

# Le confinement de la tachocline solaire

Roxane Barnabé, Allan Sacha Brun, Paul Charbonneau, Antoine Strugarek, Jean-Paul Zahn

Université de Montréal, CEA Saclay

<roxane@astro.umontreal.ca>

## Résumé

La tachocline est une région du Soleil qui se trouve entre les zones de radiation et de convection. Dans la zone convective, la rotation se fait de façon différentielle, alors que dans la zone radiative, elle est uniforme. Le changement du profil de rotation se fait donc dans la tachocline. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer pourquoi la rotation différentielle ne se propage pas vers l'intérieur radiatif. Nous proposons un modèle simple qui montre qu'un champ magnétique poloidal oscillant sur une période de 22 ans et pénétrant sous la zone de convection permet de confiner la tachocline si celle-ci est turbulente.

## La tachocline

L'héliosismologie a permis de sonder l'intérieur solaire et de déterminer le profil de rotation. Il a été montré que la rotation différentielle qui est observée à la surface du Soleil se propage dans toute la zone convective. Sous la zone de convection, il s'avère que la rotation se fait plutôt de façon uniforme. La transition entre ces deux régions a lieu dans une mince couche située à la base de la zone convective, nommée la tachocline. Cette couche se trouve à environ  $0.7 R_{\odot}$  et a une épaisseur d'environ 5% du rayon solaire.

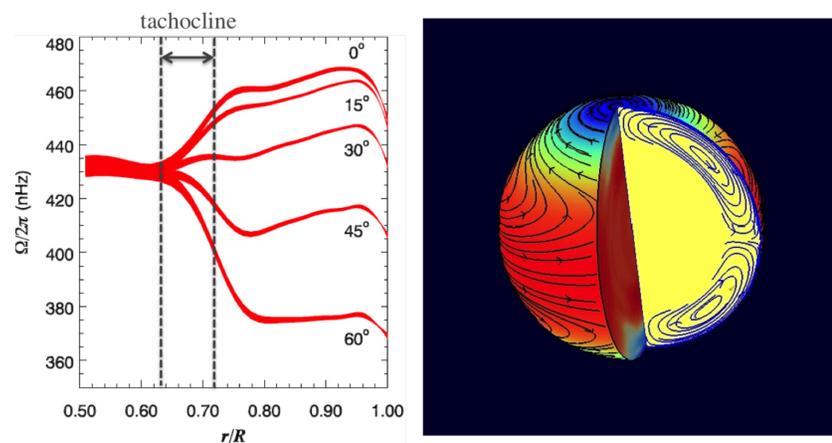


FIGURE 1 – (À gauche) Rotation dans le Soleil selon la profondeur pour différentes latitudes. (À droite) Représentation graphique des flux de surface et de la circulation méridienne. Le rouge représente une vitesse de rotation plus grande que le bleu.

Le brusque changement du profil de rotation cause de forts cisaillements de vitesse dans la tachocline et en fait une région très complexe. La tachocline jouerait un rôle important dans la génération et l'amplification du champ magnétique solaire. Ainsi, comprendre les processus physiques en jeu dans cette région nous renseigne sur la dynamo et sur le cycle de 11 ans du Soleil.

## Problématique

Plus de 20 ans après sa découverte, la tachocline demeure un mystère. En effet, une question demeure : Pourquoi la tachocline est-elle si mince? Effectivement, il n'est toujours pas compris pourquoi la rotation différentielle ne se propage pas dans la zone radiative.

La rotation différentielle au haut de la tachocline doit induire une circulation méridienne qui redistribue le moment cinétique via la diffusion radiative. Le cisaillement devrait ainsi s'étendre dans la zone radiative sur des temps de diffusion thermique. La tachocline devrait donc avoir aujourd'hui une épaisseur de plus de 30% du rayon solaire, ce qui n'est pas le cas.

## Explications possibles

Plusieurs théories ont été évoquées pour tenter de déterminer les processus physiques permettant d'empêcher la propagation de la rotation différentielle.

La première proposait que la tachocline soit turbulente, ce qui aurait pour effet de générer un transport de moment cinétique diffusif et anisotrope qui contre-balancerait la diffusion thermique (Spiegel & Zahn, 1992 [SZ92]).

Il fut ensuite proposé qu'il puisse exister un champ magnétique dipolaire d'origine fossile dans la zone radiative et que celui-ci parvienne à confiner la tachocline (Gough & McIntyre, 1998). Toutefois, ce champ aussi doit être confiné (Brun & Zahn, 2006 et Strugarek, 2011). En effet, si ce champ magnétique se raccroche à celui de la zone convective, la propagation de la rotation différentielle se ferait encore plus rapidement.

Une autre hypothèse est que l'effet dynamo dans le Soleil parviendrait à confiner une tachocline turbulente (Forgacs-Dajka et Petrovay, 2001 [FP01]).

## Tachocline magnétique

Nous nous intéressons ici à la théorie voulant qu'un champ magnétique dû à l'effet dynamo dans le Soleil confine la tachocline. Ce champ serait poloidal, oscillerait sur une période de 22 ans et pénétrerait sous la zone de convection, ce qui empêcherait la rotation différentielle de se propager. Dans leur modèle, FP01 considère que la tachocline est turbulente. Cela implique donc que la diffusion magnétique soit plus forte à cause de la turbulence et donc que la diffusivité magnétique soit de l'ordre de  $\eta = 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

## Modèle

En étendant l'approche de FP01, nous proposons un modèle simple où nous considérons seulement la région de la tachocline. Au haut de celle-ci, nous imposons un champ magnétique poloidal et toroidal et un profil de rotation différentielle.

$$B_y(t) = B_0 \cos(\omega t)$$

$$B_x(y, t) = \beta B_0 \sin(ky) \cos(\omega t - \phi)$$

$$U_x(y) = U_0 \cos(ky)$$

Les champs magnétiques sont en quadrature de phase et varient sur une période de 22 ans. À la base du domaine étudié, ces termes sont forcés à zéro. En partant des équations d'induction, d'entropie et de Navier-Stokes, nous nous retrouvons avec le système d'équations non-linéaires suivant à résoudre. Le jeu d'équations mène à un terme visqueux et un terme d'hyperdiffusion dans l'équation pour la vitesse (cf SZ92).

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 a}{\partial \xi^2}$$

$$\frac{\partial b}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 b}{\partial \xi^2} - (k\delta)^2 b - C_A a u$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \left(\frac{\nu}{\eta}\right) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - (k\delta)^2 u\right] - \left(\frac{\kappa}{\eta}\right) FR^2 \frac{\partial^4 u}{\partial \xi^4} + C_L a b$$

Le système a été adimensionnalisé de façon à ce que  $z = \delta \xi$  et  $t = \delta^2 \tau / \eta$ .  $a$ ,  $b$  et  $u$  représentent les fonctions adimensionnelles associées à  $B_x$ ,  $B_y$  et  $U_x$ . Les constantes de couplage sont  $C_A = R_m / \beta$  et  $C_L = R_m \beta \Lambda$ , où  $R_m = k \delta^2 U_0 / \eta$  est le nombre de Reynolds magnétique,  $\Lambda = B_0^2 / \rho U_0^2$  est le nombre d'Elsasser,  $\delta = R / 10$ ,  $k = 2.5 / R$  est le nombre d'onde horizontal et  $\beta = 10$  est le rapport entre l'amplitude des champs magnétiques toroidal et poloidal. Aussi,  $\eta$  est la diffusivité magnétique,  $\nu$  est la viscosité cinématique et  $\kappa$  est la diffusivité thermique. La résolution a été effectuée en utilisant la méthode de Crank-Nicolson pour le temps et de différence finie du 2<sup>e</sup> ordre pour l'espace.

## Résultats

Nous avons exploré la possibilité d'un confinement magnétique de la tachocline pour différentes valeurs de la diffusivité magnétique ( $\eta$ ), de la diffusivité thermique ( $\kappa$ ) et du champ magnétique ( $B_0$ ). La figure 2 montre plusieurs cas, avec  $\eta = 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$  et  $\kappa = 10^{13} \text{ cm}^2/\text{s}$  (tel que  $\kappa/\eta = 10^4$ , comme dans le Soleil) et plusieurs valeurs de  $B_0$ .

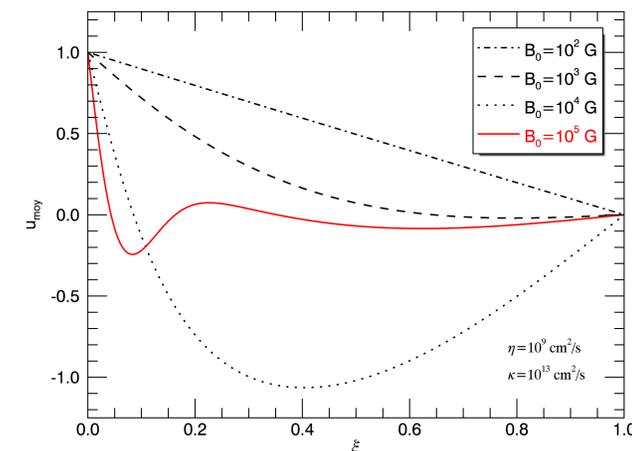


FIGURE 2 – Profils de vitesse azimuthale moyennés sur un cycle avec une diffusivité magnétique de  $\eta = 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$  et une diffusivité thermique de  $\kappa = 10^{13} \text{ cm}^2/\text{s}$ , pour différentes valeurs de l'amplitude du champ magnétique. La courbe rouge représente un cas où la tachocline est confinée.

On y voit que pour ces valeurs de diffusivité, le confinement de la rotation différentielle est possible uniquement avec un champ magnétique de forte amplitude. Dans le cas où  $B_0 = 10^2$  Gauss, le champ magnétique est trop faible pour avoir un impact sur le profil de vitesse. Pour  $B_0 = 10^3 - 10^4$  Gauss, le champ magnétique modifie le profil de vitesse, mais n'est pas suffisant pour le rendre nul. Un champ magnétique d'une valeur de  $B_0 = 10^5$  Gauss est nécessaire pour confiner la tachocline (courbe rouge). Nous trouvons ainsi que différentes combinaisons de diffusivité magnétique ( $\eta$ ), diffusivité thermique ( $\kappa$ ) et champ magnétique ( $B_0$ ) permettent d'empêcher la propagation de la rotation différentielle.

## Conclusion

Dans ce modèle simplifié, un champ magnétique poloidal et toroidal variant périodiquement est appliqué à la base de la zone convective. Un cisaillement de vitesse azimuthale est aussi imposé au haut de la tachocline, représentant la rotation différentielle. Nous montrons que pour certaines valeurs de champ magnétique et de diffusivité magnétique, il est possible d'empêcher la diffusion du cisaillement et donc de confiner la tachocline comme observé dans le Soleil.

Ainsi, une tachocline turbulente dans laquelle un champ magnétique dipolaire et oscillant pénétrerait serait en mesure d'empêcher la diffusion de la rotation différentielle vers l'intérieur radiatif du Soleil et donc d'expliquer l'épaisseur actuelle de la tachocline.

## Références

- Brun, A. S. & Zahn, J.-P. 2006, A&A, 457, 665.
- Forgacs-Dajka, E. & Petrovay, K. : 2001, Solar Physics, 203, 195.
- Gough, D. O. & McIntyre, M. E. 1998, Nature, 394, 1239.
- Spiegel, E. A. & Zahn, J.-P. : 1992, A&A, 265, 106.
- Strugarek, A., Brun, A. S. & Zahn, J.-P. 2011, A&A, 532, 34.