1999
Brun, Antia, Chitre & Zahn 2002 (collaboration franco-indienne)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

**Difference absolu en hydrogene (Soleil-mod)
avec & sans diffusion macroscopique
et modif reactions nucléaires S_{11}, S_{33}, S_{34}**

Routines Utilisees:

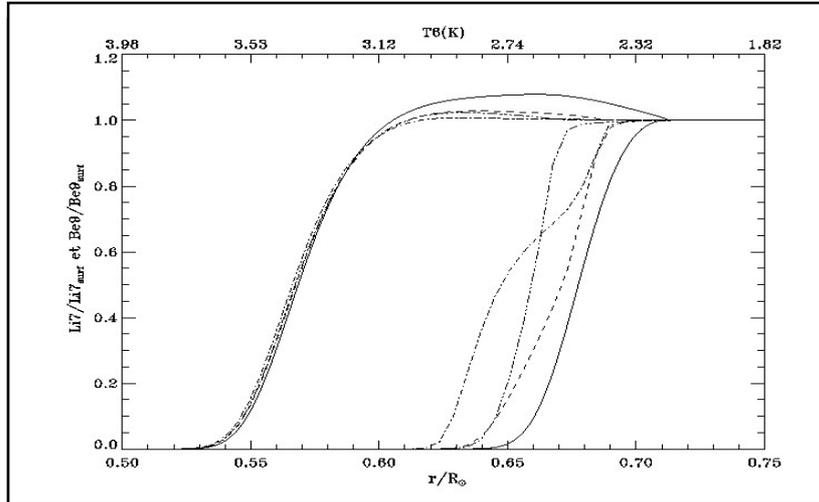
etat_opal
opa_houdek2
conv_jmj
ppcno13e
lim_atm
K5750
diff_tacho
perte_ext



Brun, Turck-Chieze, Zahn, 1999
Brun, Antia, Chitre & Zahn 2002 (collaboration franco-indienne)

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

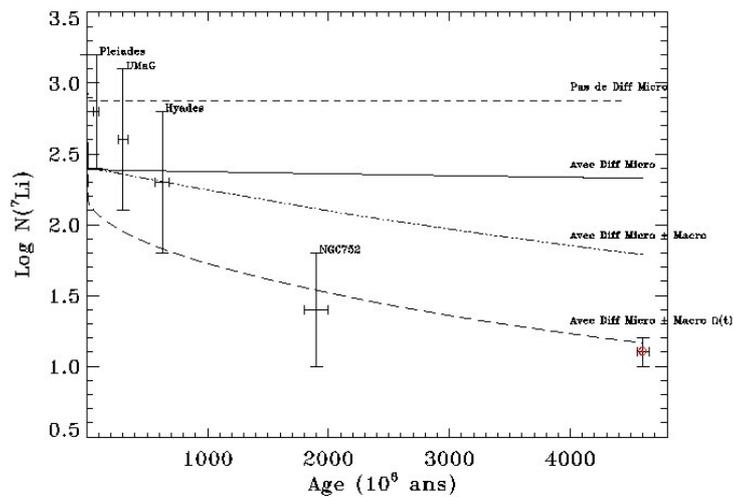
Mélange dans la Tachocline Profils radiaux de Li7 & Be7



Brun, Turck-Chièze, Zahn, 1999

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

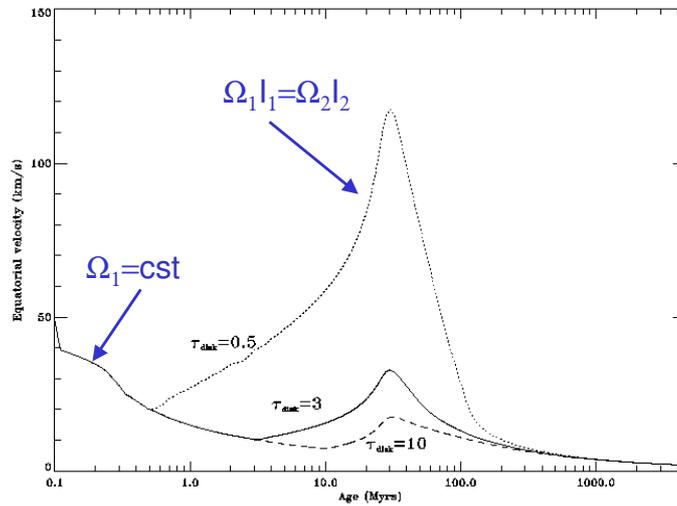
Mélange dans la Tachocline Variation temporelle du Li7(t) de surface durant MS



Brun, Turck-Chièze, Zahn, 1999

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

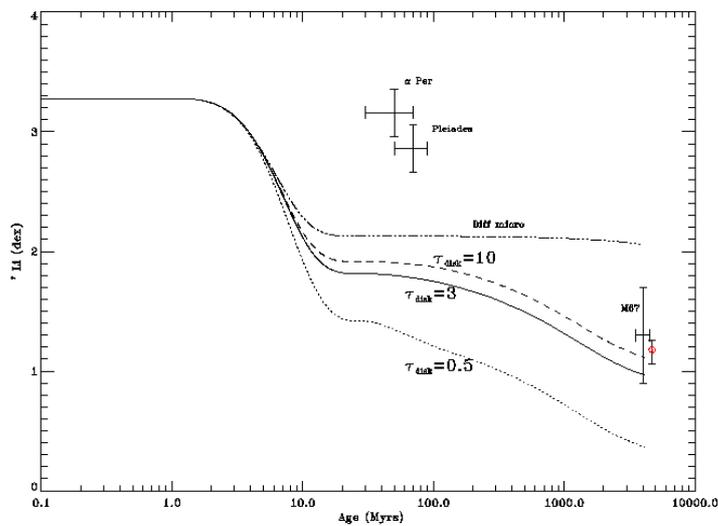
Loi de rotation $\Omega(t)$ pour PMS (couplage disque d'accrétion et Soleil)



Piau & Turck-Chièze 2002

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Li7(t) durant PMS (couplage disque d'accrétion et Soleil)



Piau & Turck-Chièze 2002

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003

Conclusions Scientifiques:

Le mélange se passant dans la tachocline améliore:

- la vitesse du son & profil de densité
- augmente la déplétion du ${}^7\text{Li}$ significativement si la dépendance en temps est prise en compte
- N'affecte pas l'abondance ${}^9\text{Be}$.

Conclusions pour CESAM:

- Le plus: **Vive Pierre!** CESAM est rapide, facile d'utilisation, contient beaucoup de physique, permet d'initialiser le code 3D MHD ASH (Brun & Toomre 2002)
- Le moins: modularité "imcomplete", pas d'accès global aux variables, pouvoir résoudre plus facilement des équations diff supplémentaires, choix des variables d'output.

A.S. BRUN, Atelier CESAM, 19/05/2003