LE COEUR SOLAIRE: STRUCTURE ET DYNAMIQUE ?

[2] Corbard T., [1] Berthomieu G., [1] Gonczi G., [1] Morel P., [1] Provost J., [1] Toutain T.

[1] *OCA, Departement Cassini UMR CNRS 6529 BP 4229 NICE Cedex 4 France*
[2] *High Altitude Observatory, Boulder, CO 80301, USA*

Résumé

L'héliosismologie a montré que trois régions dans le Soleil ne sont pas bien décrites par les modèles d'évolution stellaire: la surface, la tachocline (transition zone convective/zone radiative interne) et le coeur. On présente les résultats sur la structure et la rotation interne du coeur solaire obtenus avec les données GOLF. Siège des réactions thermonucléaires, le coeur solaire ($0 < r < 0.3R_\odot$) est la région de production de l'énergie et des neutrinos. Il apparait que les modèles théoriques élaborés jusqu'ici pour décrire l'intérieur solaire, tout en satisfaisant à 0.4 % les contraintes héliosismiques sur la vitesse du son, sont en désaccord avec les observations sur les neutrinos. Cependant, la structure et la rotation demeurent très incertaines, voire inconnues, au voisinage du centre du Soleil ($r < 0,1R_\odot$). Seuls les modes de gravité pourront nous renseigner avec précision sur ces régions.

I. Modélisation solaire

Le code d'évolution stellaire CESAM, développé à Nice par P. Morel, permet de calculer des "modèles solaires" [(6,9)], c'est à dire des modèles de masse $1M_\odot \simeq 2\ 10^{33}$ g, d'âge $t_\odot \simeq 4.6$ milliards d'années et calibrés à la luminosité $L_\odot \simeq 3.8\ 10^{33}$ ergs s^{-1} et au rayon $R_\odot \simeq 700000$ Km.

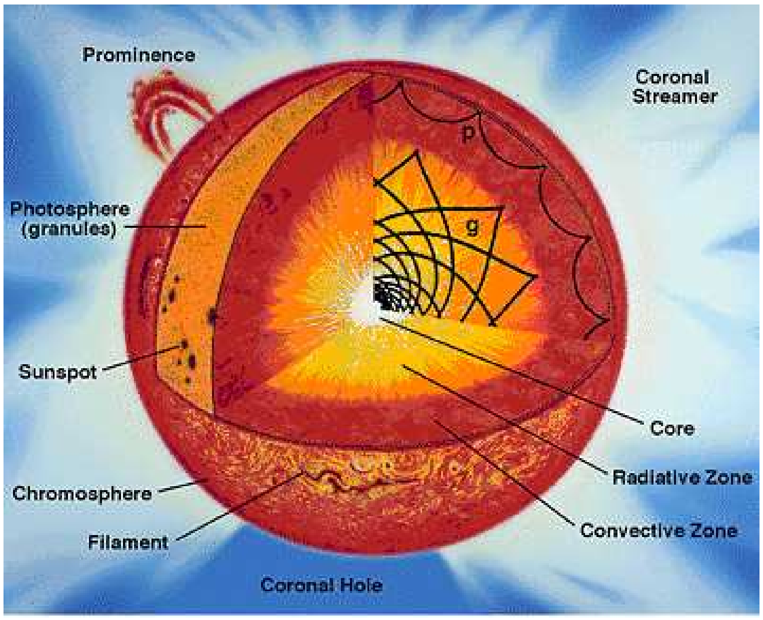

Figure 1: *Coupe du Soleil montrant le coeur, la zone radiative interne et la zone convective. Sont indiqués le trajet des ondes acoustiques (p) piégées dans une cavité résonnante qui peut s'étendre jusqu'au centre, et le trajet des ondes de gravité (g) piégées dans la zone radiative interne. (Courtesy of SOHO/MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.)*

Comme le montre la figure 1, l'intérieur du Soleil est constitué principalement par trois régions: le coeur où les réactions thermonucléaires de combustion de l'hydrogène en hélium produisent les neutrinos et l'énergie, la zone radiative interne et la zone convective. Les modèles prédisent le flux de neutrinos et la structure, c'est à dire la variation du centre à la surface de la température, de la densité, de la composition chimique, de la vitesse du son... Ces prédictions dépendent de la physique utilisée : taux de réaction nucléaire, équation d'état et opacité de la matière, diffusion chimique des éléments,....

La confrontation des prédictions théoriques avec les observations constitue un test sur la physique mise en jeu[8]. La mesure du flux de neutrinos solaires et l'héliosismologie sont les principales contraintes observationnelles.

II. Contraintes observationnelles: Neutrinos

Plusieurs expériences ont permis de mesurer le flux des neutrinos solaires provenant des différentes réactions thermonucléaires. Elles sont en contradiction avec les prédictions théoriques. Les nouveaux taux de réaction nucléaires discutés par deux groupes (Adelberger *et al* 1998) soit (A98) et (Angulo *et al* 1999) soit NACRE (N99) ne résolvent pas le problème du déficit du nombre de neutrinos solaires mesurés par rapport au nombre de neutrinos prédits [9] comme le montre la table 1 (pour les références, voir[9]).

Table 1: *Flux de neutrinos prédits par les modèles avec différents taux de réaction nucléaire: N99, A98, C88 (Caughlan et Fowler 1988) comparés aux flux mesurés par les expériences au Gallium (GALLEX), au chlore (Homestake) et Kamiokande.*

	N99	A98	C88	valeurs mesurées
$\Phi_{\rm Ga}$ (SNU)	130.1	128.4	129.8	77.75 ± 7.7
$\Phi_{\rm Cl}$ (SNU)	8.31	7.71	8.82	2.55 ± 0.25
$\Phi_{\rm Ka}$ (events per day)	0.61	0.55	0.66	0.29 ± 0.02

III. Contraintes héliosismiques

Le Soleil n'est pas un milieu statique et à sa surface on observe des mouvements complexes, superposition de milliers de modes d'oscillations liés soit à la compressibilité du milieu (ondes sonores dits modes p) soit à la gravité (comme les vagues à la surface de l'eau, dits modes g). Les modes acoustiques p excités par la convection, ont des fréquences comprises entre 0,6 et 5 milli-hertz environ. Ils sont piégés dans des couches qui pénètrent plus ou moins profondément dans le Soleil (cavités résonantes) en fonction de leur longueur d'onde horizontale $\lambda_h = 2\pi R_\odot / l$ où l est le degré. Les modes de bas degré ($l = 0,\ 1,\ 2,\ 3$) sont ceux qui pénètrent dans le coeur solaire mais leur amplitude y est faible. Seuls les modes de gravité g, non encore observés, ont leur maximum d'amplitude dans le coeur[10]. Ce que nous observons à la surface du Soleil renferme des renseignements sur les régions traversées. De la même façon que l'on peut savoir si un mur est creux ou plein en écoutant le son produit par un choc, l'héliosismologie a pour but de décrire l'intérieur du Soleil en l'"écoutant" c'est à dire en analysant les fréquences des ondes observées.

Plusieurs réseaux d'observation au sol (IRIS, BiSON, LOWL, GONG) et les expériences GOLF, VIRGO et MDI sur le satellite SoHO fournissent les fréquences d'oscillation de plusieurs miliers de modes. Par des méthodes d'inversion de ces fréquences, on accède à deux quantités caractérisant la structure du Soleil et à la vitesse de rotation. Les résultats obtenus doivent être confrontés aux prédictions des modèles solaires et aux théories du transport de moment angulaire.

a) La structure du Soleil

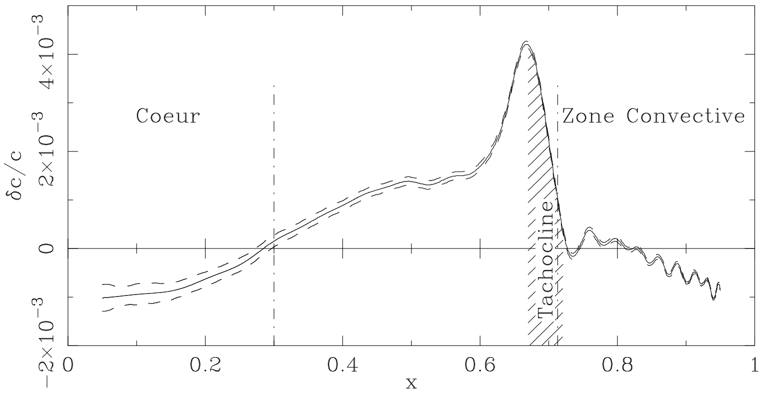

Figure 2: *Différence relative entre la vitesse du son dans le Soleil et dans un modèle CESAM en fonction de la distance au centre $x = r/R_\odot$ obtenue par inversion des fréquences GOLF + MDI.*

Les ondes observées étant de nature acoustique, la quantité la mieux déterminée par inversion des fréquences est la vitesse du son. On part d'un modèle du Soleil pour lequel on calcule la fréquence des modes observés. La différence entre la vitesse du son dans le modèle et dans le Soleil est déduite de la différence entre les fréquences calculées et observées(1,2,7,11).

La figure 2 montre que la différence entre la vitesse du son théorique et celle du Soleil est inférieure à 0.5 %. Le modèle solaire standard représente donc très bien la majeure partie de l'intérieur solaire. Cependant, des différences significatives se trouvent sous la zone convective, dans la tachocline, où se déroulent des processus complexes de mélange que l'on ne sait pas décrire. En ce qui concerne le coeur, la vitesse du son, plus faible dans le Soleil que dans le modèle, n'est pas déterminée de façon fiable dans les régions les plus centrales. Seule la détection de quelques modes de gravité permettrait de pénétrer jusqu'au centre du Soleil.

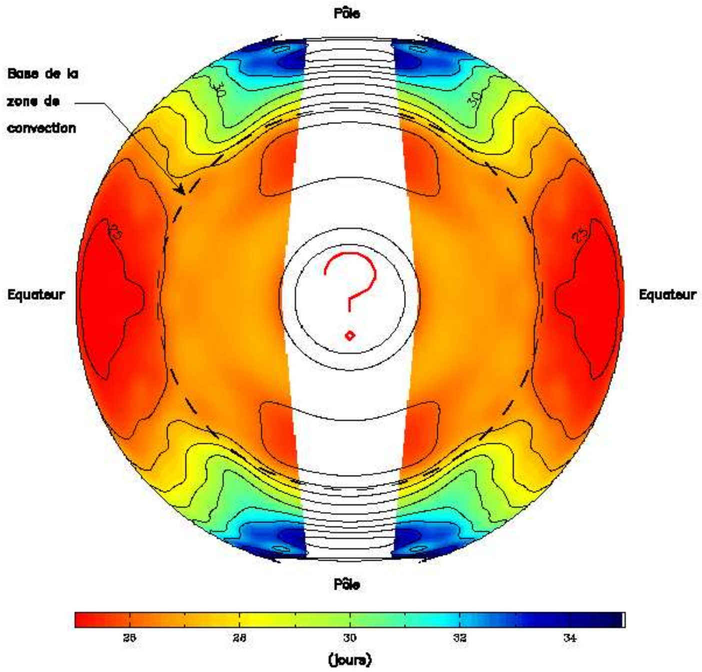

Figure 3: *Courbes d'iso-rotation à l'intérieur du Soleil obtenues avec les données MDI. L'équateur tourne avec une période d'environ 25 jours, plus rapidement que les pôles dont la période est d'environ 34 jours. La zone radiative interne tourne de façon quasi rigide.*

b) La rotation interne du Soleil

Le Soleil ne tourne pas autour de son axe Nord-Sud comme un solide mais la vitesse de rotation dépend de la latitude et de la distance au centre. La rotation a pour conséquence que tous les modes d'oscillation sont en fait des multiplets. La différence entre deux fréquences consécutives du multiplet, dite *splitting rotationnel* vaut environ 400 nano-hertz (correspondant à une période voisine de 27 jours). Elle représente une moyenne pondérée de la rotation sur la cavité résonnante du mode.

L'ensemble des observations a conduit à une description à deux dimensions (latitude et rayon) de la rotation interne du Soleil[(3)], représentée par la figure 3. Les résultats sont très incertains dans les régions en blanc car les observations sont insuffisantes en nombre et en précision.

La mesure des splittings rotationnels des modes pénétrant dans le coeur solaire par les expériences héliosismiques IRIS, BiSON, GOLF,.. permet d'avoir des informations sur la rotation de celui-ci. Malheureusement, la contribution du coeur solaire aux splittings est très faible et leur mesure, très difficile, comporte de grandes barres d'erreur comme en témoigne la figure 4. Elle varie aussi encore notablement selon les observateurs.

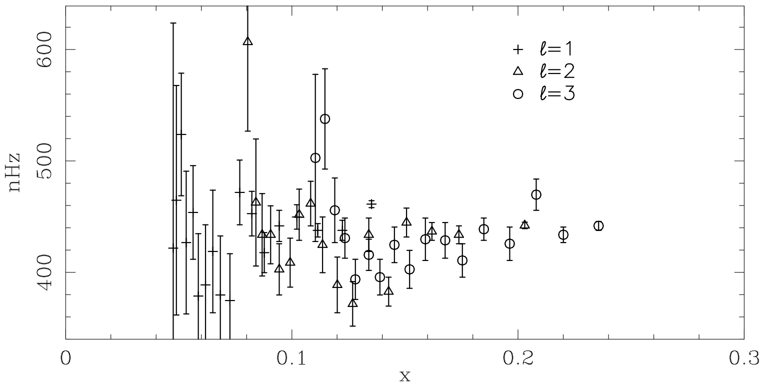

Figure 4: *Splittings rotationnels observés par GOLF pour les modes de bas degré ($l = 1,\ 2,\ 3$) représentés en fonction de la profondeur de pénétration des modes dans le Soleil.*

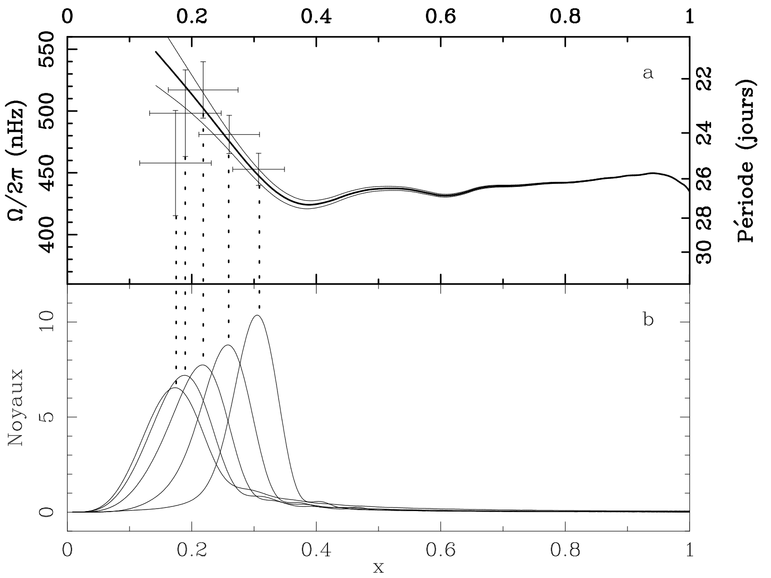

Figure 5: *a) Variation de la vitesse de rotation à une latitude de 30° en fonction de la distance au centre. b) Noyaux de "moyenne localisée" correspondant aux points de la solution MOLA.*

La figure 5 donne la variation de la vitesse de rotation en fonction de la distance au centre du Soleil pour une latitude de 30^0, obtenue avec les données de 1272 jours GOLF (du 19/01/96 au 13/07/99) par deux méthodes d'inversions différentes (RLS, méthode de moindre carrés avec régularisation, et MOLA, méthode de moyennes localisées)[(5)]. Ces méthodes sont décrites dans le cours d'Aussois (1998)[(1)]. Les croix (MOLA) représentent la moyenne de la rotation totale pondérée par le noyau correspondant dessiné dans le cadre inférieur.

Entre 0,2 et 0,3 rayon solaire, le coeur solaire semble s'accélérer légèrement vers l'intérieur, passant d'une période de 26 à 22 jours. Au dessous de 0,2 rayon solaire, les résultats des deux méthodes diffèrent. Ils sont fortement influencés par le manque de données et leur grande imprécision et leur interprétation est très difficile[(3,4)].

IV. Perspectives

En ce qui concerne la modélisation, la construction de modèles à deux dimensions est nécessaire pour rendre compte d'une variation de la rotation en latitude. La description de la tachocline et des zones à variation rapide demande le développement de méthodes d'inversion non linéaire à deux dimensions.

Pour améliorer la connaissance du coeur solaire, il faudra augmenter la précision et le nombre des fréquences et des splittings observés. C'est le but des projets GOLF2 et IRIS2000. Cependant la détection des modes de gravité sera déterminante. Cette recherche est menée conjointement par les équipes des expériences GOLF, VIRGO et MDI (et éventuellement PICARD si l'orbite choisie le permet).

Références

[1] Berthomieu G., Gonczi G.: 1997, Introduction aux problèmes inverses en héliosismologie, dans *Génération et interprétation des oscillations stellaires* , Ecole thématique d'Aussois: 8ème Session, p. IV-1

[2] Berthomieu G., Gonczi G., Corbard T., Provost J.: 1999, Inversion of IRIS helioseismic data and the solar structure, Proceedings of the Xth IRIS/TON Workshop, Taschkent Sept. 1998, Eds S. Ehgamberdiev, p 24

[3] Corbard T.: 1998, Inversion des mesures héliosismiques: la rotation interne du Soleil, Thèse, UNSA, Nice

[4] Corbard T., Di Mauro M.P., Sekii T., and the GOLF team: 1998, in *Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, eds S. Korzennik & A. Wilson, ESA SP-418, p 741

[5] Corbard T. and the GOLF team: 2000, The solar core rotation from GOLF observations (en préparation)

[6] Morel P., Provost J., Berthomieu G.: 1997, Updated solar models A& A, **327**, 349

[7] Gonczi G., Berthomieu G., Corbard Th., Provost J., Morel P. and the GOLF team: 1998, Solar sound speed inferred from SoHO helioseismic data, in *Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, eds S. Korzennik & A. Wilson, ESA S418 Vol 1 p. 461

[8] Morel P., Provost J., Berthomieu G.: 1998, How solar models fit the SoHO observations ?, in *Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, ed S. Korzennik & A. Wilson, ESA SP-418, p 499

[9] Morel P., Pichon B., Provost J., Berthomieu G.: 1999, Solar models and Nacre thermonuclear reaction rates. A&A **350**, 275

[10] Provost J., Berthomieu G., Morel P.: 2000, Low-frequency p- and g-modes solar oscillations, A&A **553**, 775

[11] Turck-Chièze S., Basu S., Berthomieu G., Bonanno A., Brun S., Christensen-Dalsgaard J., Gabriel M., Morel P., Provost J., Turcotte S., and the GOLF team: 1998, Sensitivity of the sound speed to the physical processes included in the standard solar framework, in *Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, eds S. Korzennik & A. Wilson, ESA SP-418, p 555