

# Quoi de neuf sous le soleil?

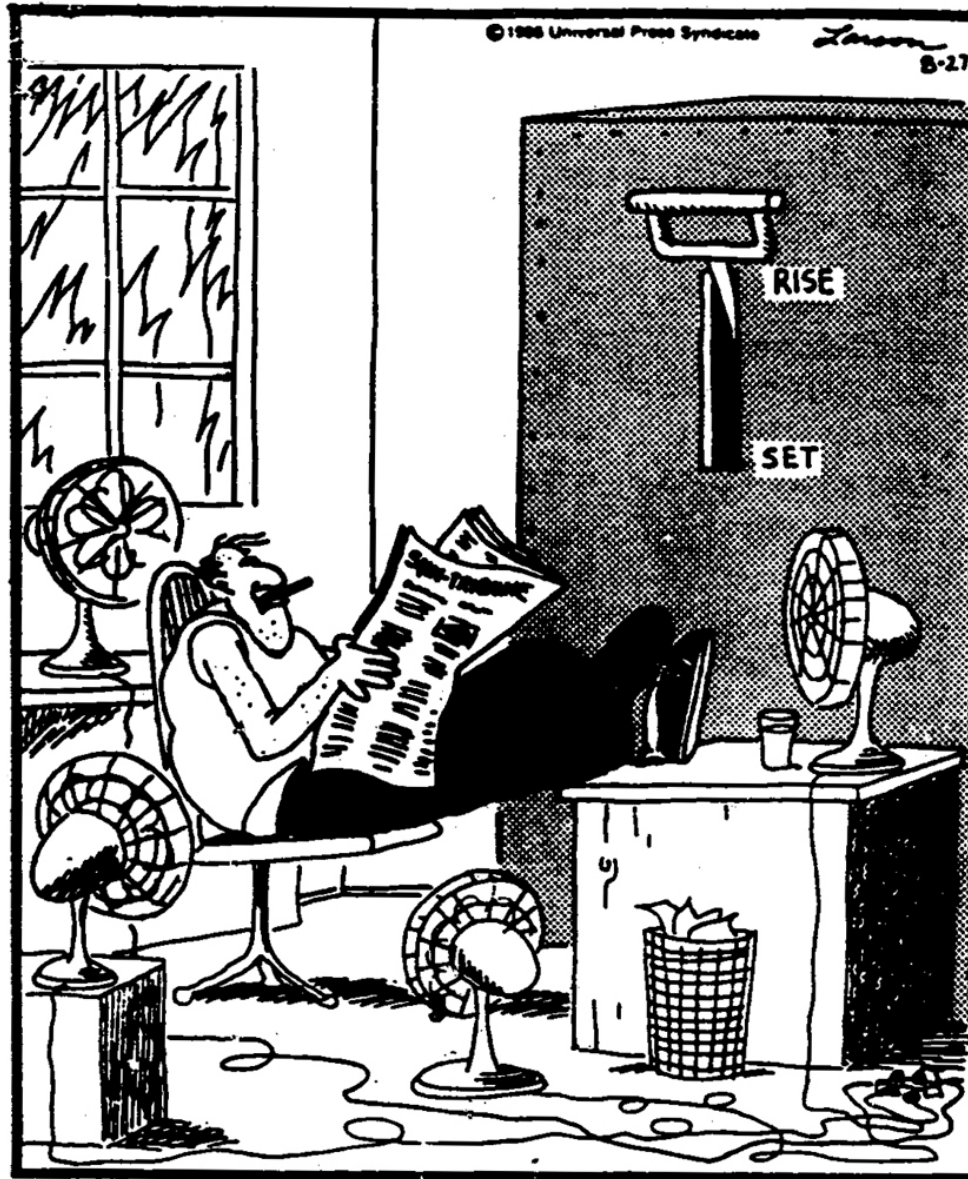
John Leibacher  
Institut d'Astrophysique Spatiale  
Université de Paris-Sud, Orsay  
Observatoire de Paris-Meudon/LESIA  
National Solar Observatory, Tucson

« A première vue, il semblerait que l'intérieur profond du soleil et des étoiles est moins accessible aux investigations scientifiques que n'importe quelle autre région de l'univers. Nos télescopes peuvent sonder de plus en plus loin dans les profondeurs de l'espace; mais comment pourrions-nous jamais obtenir une connaissance précise de ce qui est caché derrière de substantielles barrières? Quel instrument peut percer les couches externes d'une étoile et tester les conditions au dedans? »

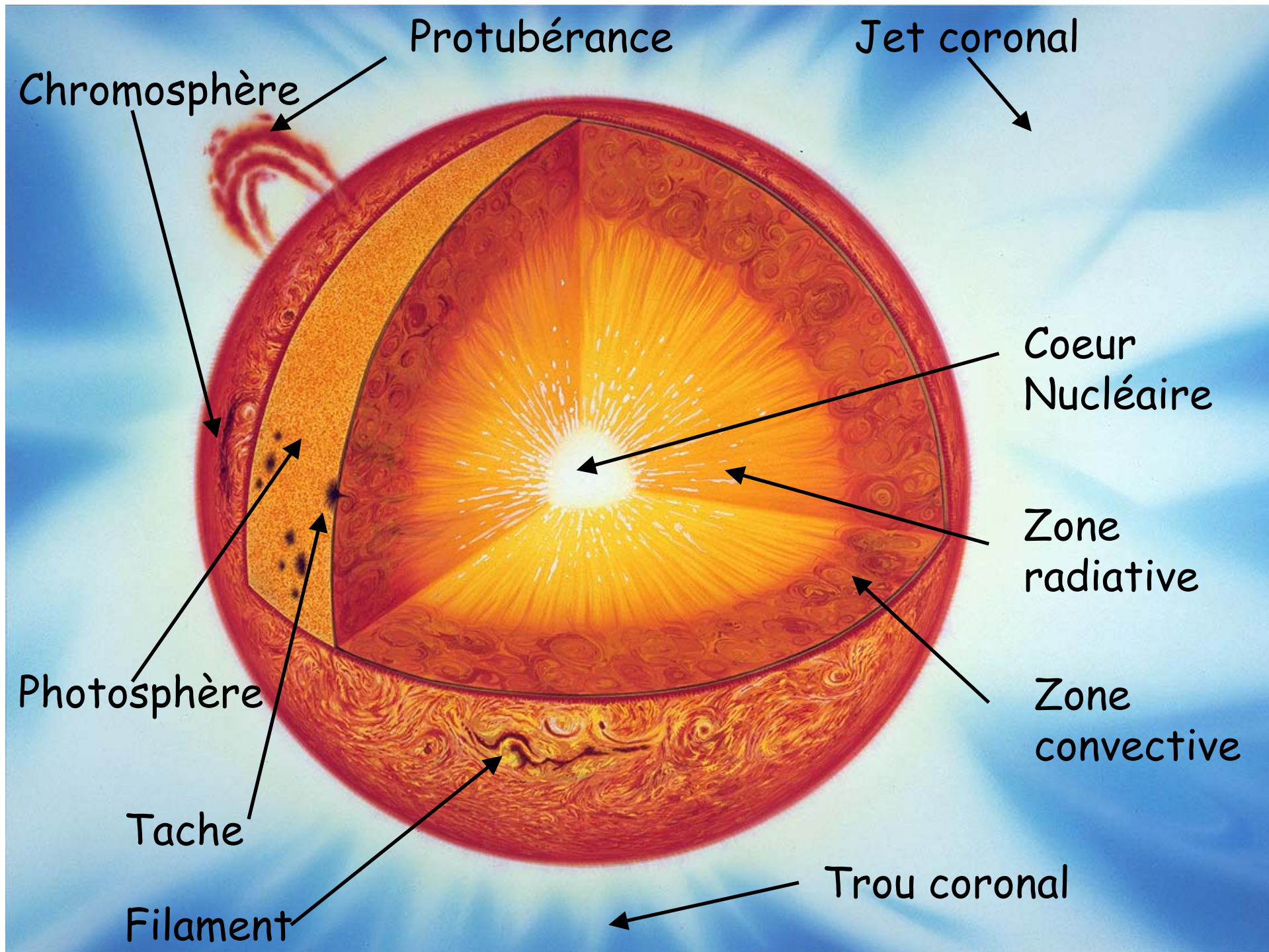
Sir Arthur Stanley Eddington, *The Internal Constitution of the Stars*, 1926, page 1, ligne 1.

« Il n'y a rien de nouveau sous le soleil, mais il y a beaucoup de choses anciennes que nous ignorons. »

*Ambrose Bierce (1842 - 1914), The Devil's Dictionary*



L'intérieur du soleil



# Quelques points à retenir

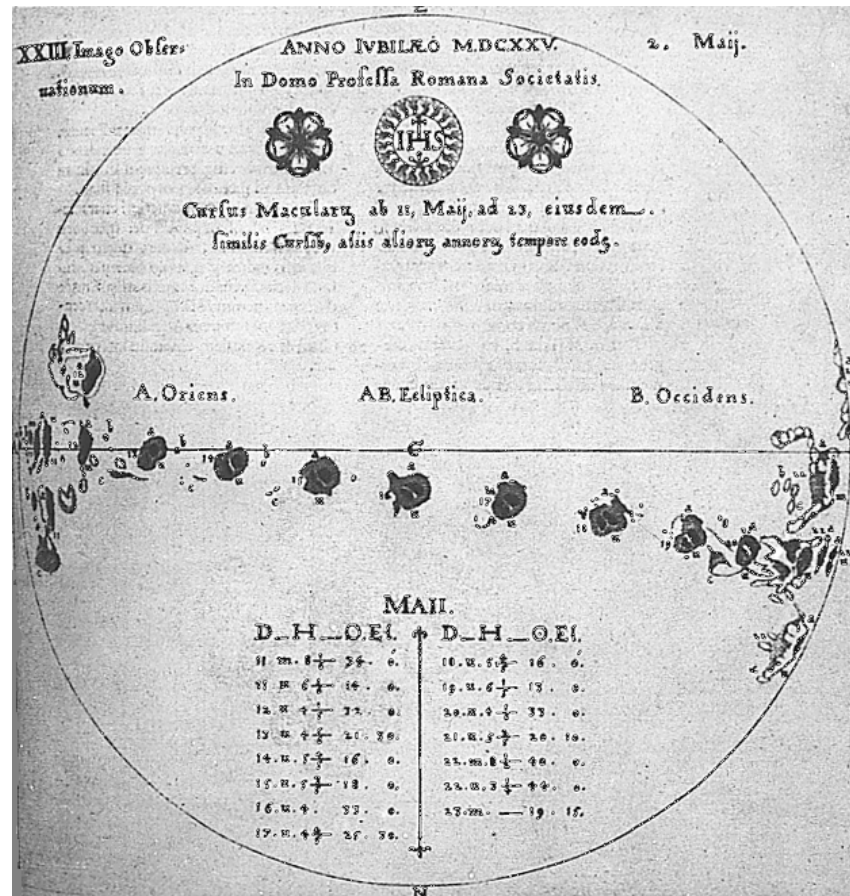
- Phénomène
  - Oscillations de « 5 minutes » de la surface
  - Ondes de pression, réfractées par la remontée de la vitesse sonore vers l'intérieur, et réfléchies par la chute de densité à la surface; excitées par la convection à la surface
- « Outils »
  - Fréquences de modes de résonance radiale
  - Temps de propagation des ondes horizontales
  - Amplitudes, largeurs, asymétries des modes
- Méthodes
  - Directes (modèle/mesure) et Inverses (équation intégrale)
  - Globales et Locales
- Résultats
  - $J_2$ ,  $\nu$ , WIMP, opacités, diffusion, éq. d'état, abondances
  - Rotation, cisaillements, écoulements, structures
- Frontières
  - Astérosismologie ( $g$ ,  $T_{eff}$ ) et modes de gravité (cœur)

# Pourquoi étudier le soleil?

## 1. Phénomènes à expliquer

- « parce qu'il est là », par curiosité intellectuelle
- Pour sa proximité

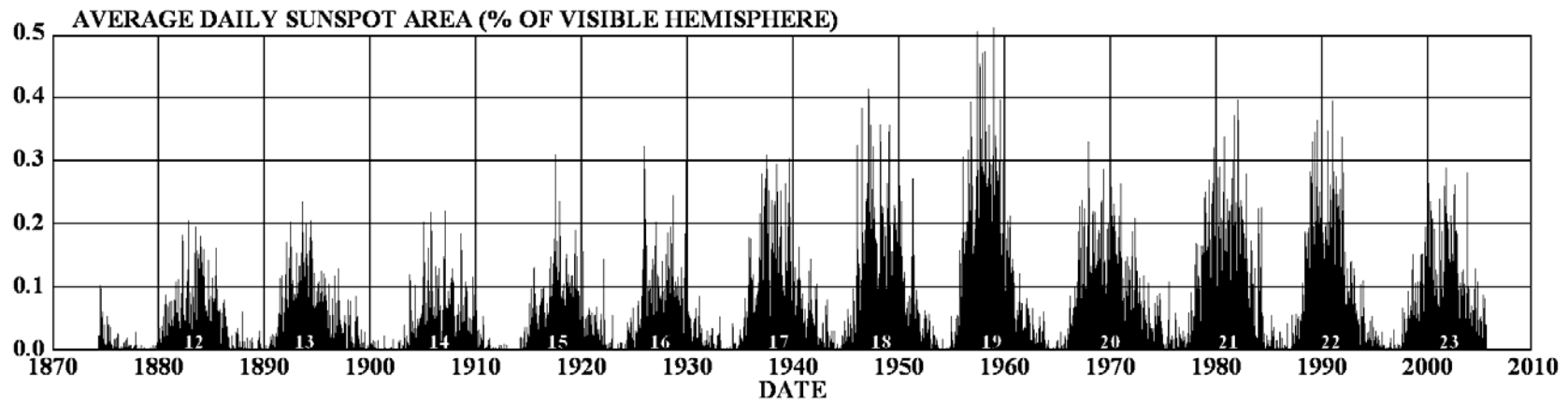
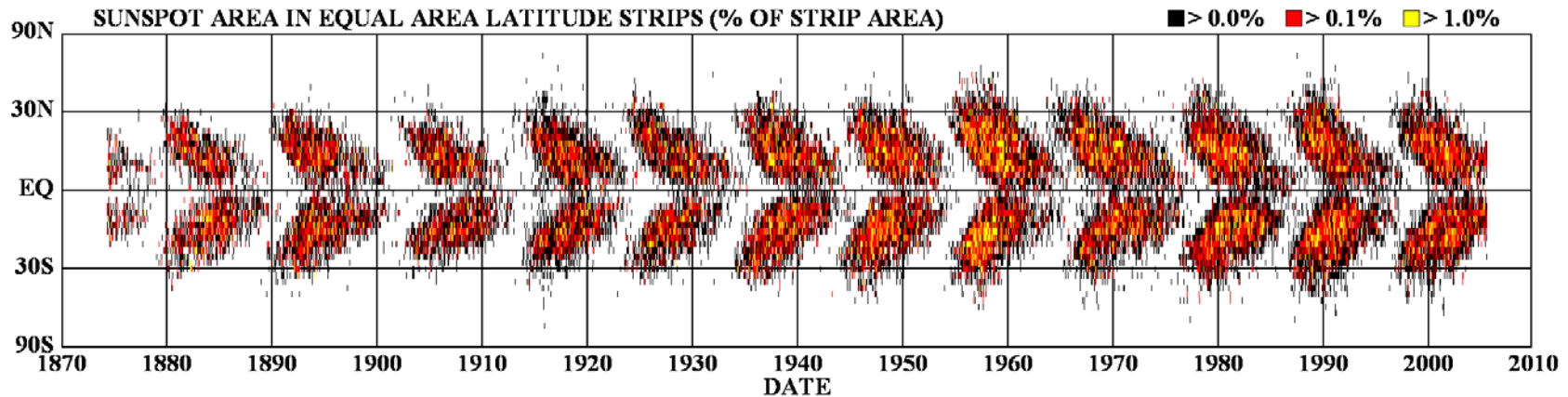
# Taches et rotation solaires



Passage d'un groupe de taches sur le disque solaire du 11 au 23 mai 1625



# Nombre et latitude des taches solaires

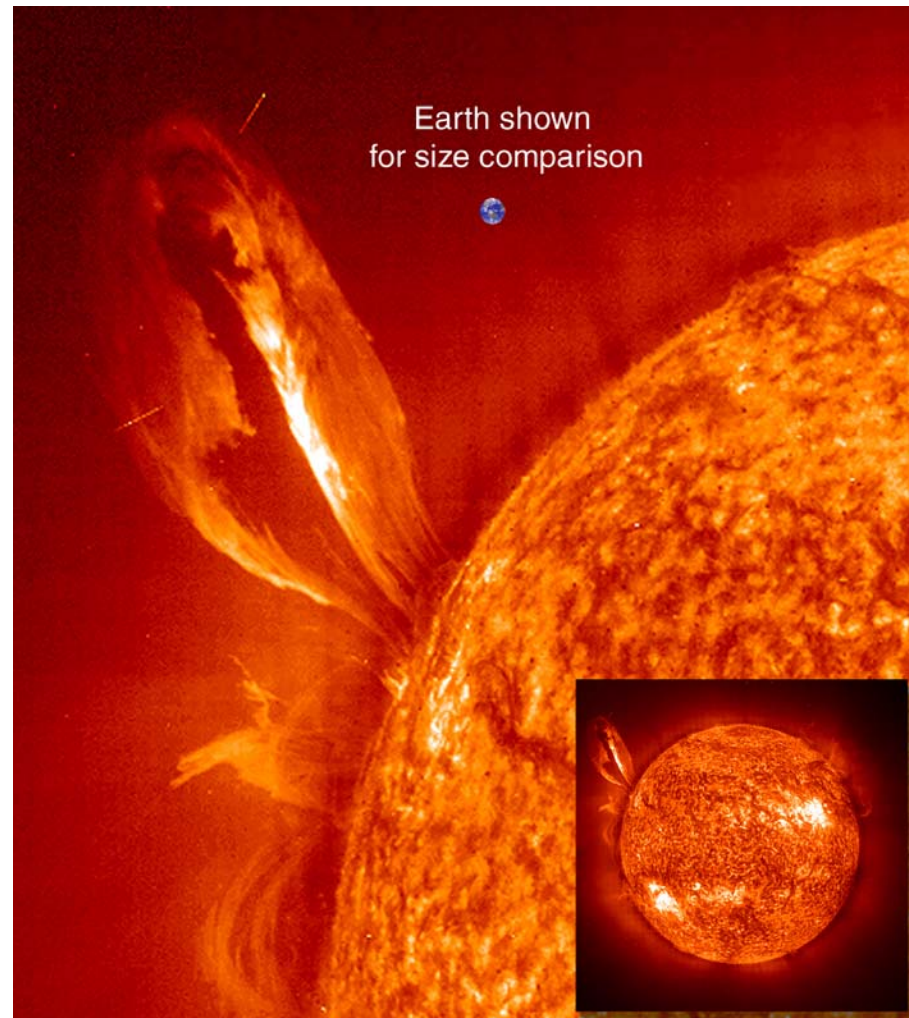


<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/bfly.gif>

NASA/NSSIC/HATHAWAY 2005/10

Mes remerciements à David Hathaway, NASA/MSFC

# Ejections coronales



*Mes remerciements à l'équipe EIT*

*« Si le soleil n'avait pas de champ magnétique, il serait aussi ennuyeux que la plupart des astronomes le croient »*

*(R.B. Leighton)*

*« Le champ magnétique est à l'astrophysique ce que le sexe est à la psychanalyse »*

*(H.C. van de Hulst)*

# Pourquoi étudier le soleil?

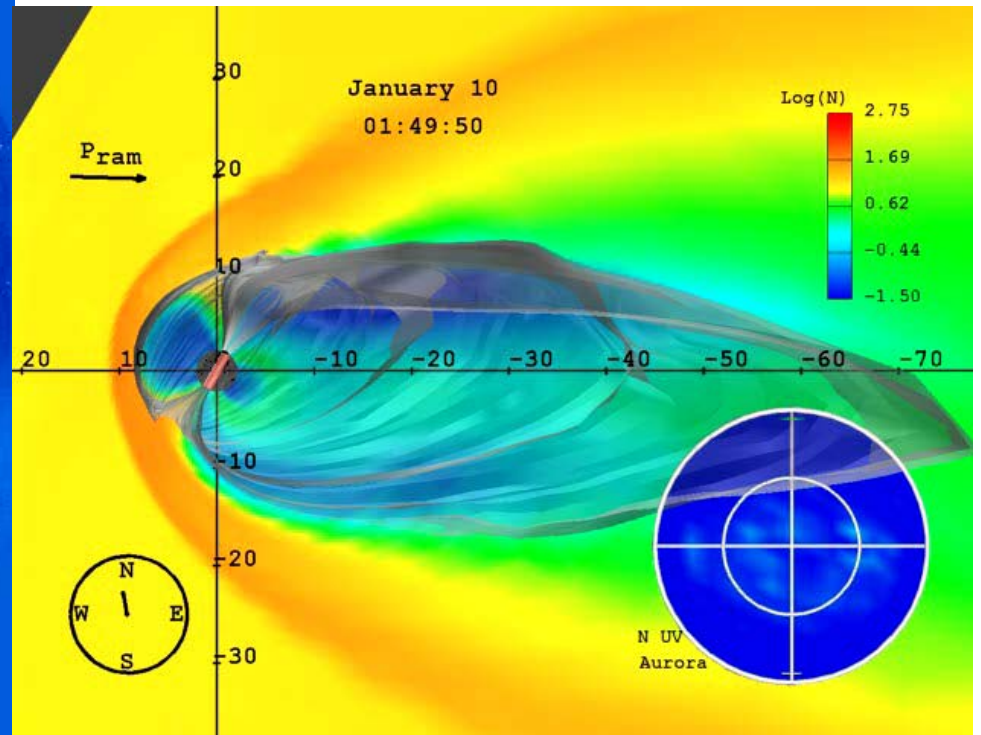
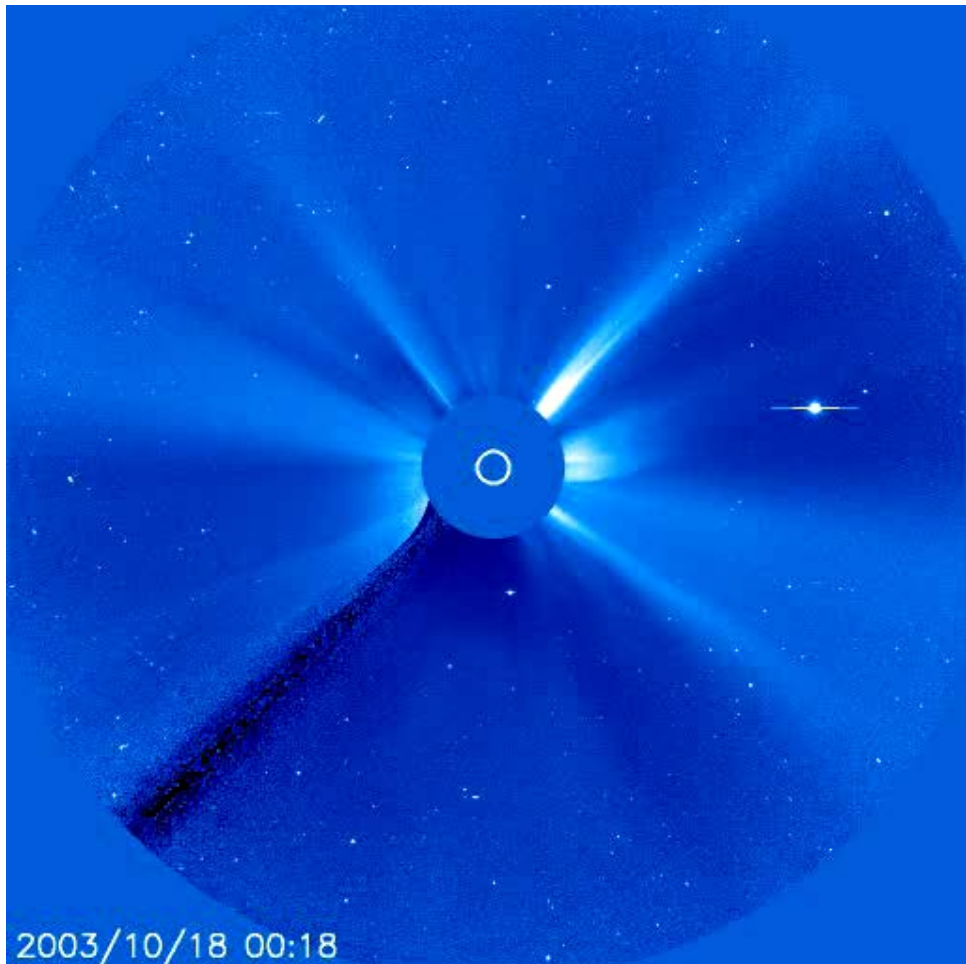
## 1. Phénomène à expliquer

- « parce qu'il est là », par curiosité intellectuelle
- Pour sa proximité

## 2. Influence du soleil sur l'héliosphère et la terre

- Le seul corps astrophysique d'importance pour la vie
- « Météo Spatiale »

# Nous vivons dans le soleil



# Pourquoi étudier le soleil?

## 1. Phénomène à expliquer

- « parce qu'il est là », par curiosité intellectuelle
- Pour sa proximité

## 2. Influence du soleil sur l'héliosphère et la terre

- Le seul corps astrophysique d'importance pour la vie
- « Météo Spatiale »

## 3. Autres étoiles

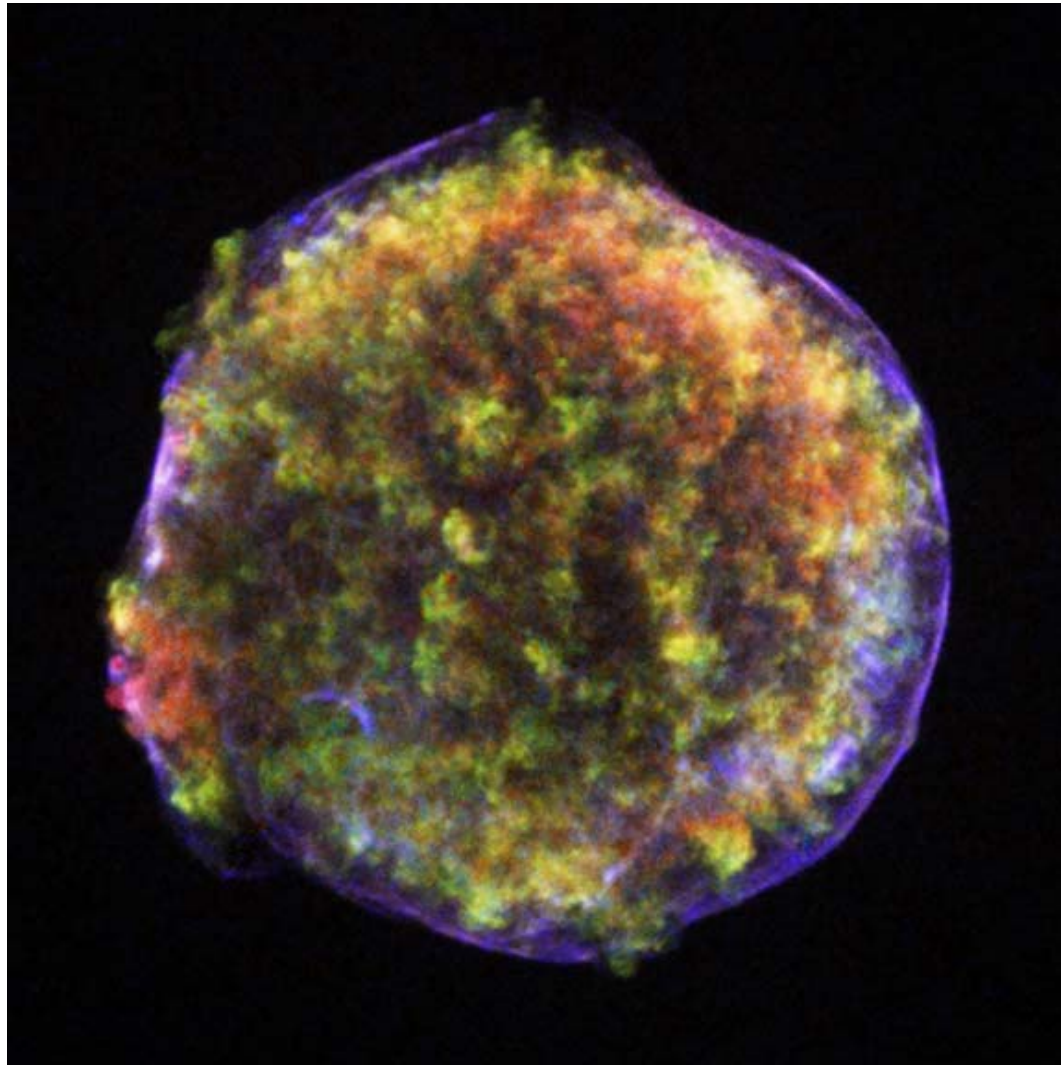
- La « pierre de Rosette » pour comprendre les autres étoiles

# La nébuleuse d'aigle, une pépinière d'étoiles



*Mes remerciements à NASA, ESA, STScI, J. Hester and P. Scowen (Arizona State University)*

# Supernova de Tycho Brahé (1572)



*Mes remerciements à Chandra NASA/CXC/Rutgers/J.Warren & J.Hughes et al.*



# Pourquoi étudier le soleil?

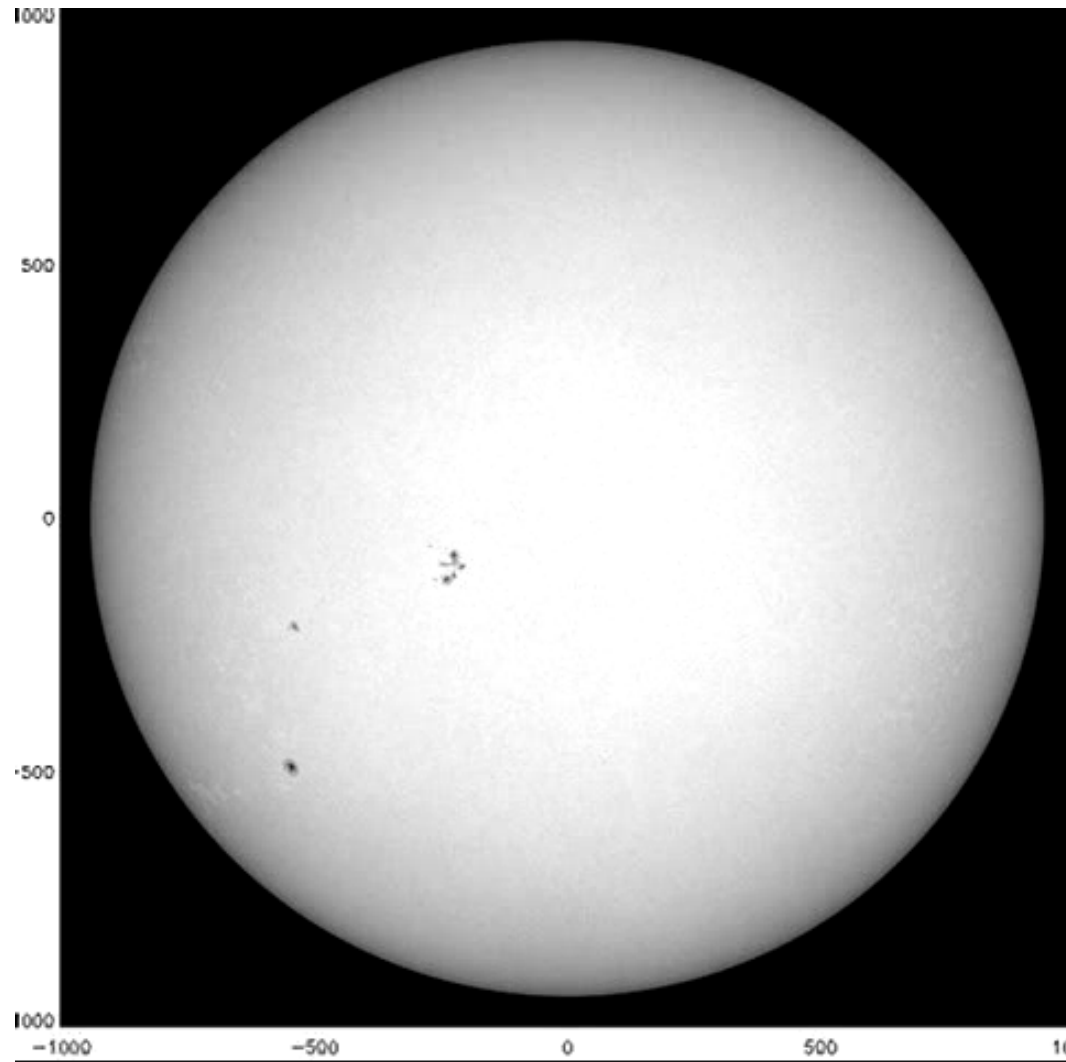
1. **Phénomène à expliquer**
  - « parce qu'il est là », par curiosité intellectuelle
  - Pour sa proximité
2. **Influence du soleil sur l'héliosphère et la terre**
  - Le seul corps astrophysique d'importance pour la vie
  - « Météo Spatiale »
3. **Autres étoiles**
  - La « pierre de Rosette » pour comprendre les autres étoiles
4. **Laboratoire de physique fondamentale**

# Le télescope solaire qui a reçu le prix Nobel



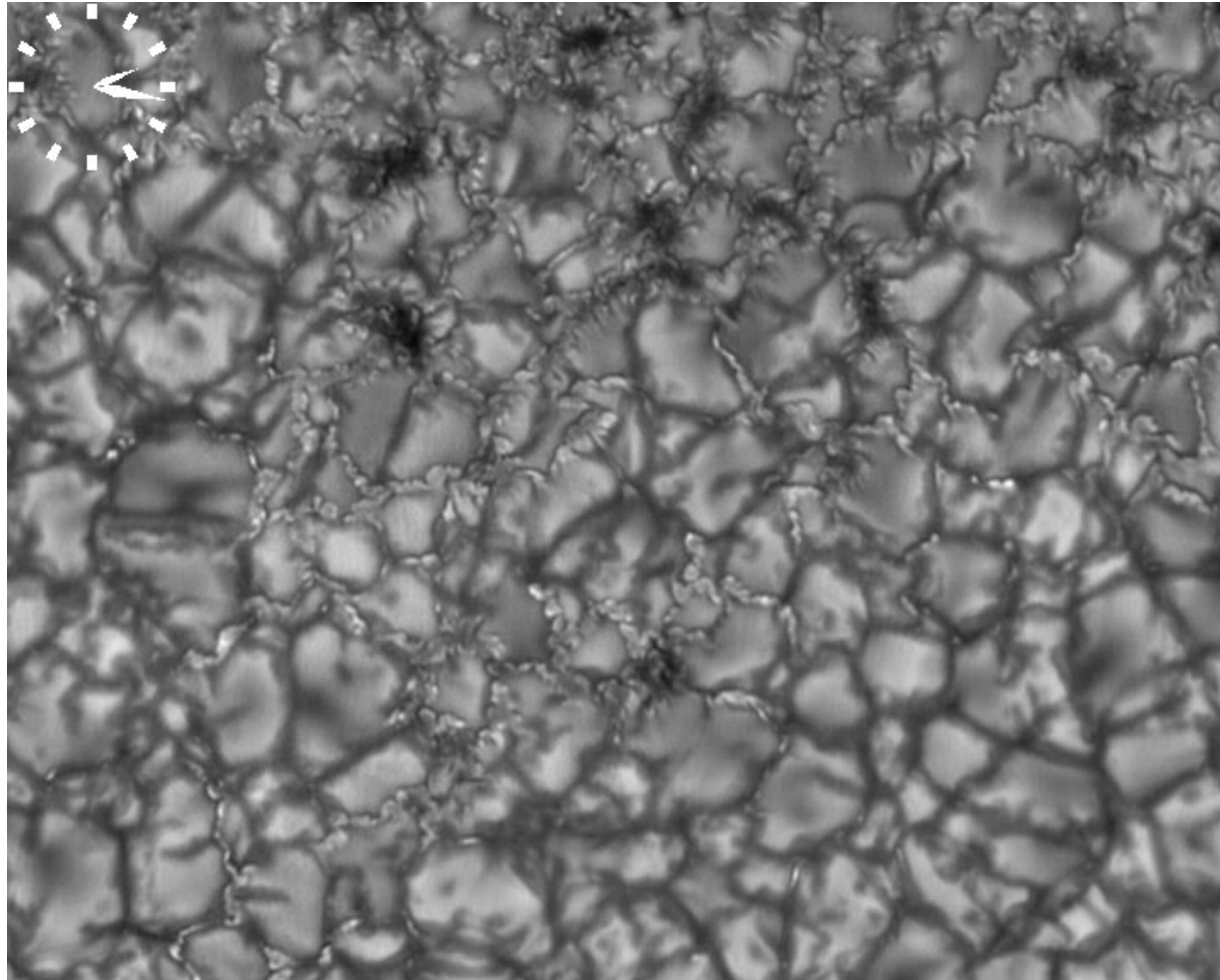
Détecteur des neutrinos avec Ray Davis

# La « surface » solaire



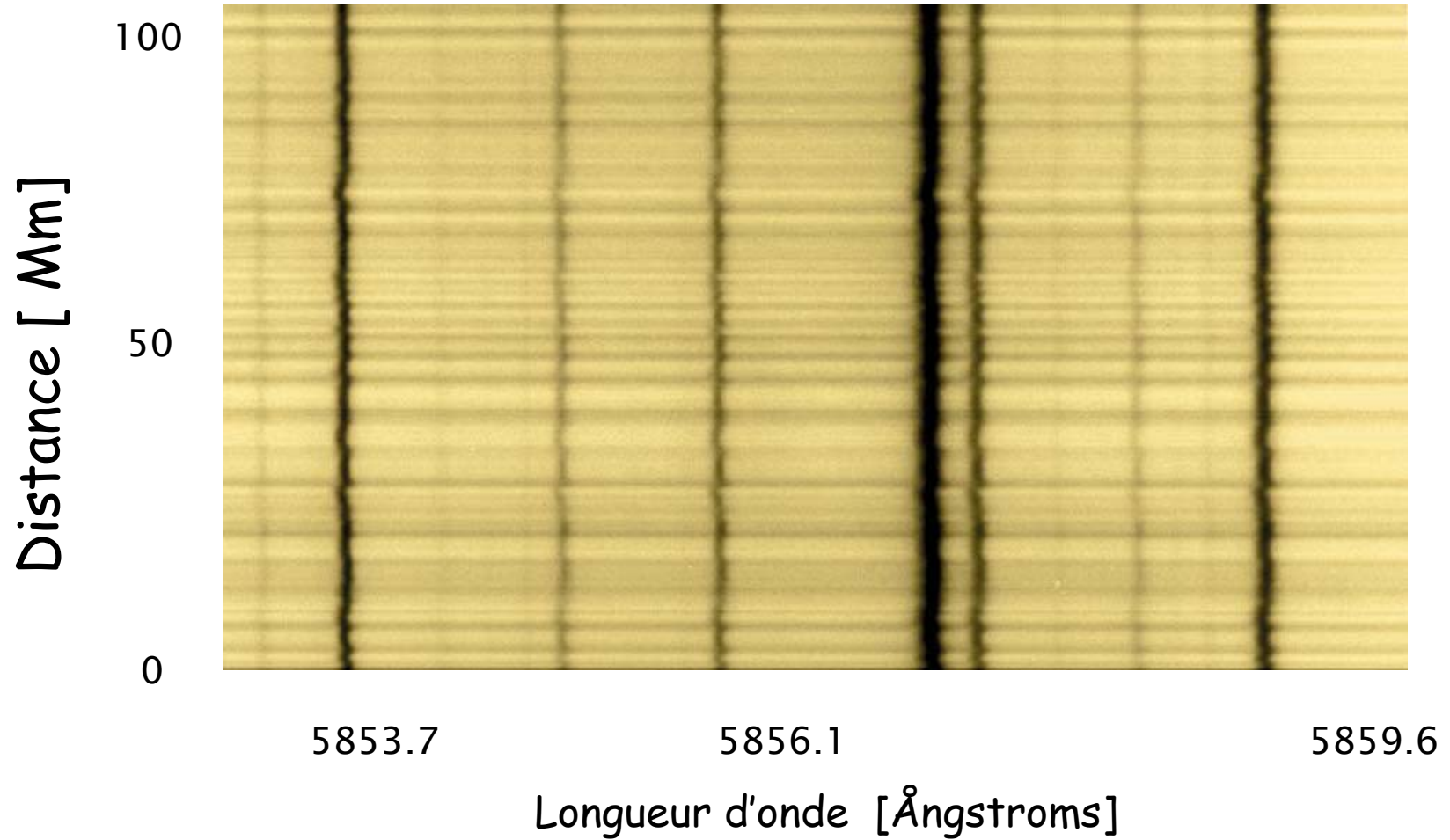
*Mes remerciements à Mats Carlson, Oslo (données en provenance du Swedish Solar Telescope, La Palma)*

# La « surface » solaire dynamique

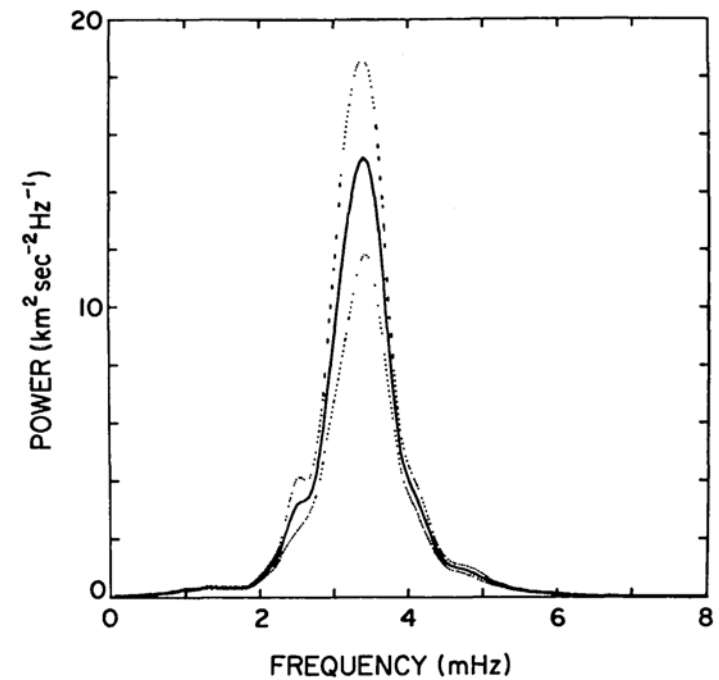
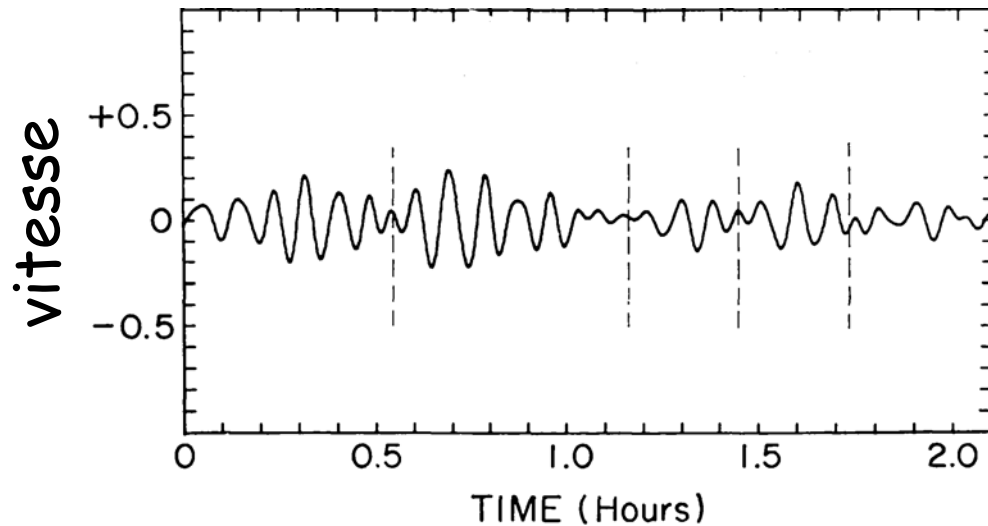


Mes remerciements à Luc Rouppe van der Voort, Oslo (données en provenance du Swedish Solar Telescope, La Palma)

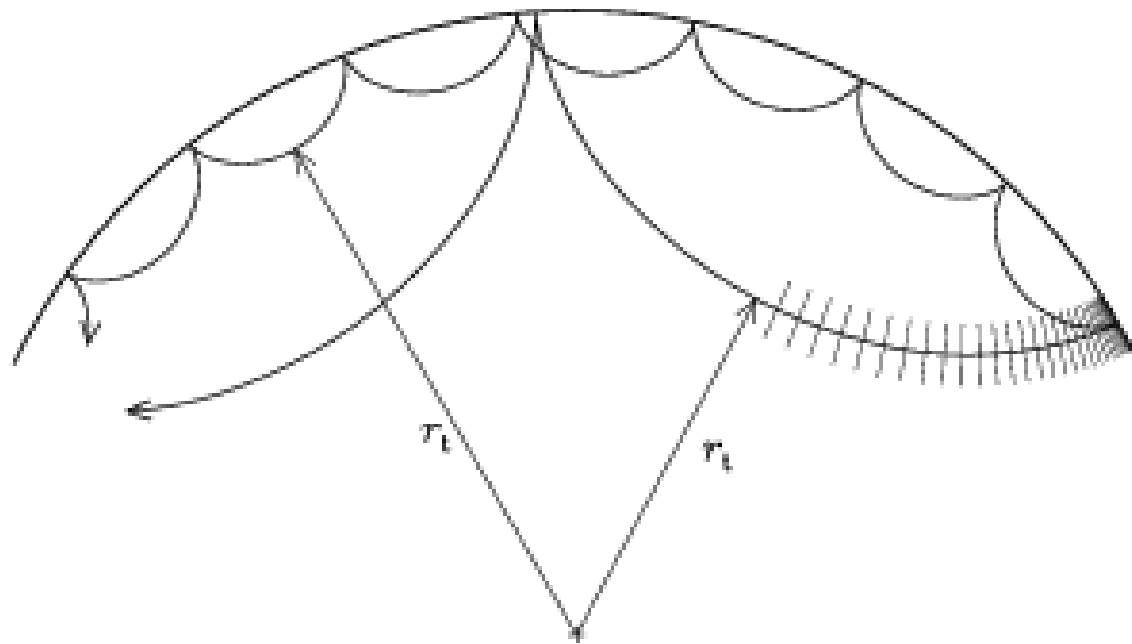
# Spectre de fente longue



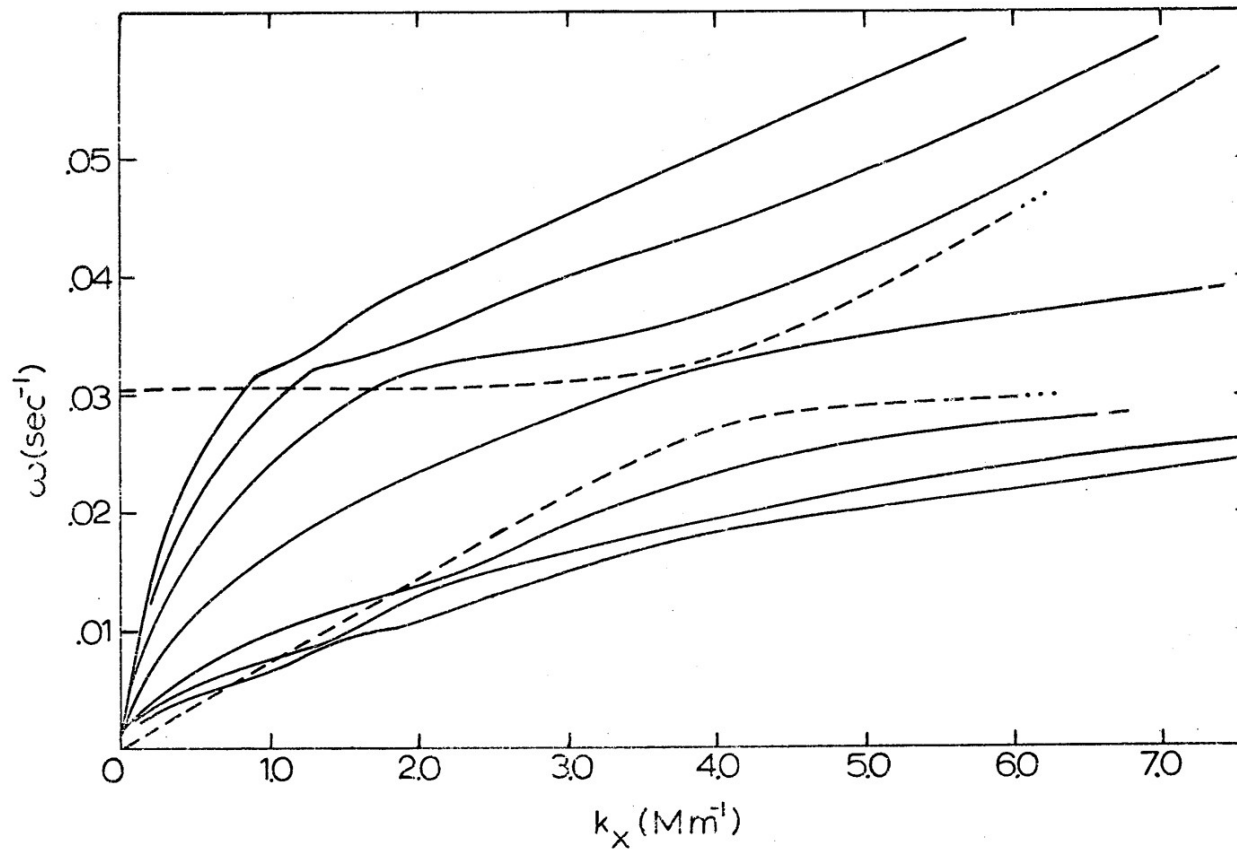
# Oscillation de 5 minutes



# Réfraction des ondes sonores

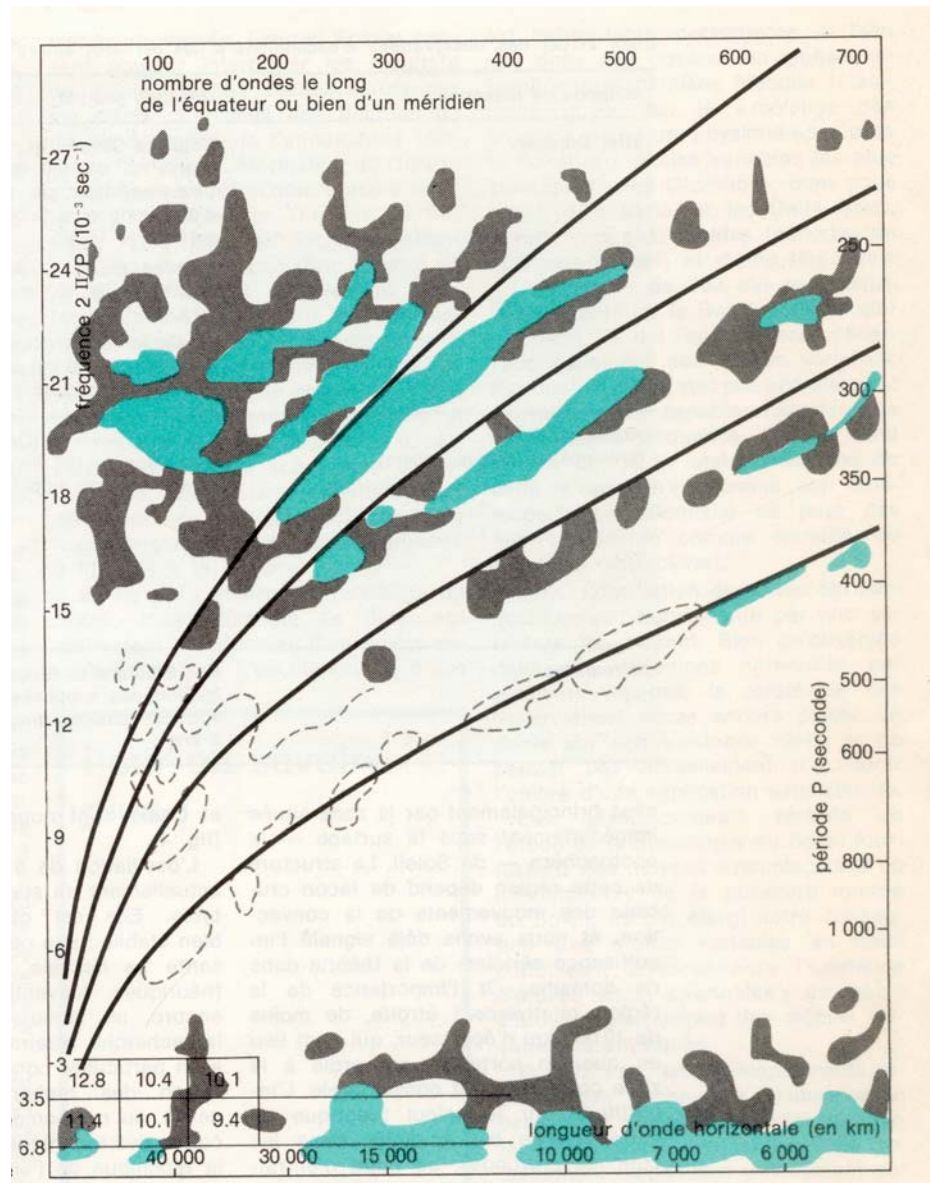


# Prédiction

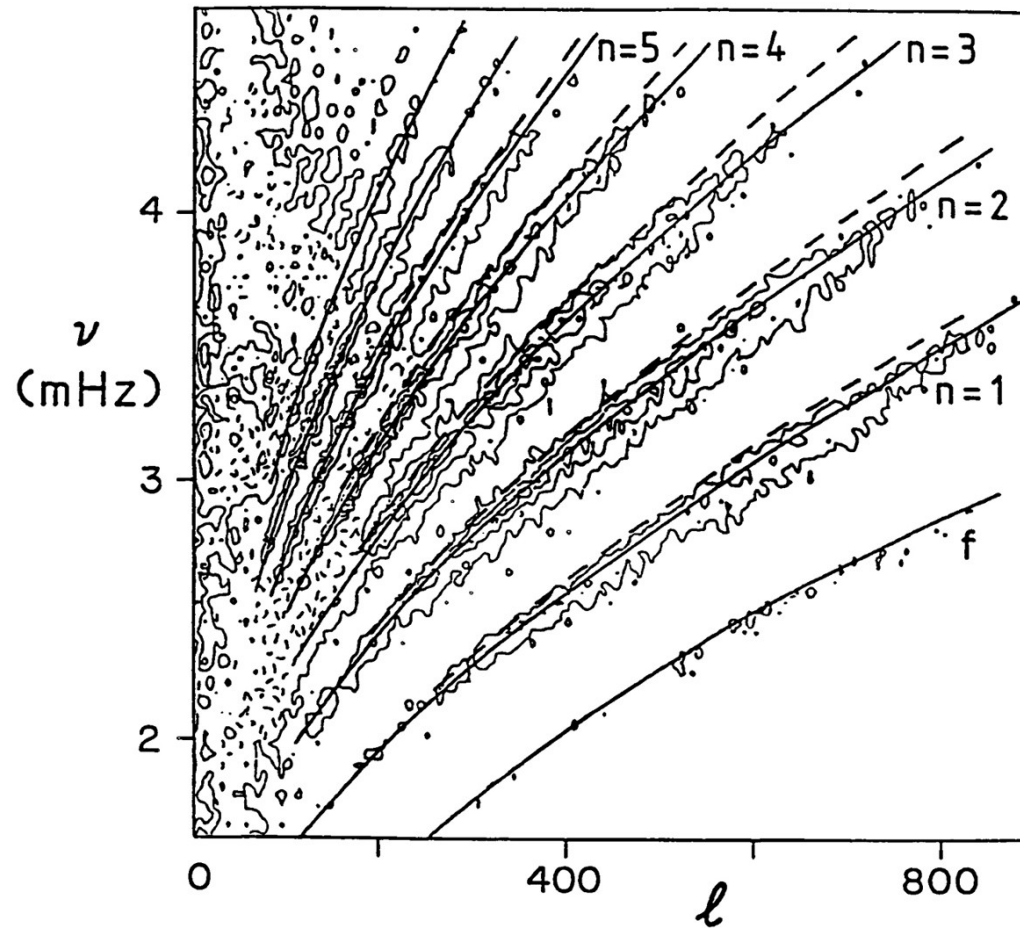




# Confirmation



# Comparaison entre théorie et observation



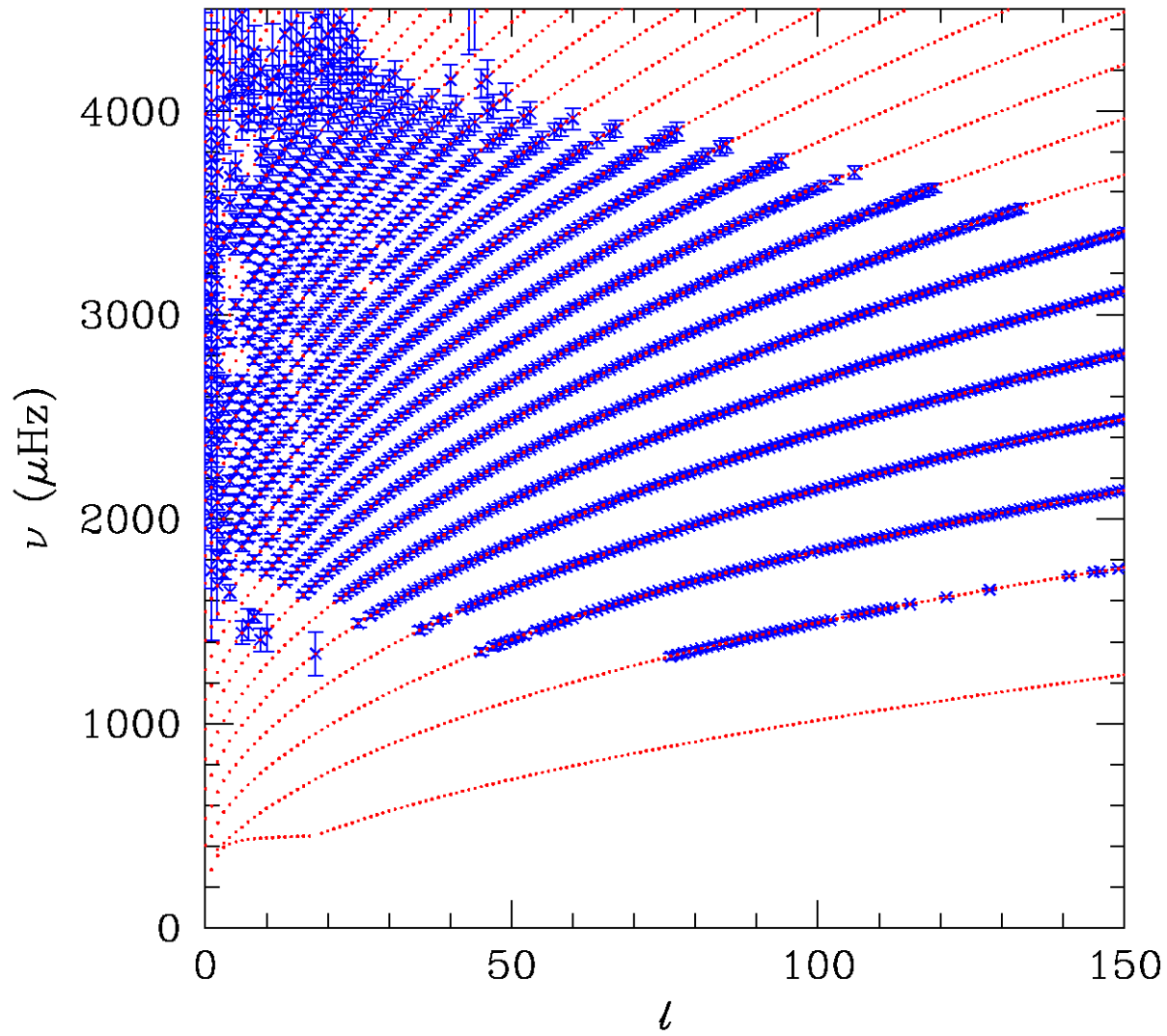
*Mes remerciements à Franz-Ludwig Deubner, Roger Ulrich et Ed Rhodes*

# Caricature de la « méthode scientifique »

- Découverte de faits inattendus
- Proposition de plusieurs descriptions possibles
- Capacité de démontrer qu'elles sont fausses, ou prévision de phénomènes qui ne sont pas encore observés
- Confirmation des hypothèses
- Utilisation des petits écarts comme outil

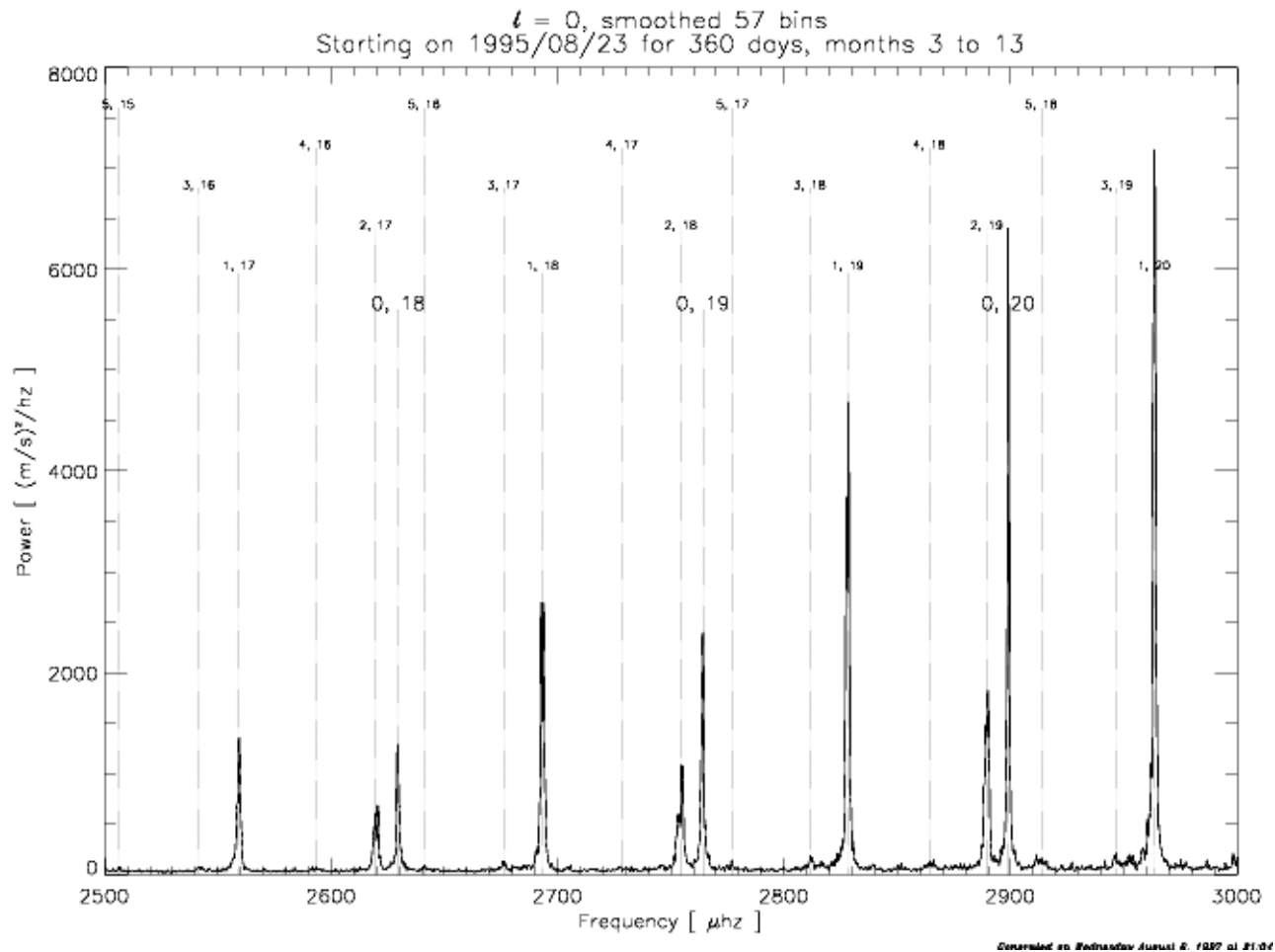
# Précision des mesures

*1000  $\sigma$   
barres  
d'erreur*

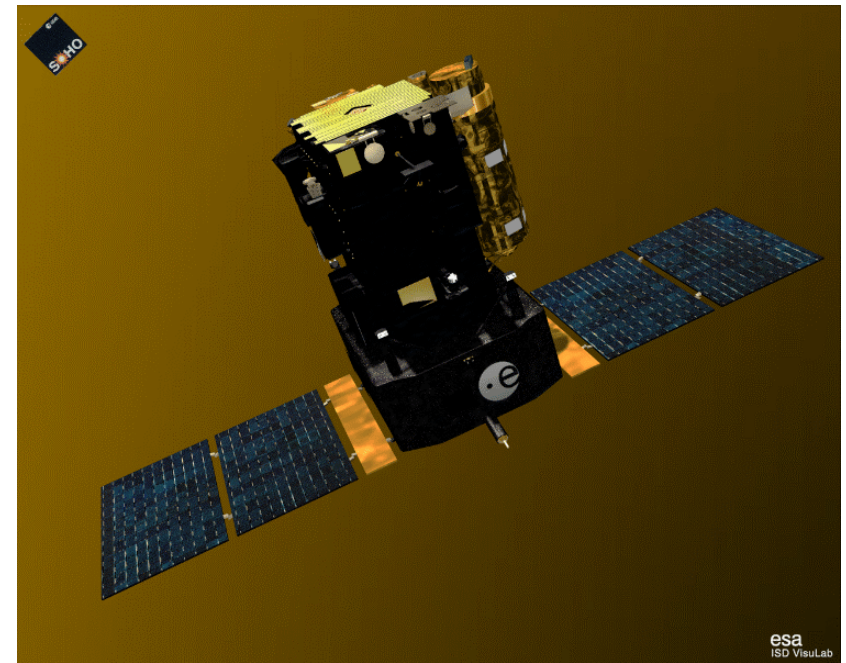
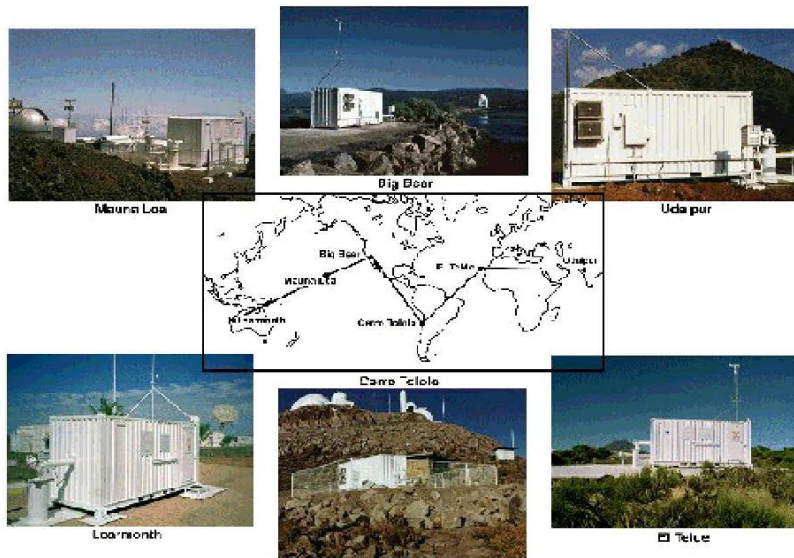


*Mes remerciements à H.M. Antia*

# Spectre qui donne les fréquences



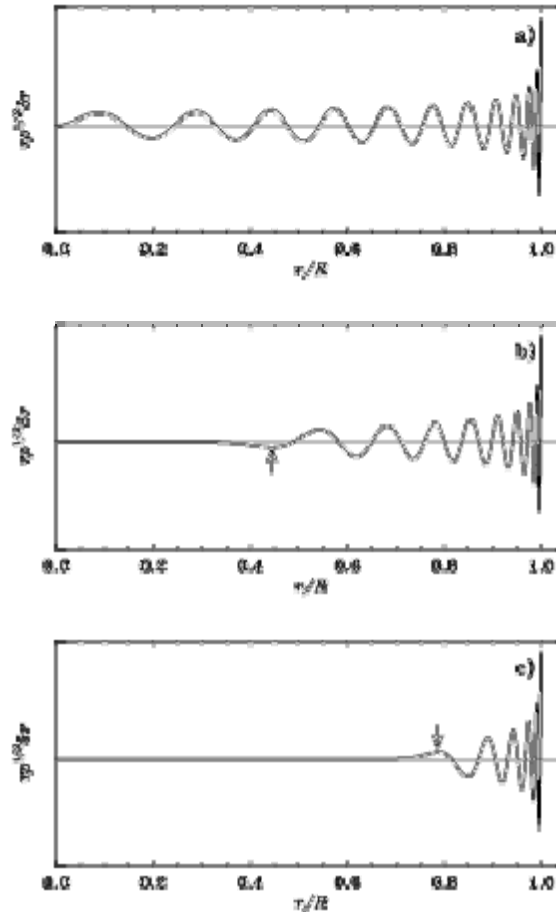
# Des moyens au sol et dans l'espace



Pole Sûd, IRIS, BiSON, TON, GONG, ECHO

SMM, IPHIR, SOHO, SDO

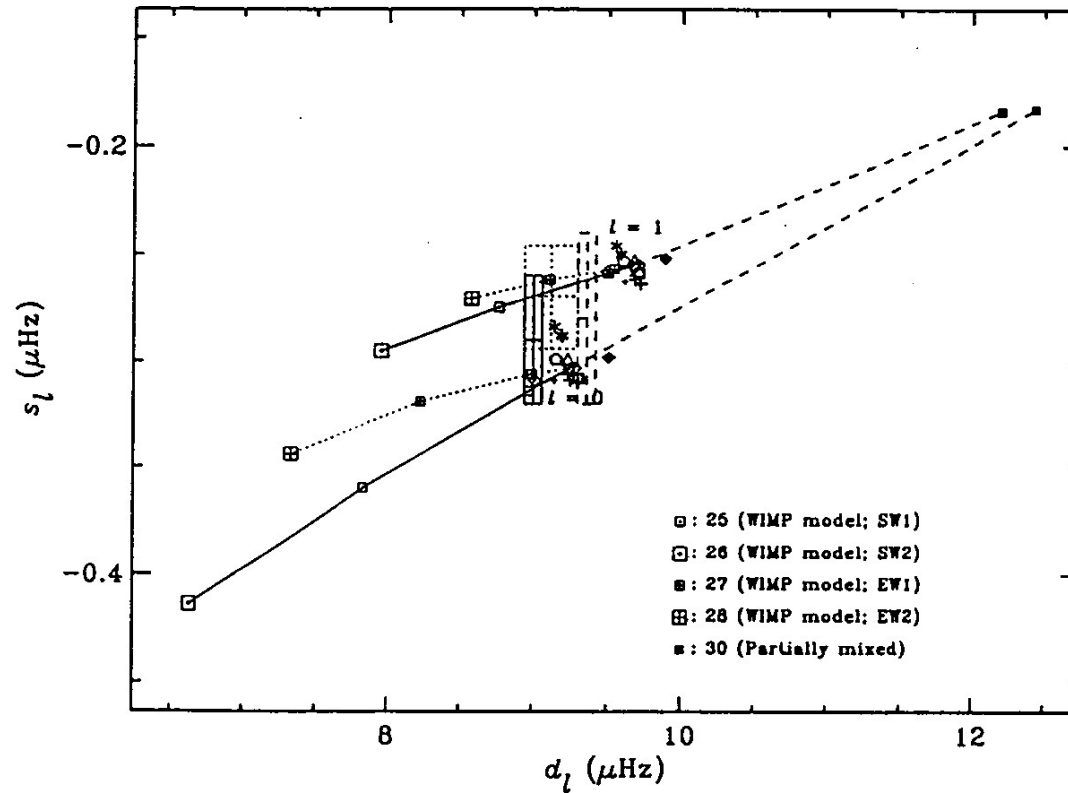
# Fonctions propres des modes de pression



a)  $\ell = 0, n = 23, \nu = 3320 \mu\text{Hz}$ ; b)  $\ell = 20, n = 17, \nu = 3375 \mu\text{Hz}$ ; c)  $\ell = 60, n = 10, \nu = 3234 \mu\text{Hz}$ .

*Mes remerciements à Jørgen Christensen-Dalsgaard*

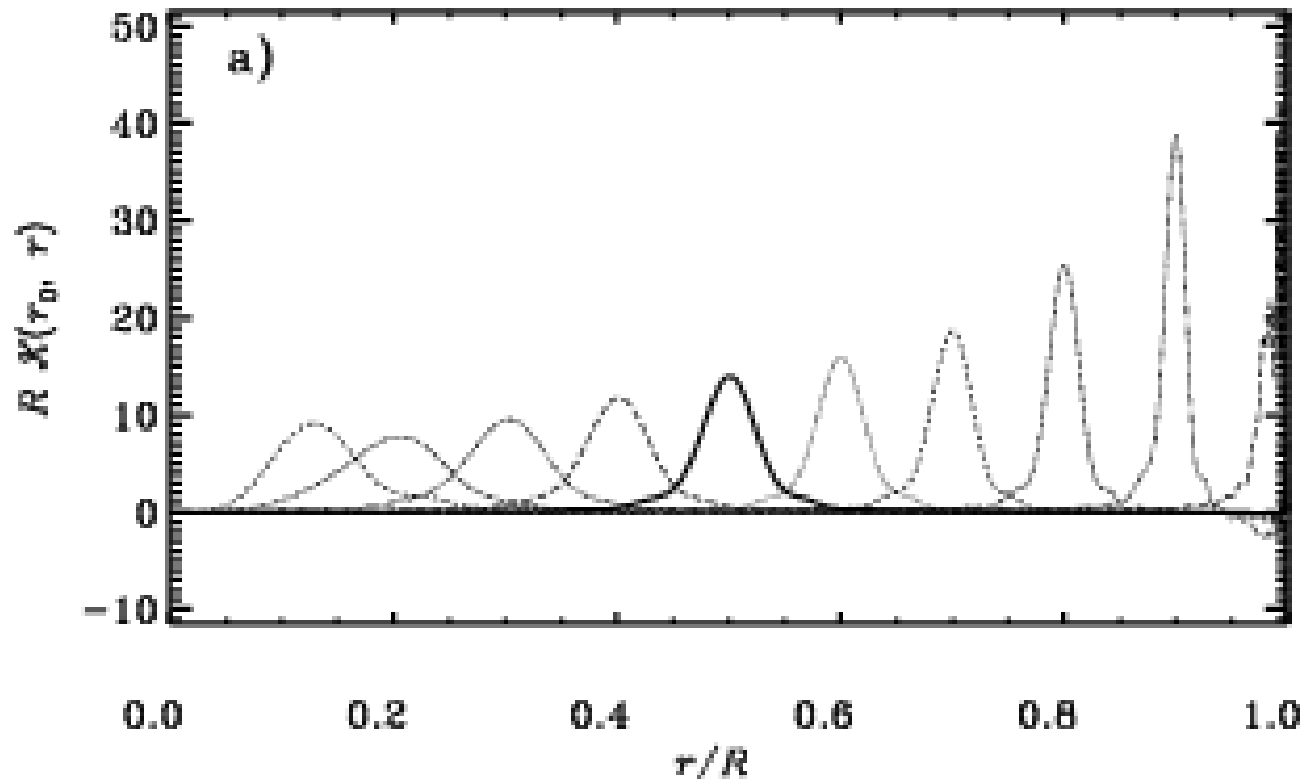
# WIMPs: « Méthode directe »



*Avec mes remerciements aux groupes BiSON et IRIS, et à Jørgen Christensen Dalsgaard, TAC, Aarhus*

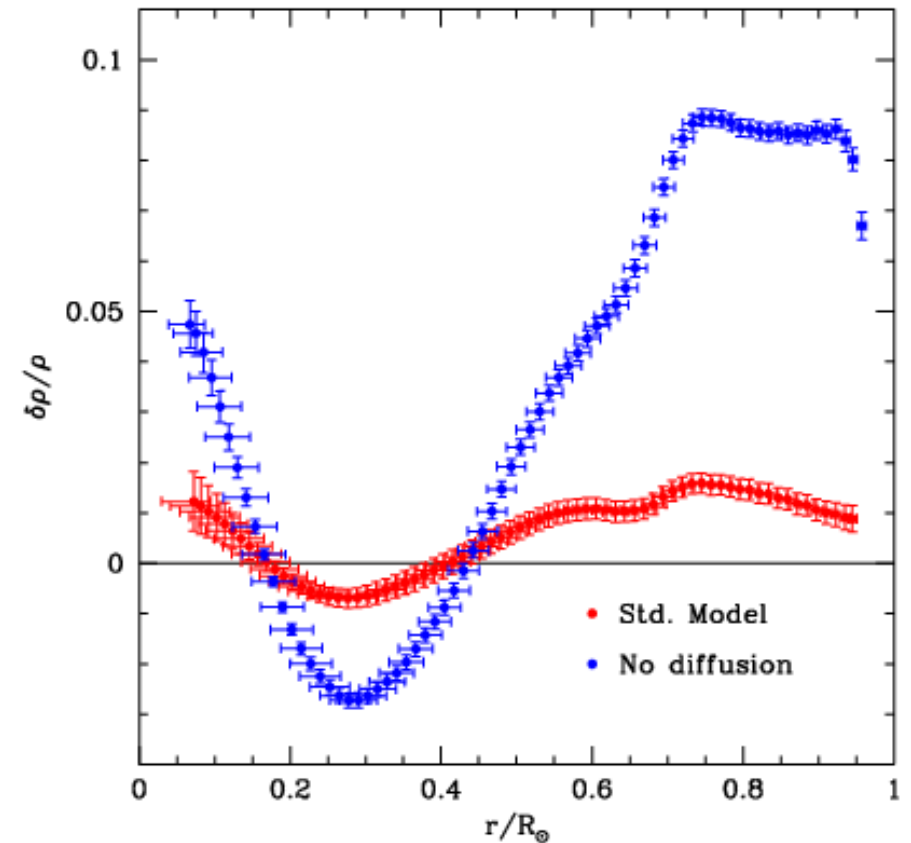
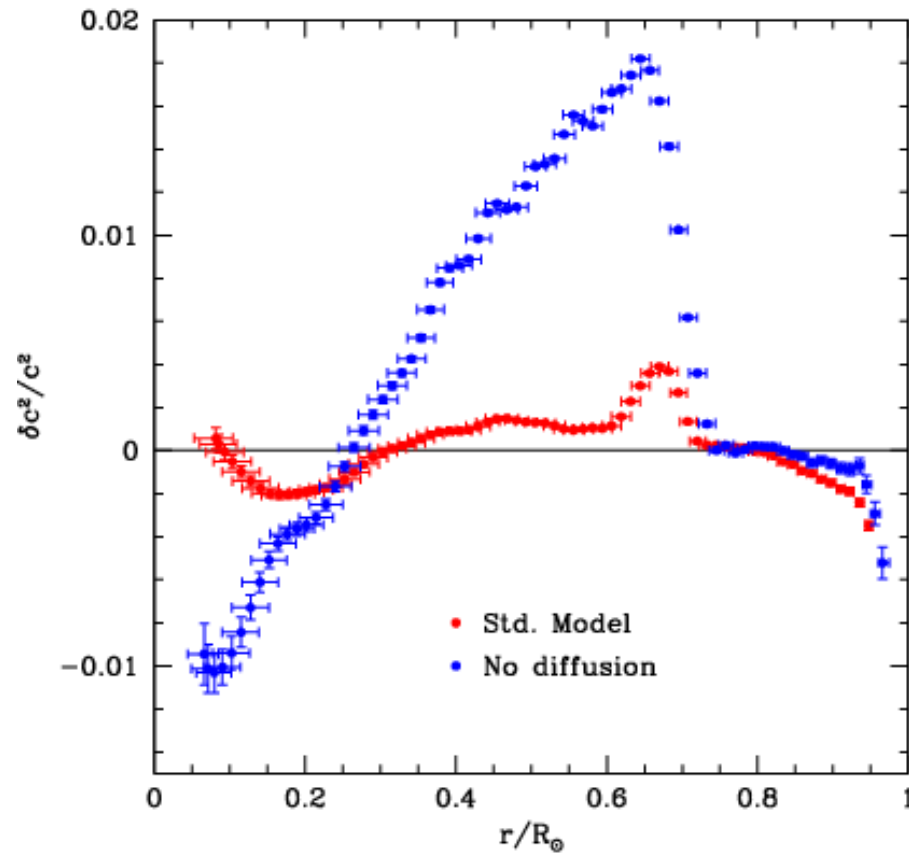


# Méthodes Inverse



*Mes remerciements à Jørgen Christensen Dalsgaard, TAC, Aarhus*

# Nécessité de diffusion



*Avec mes remerciements à Basu, Pinsonneault & Bahcall 2000*

# Effet de diffusion sur les âges stellaires

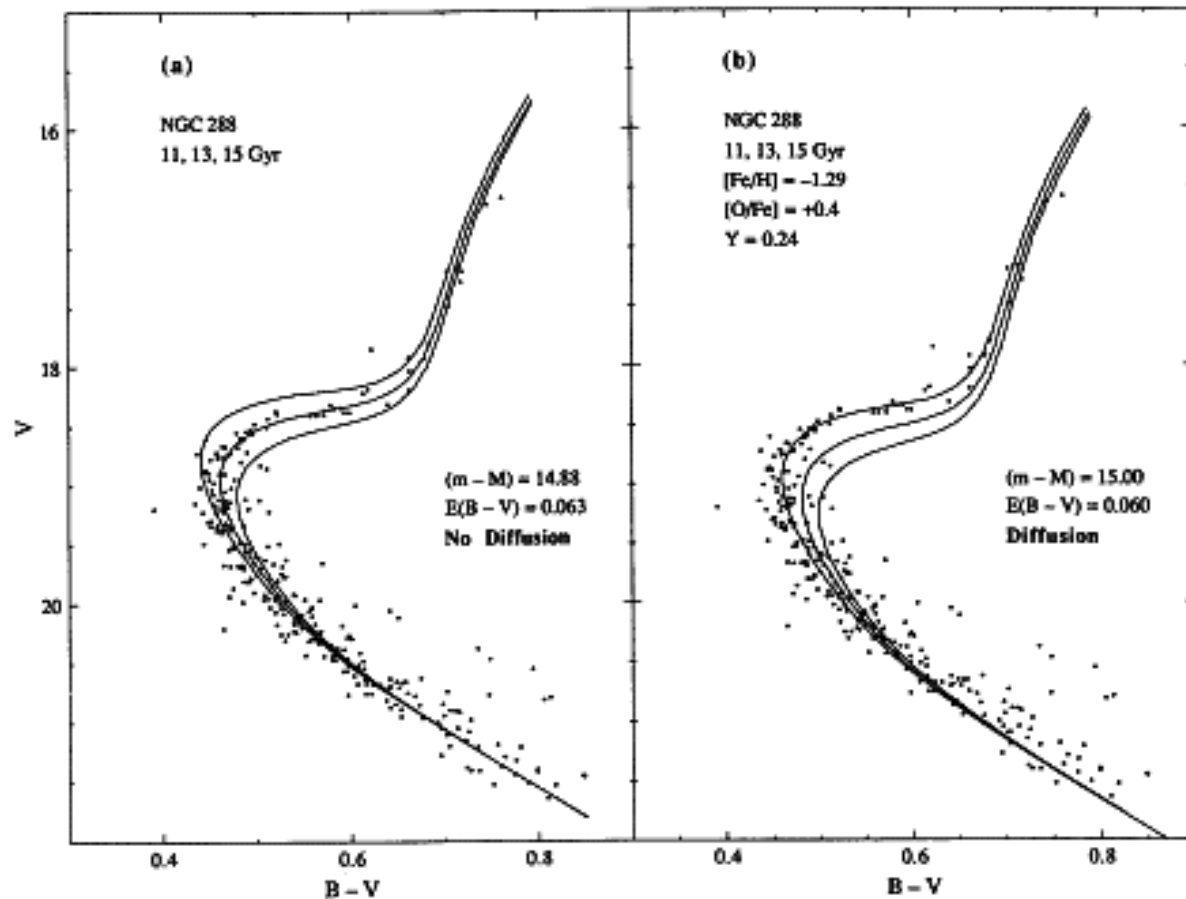


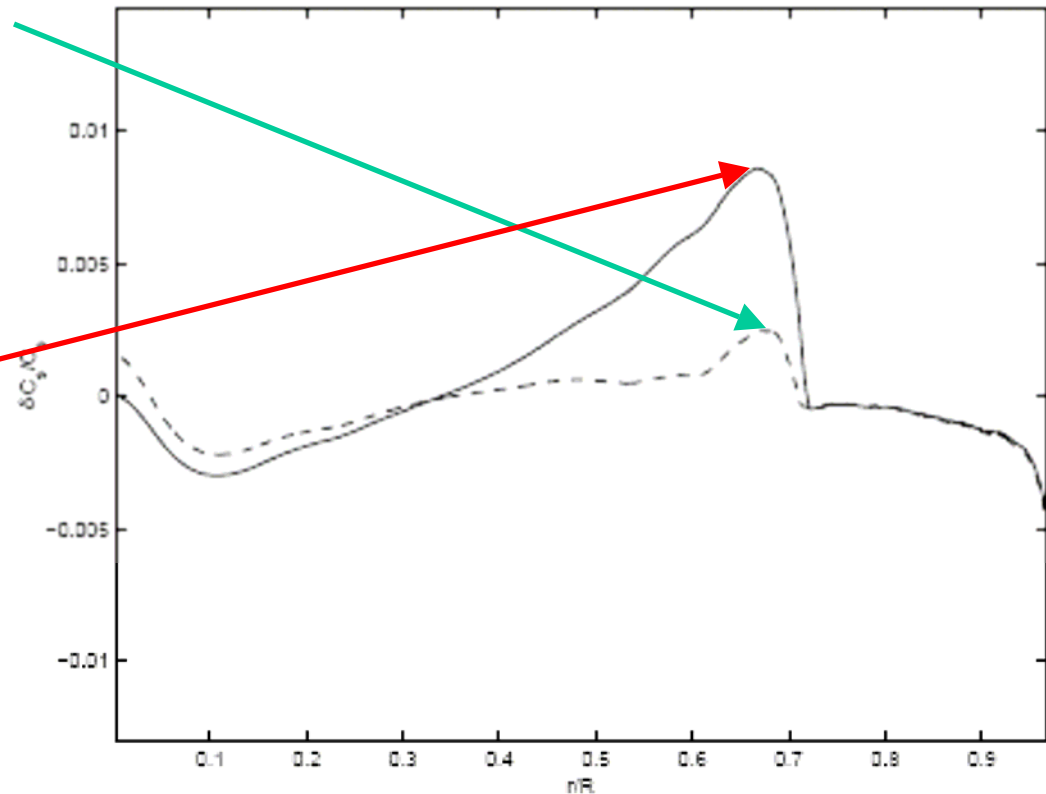
FIG. 6.—Isochrone fits to NGC 288, photometry from Bolte (1990). (a) Standard isochrones. (b) Diffusive isochrones.

Avec mes remerciements à *Chaboyer et al. 1992*

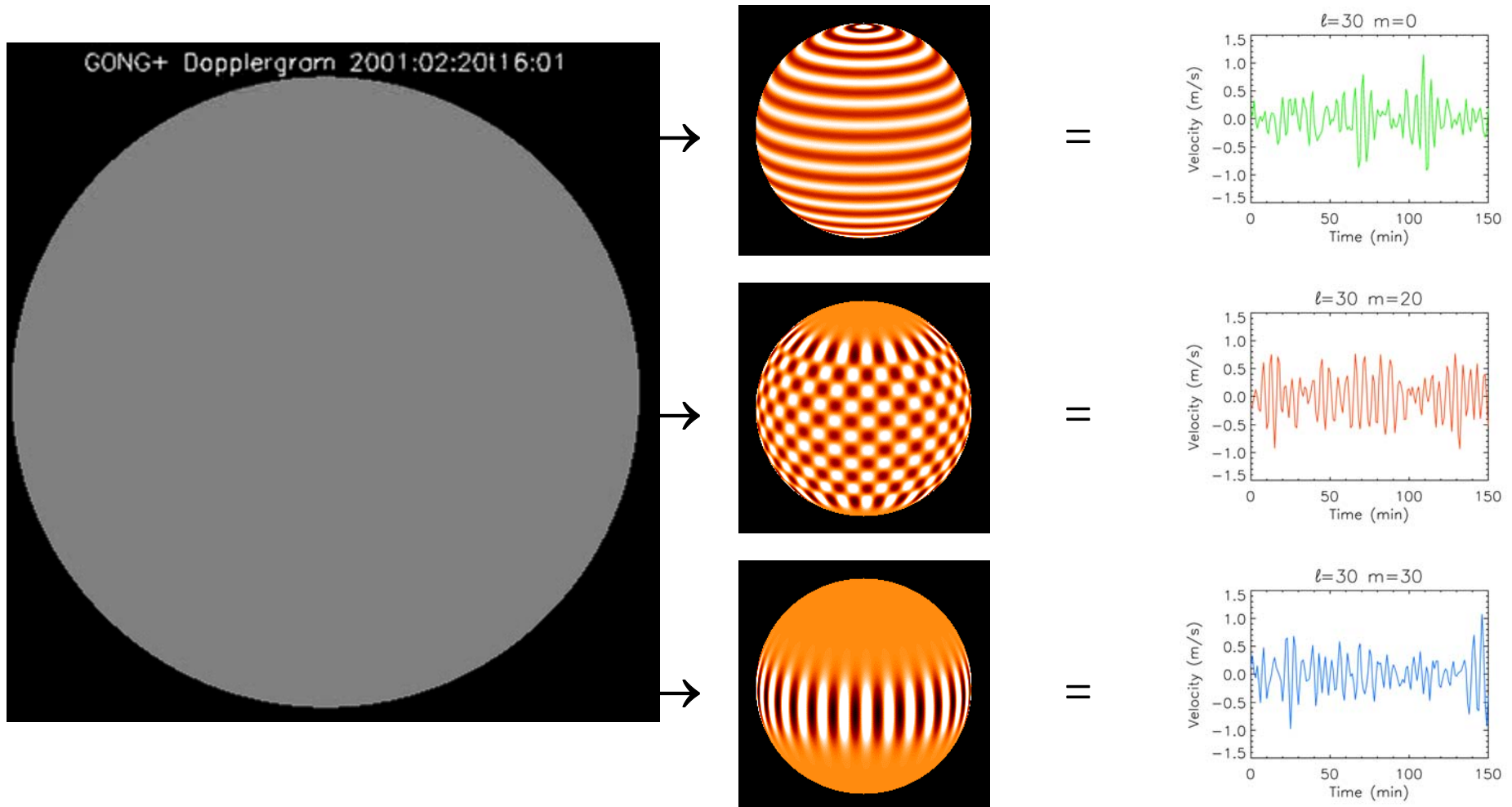
# Révision des abondances

Grevesse & Sauval  
(1998)  
 $Z=0.017$

Asplund et al  
(2004, 2005)  
 $Z=0.012$   
O, C, N all  
reduced.

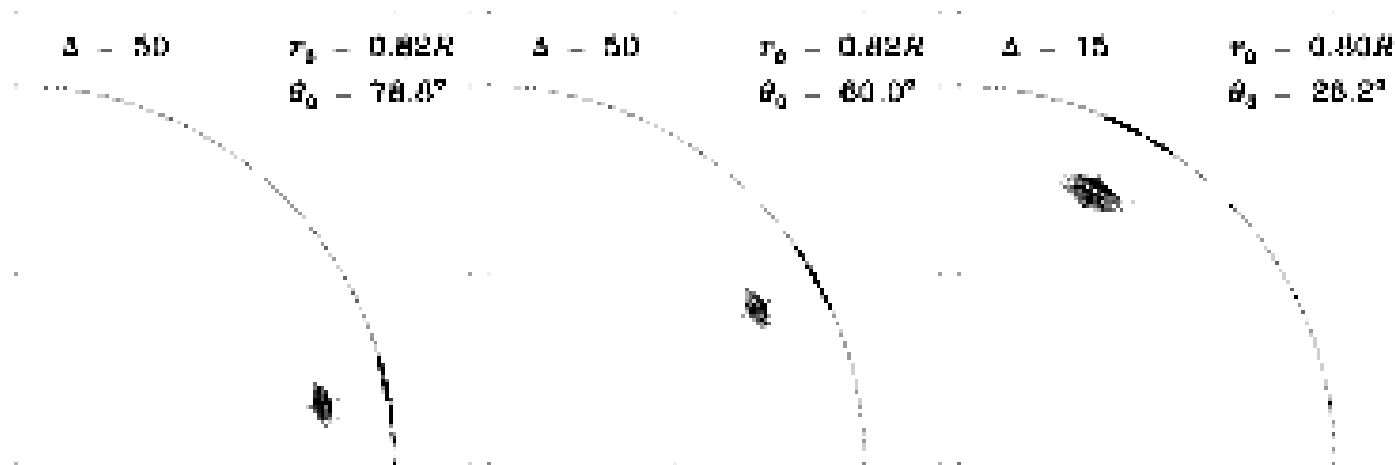


# Décomposition des champs en modes

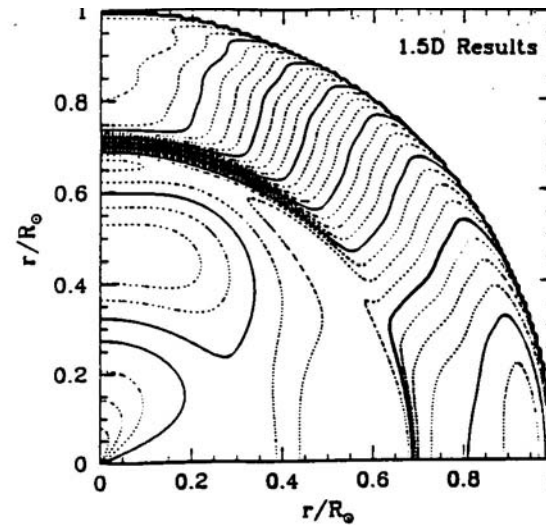
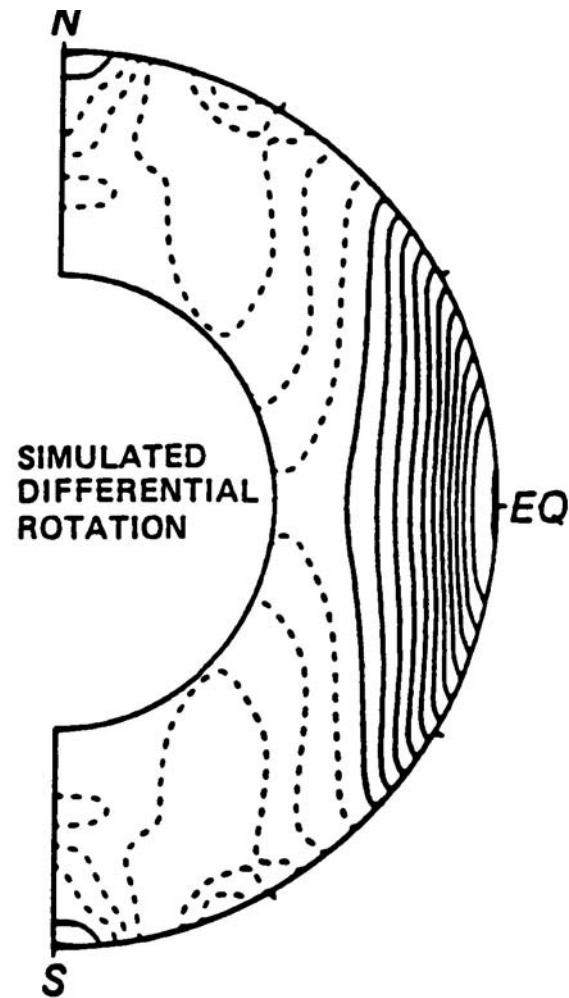


*Mes remerciements à Frank Hill*

# Sensibilité à la rotation interne

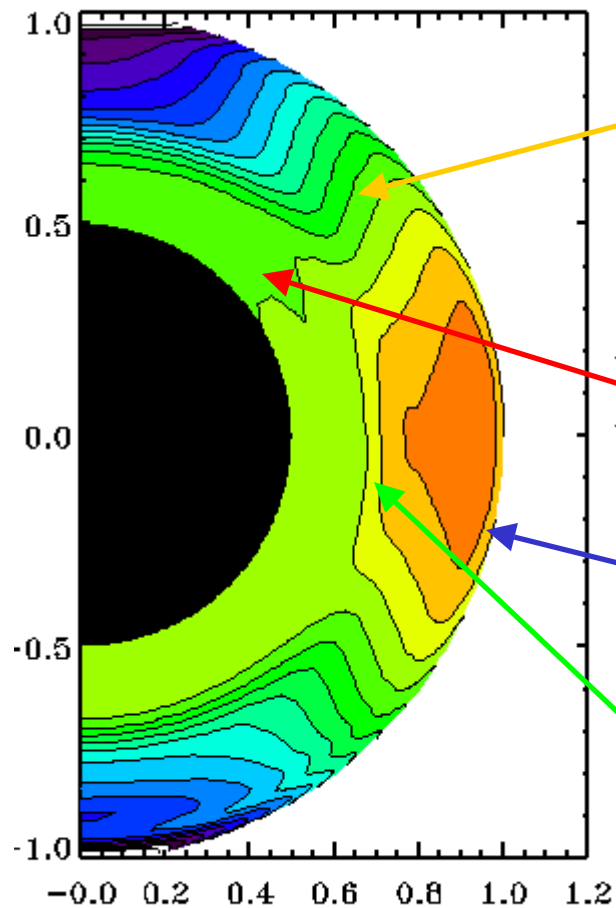


# Rotation interne: Prédiction $\neq$ Observation



*Mes remerciements à Sasha Brun et Juri Toomre, résultats de Peter Gilman et Gary Glatzmeier*

# Rotation interne

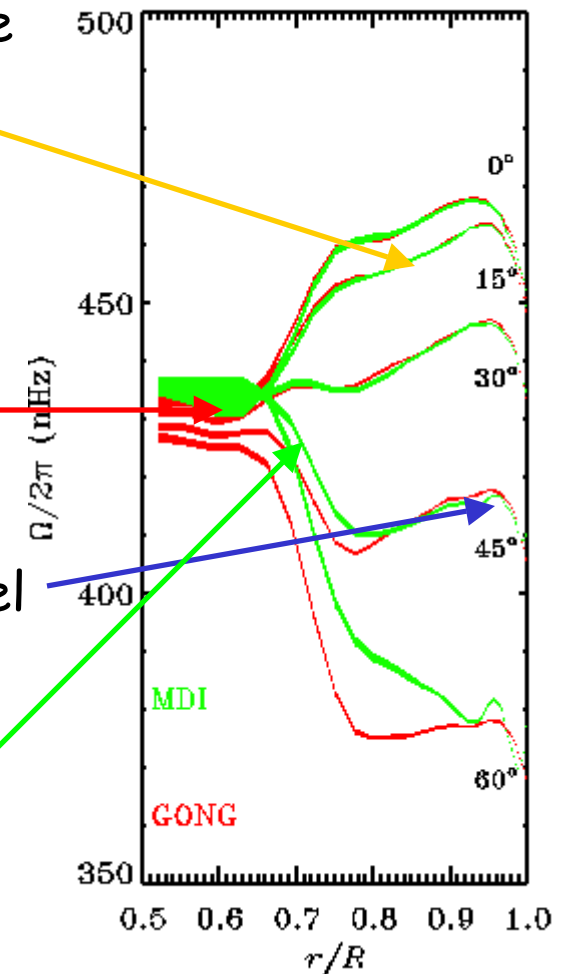


• Rotation différentielle à la surface maintenue à travers la zone convective

• Rotation rigide dans l'intérieur radiatif

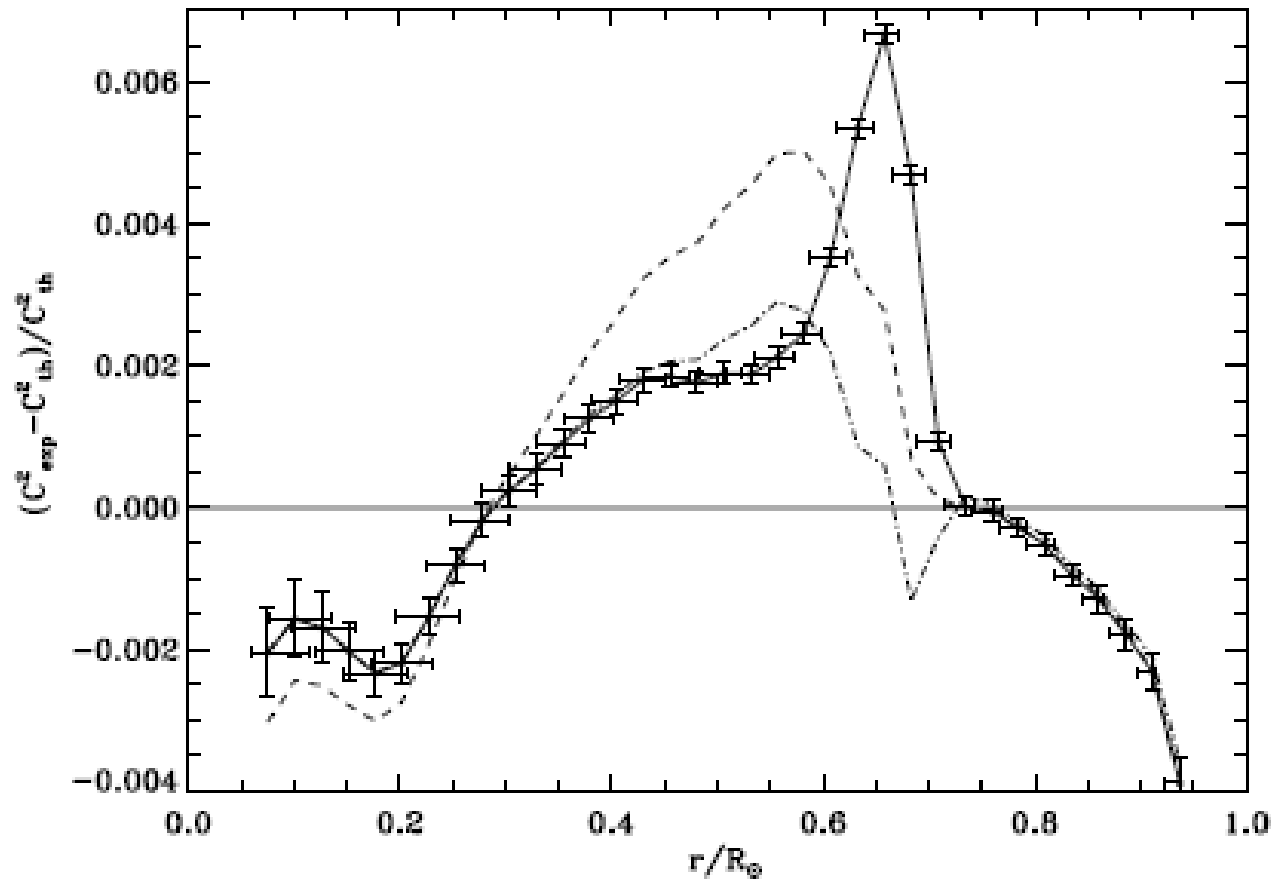
• Cisaillement superficiel

• Cisaillement immédiatement à l'intérieur de la zone radiative (« tachocline »)



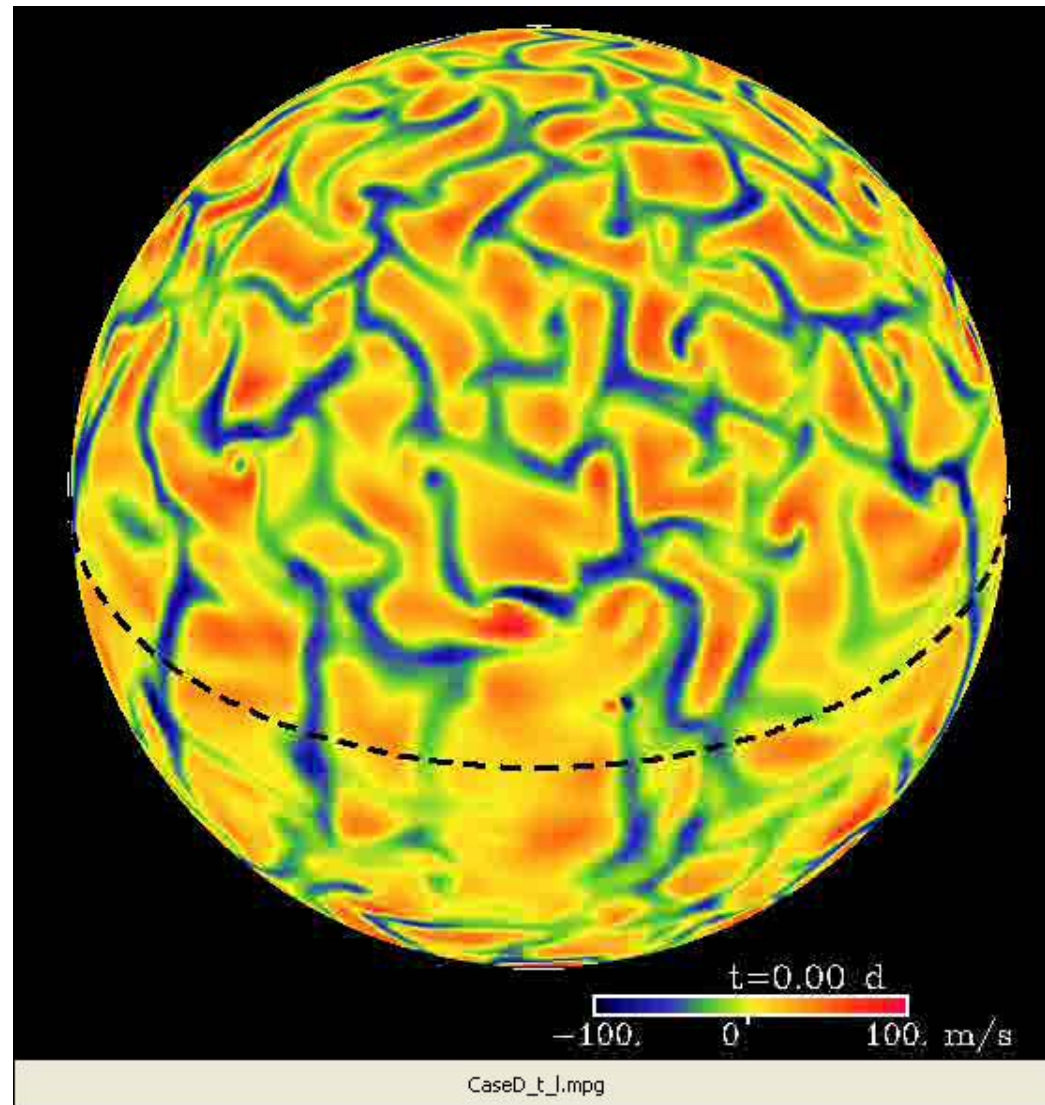


# Effet du tachocline



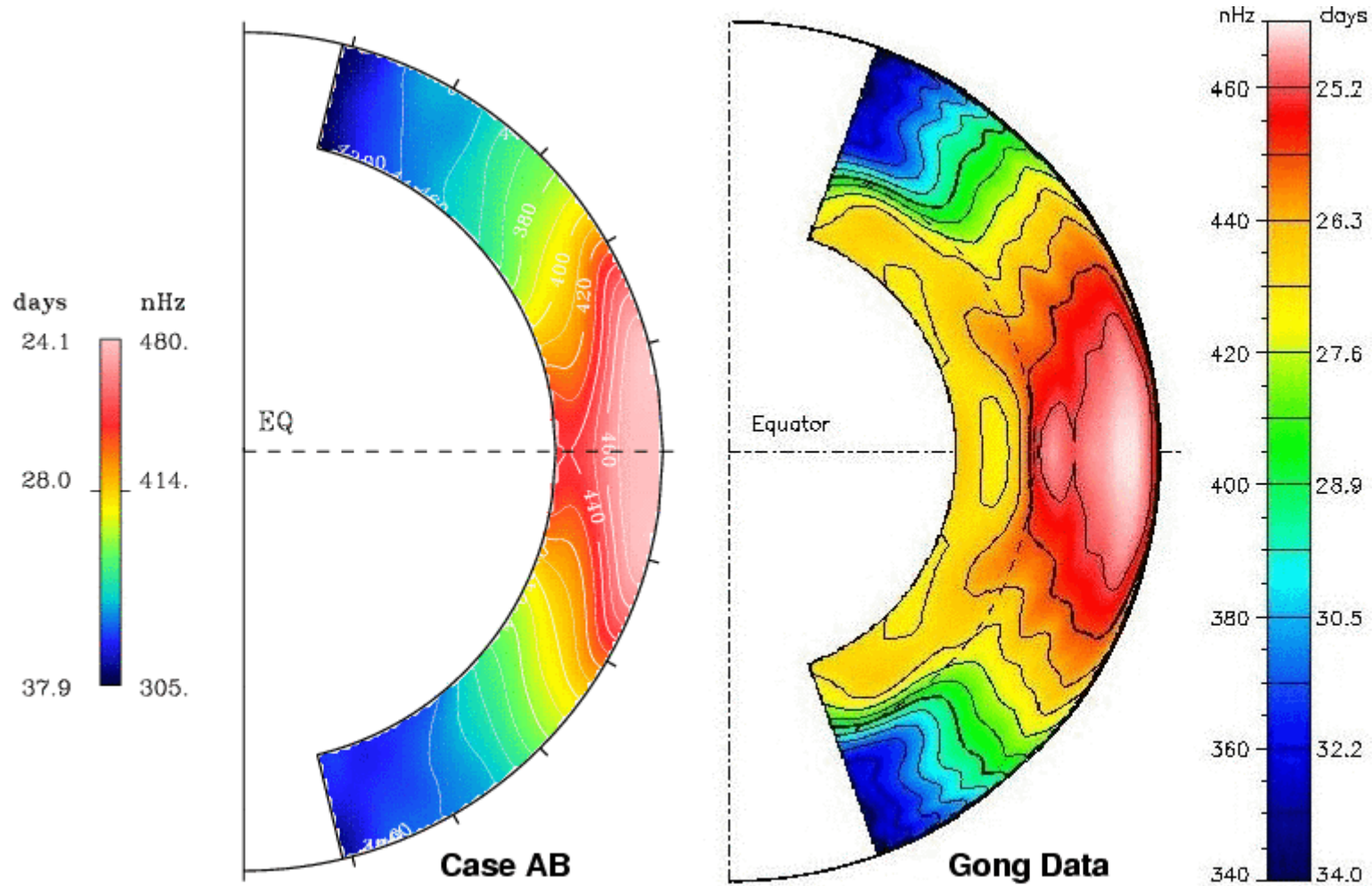
*Avec mes remerciements à Brun, Turck-Chièze, et Zahn 999*

# Accélération équatoriale



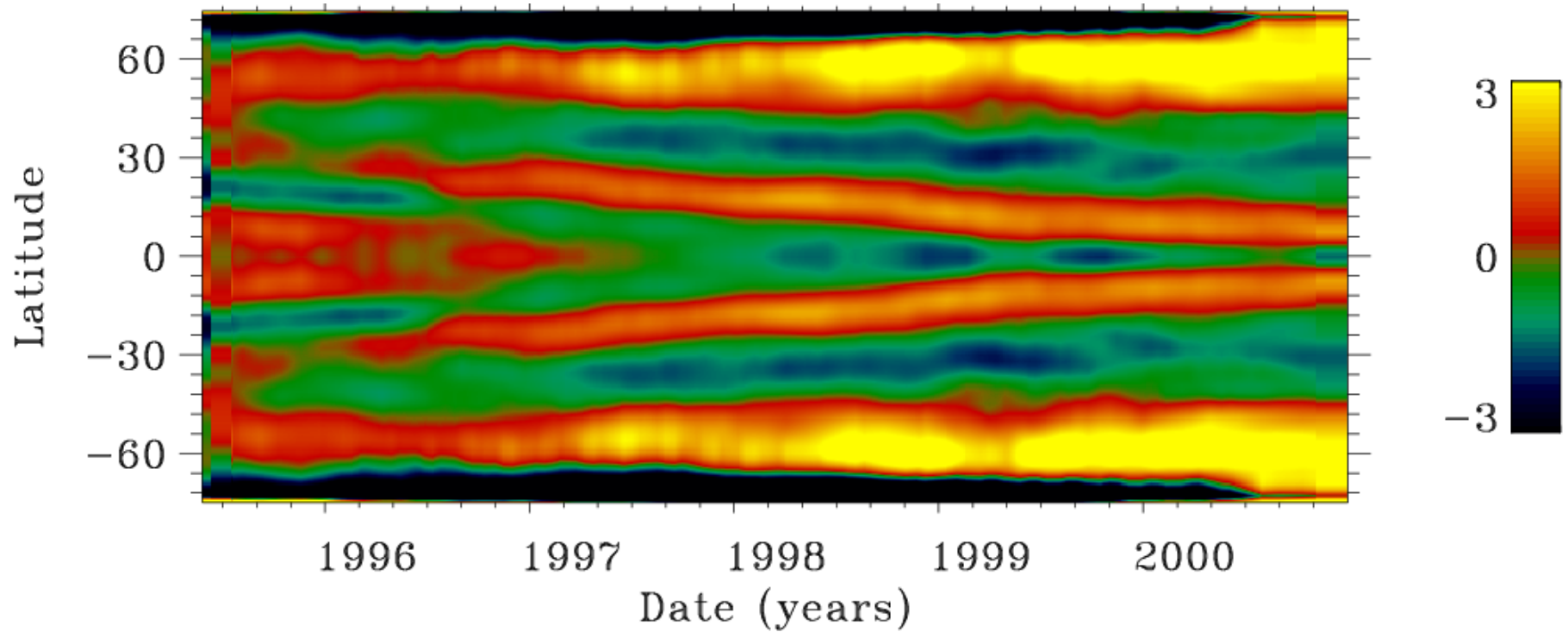
*Mes remerciements à Sacha Brun, Juri Toomre, et al.*

# Accélération équatoriale



Mes remerciements à Sacha Brun

# Variation de la rotation interne



# Héliosismologie globale et locale

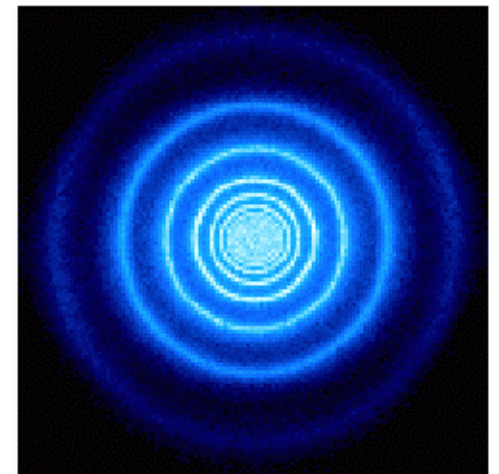
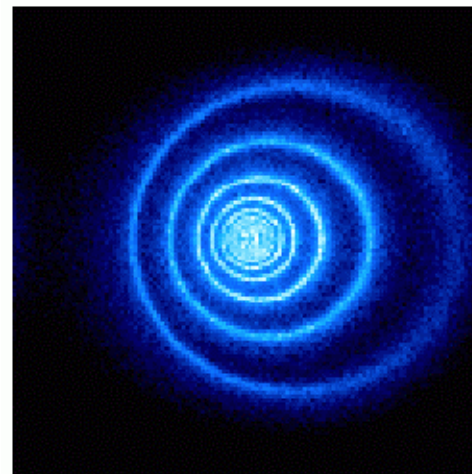
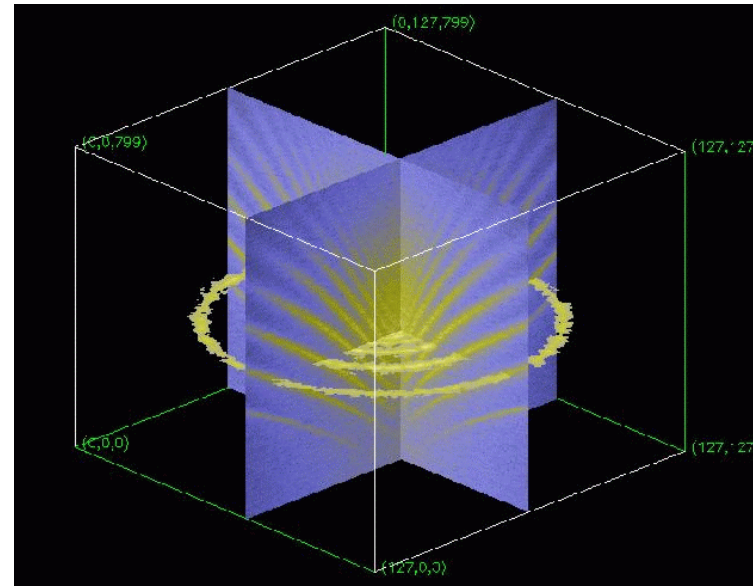
- Globale

  - Temps de vie des modes résonants horizontalement >> Temps de propagation autour du soleil (semaines++)
  - Ces modes « moyennent » en longitude
  - Ces modes sont symétriques nord-sud
- Locale

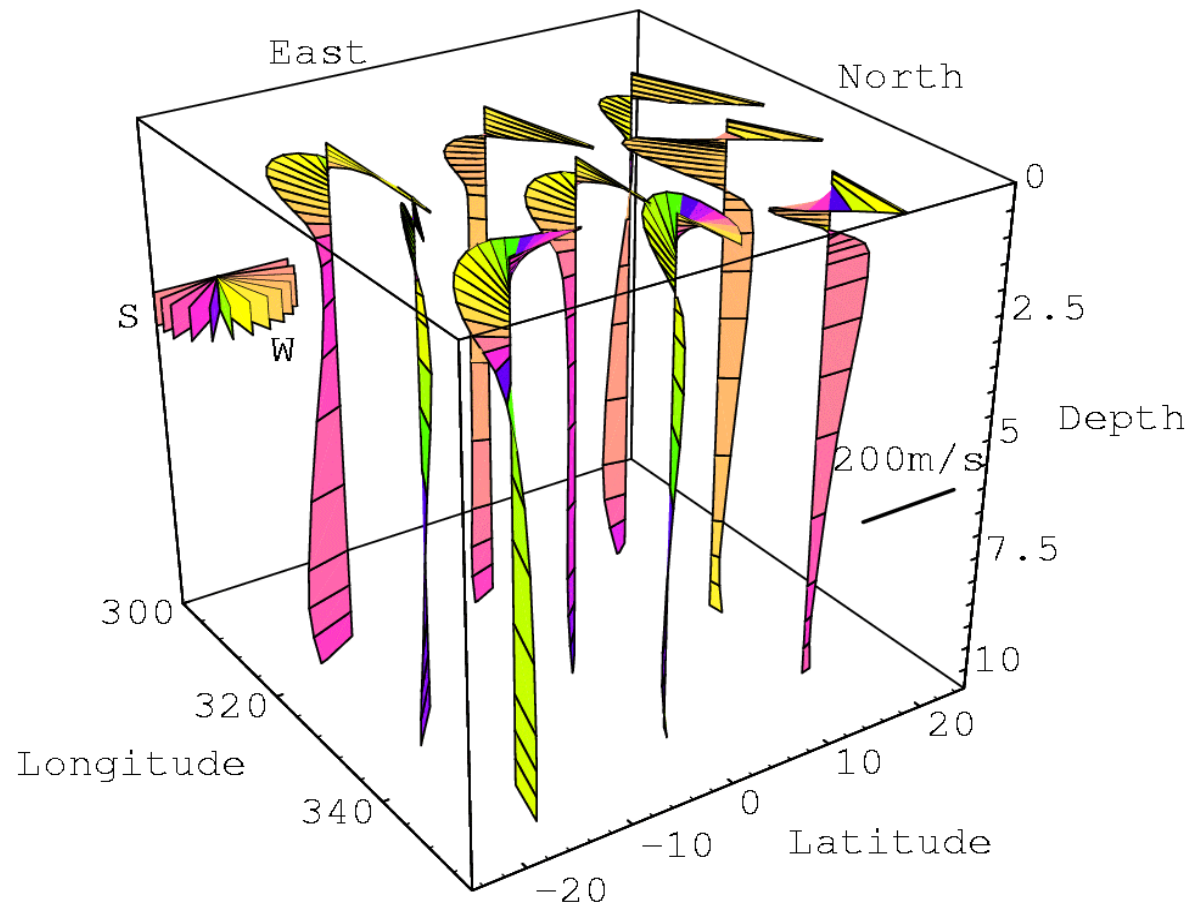
  - Les modes de temps de vie courts n'ont pas ces limitations
  - Les ondes qui se propagent ne forment pas de résonances (comme en géosismologie)

# « Anneaux »

- Analyse des ondes résonantes (carrés de  $15^\circ$ )
- Anisotropie qui donne le mouvement moyen sur le carré

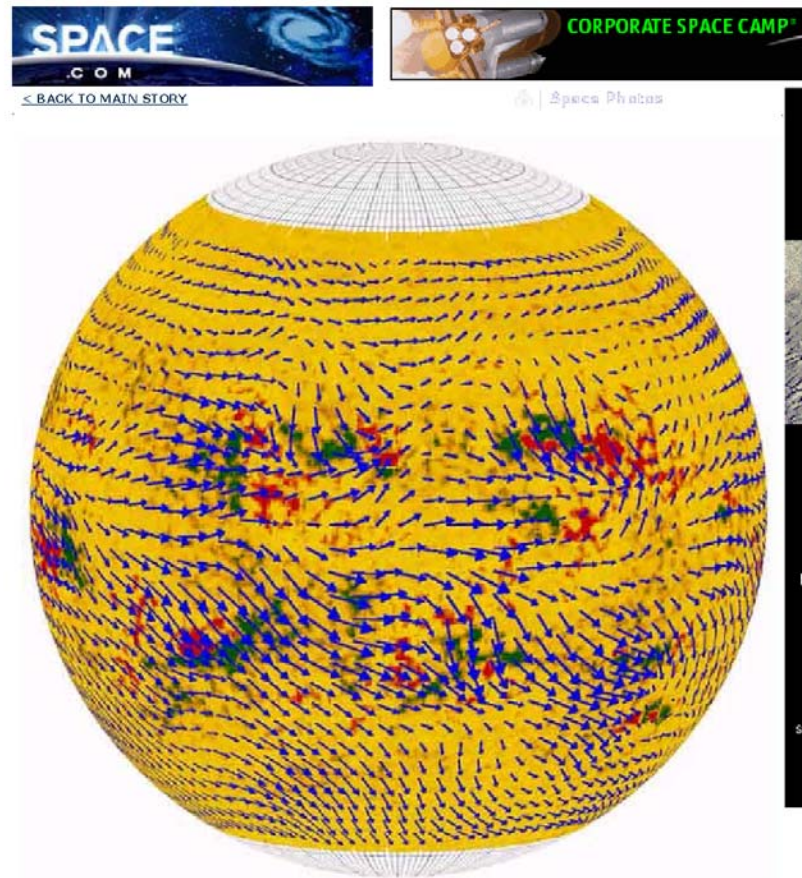


# Écoulements sous la surface



*Mes remerciements à Jesus Patròn et al.*

# « Météo solaire sous la surface »



Global weather map showing magnetic patterns and wind flow on the Sun. This reconstructed global image of the Sun shows average wind flow just underneath the visible half of the solar surface. It was assembled by analysing average wind flow as the Sun rotated around over the course of 14 days, in April 2002. Large transient wind streams and hurricane-like winds are visible. The normal southern poleward flow is apparent in the lower part of the image.

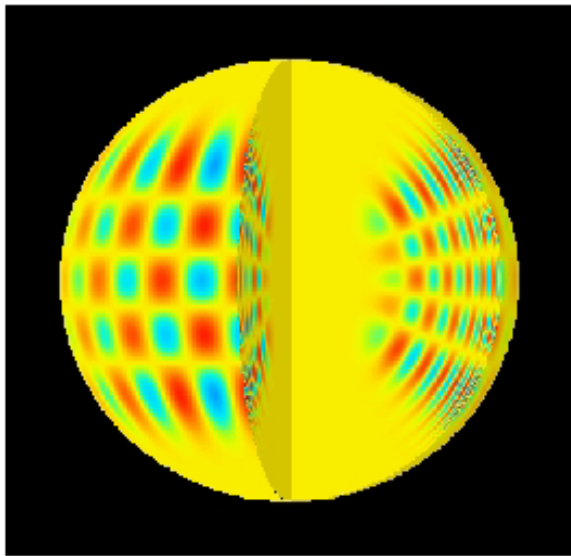
[< BACK TO MAIN STORY](#)

*Mes remerciements à Deborah Haber, Brad Hindman, Rick Bogart*



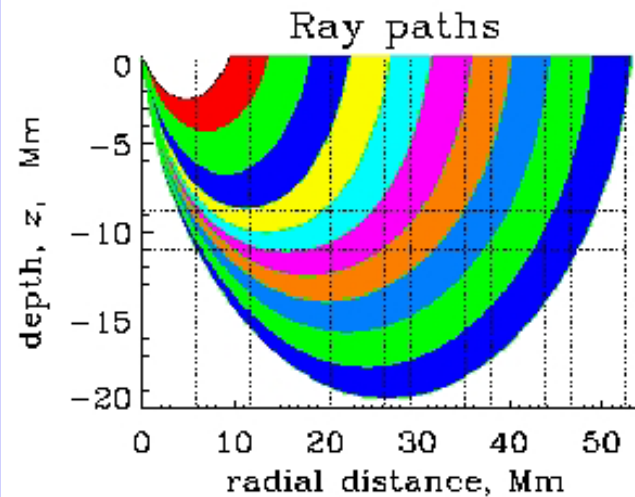
# Méthodes Héliosismiques

Frequencies and frequency splitting of normal modes



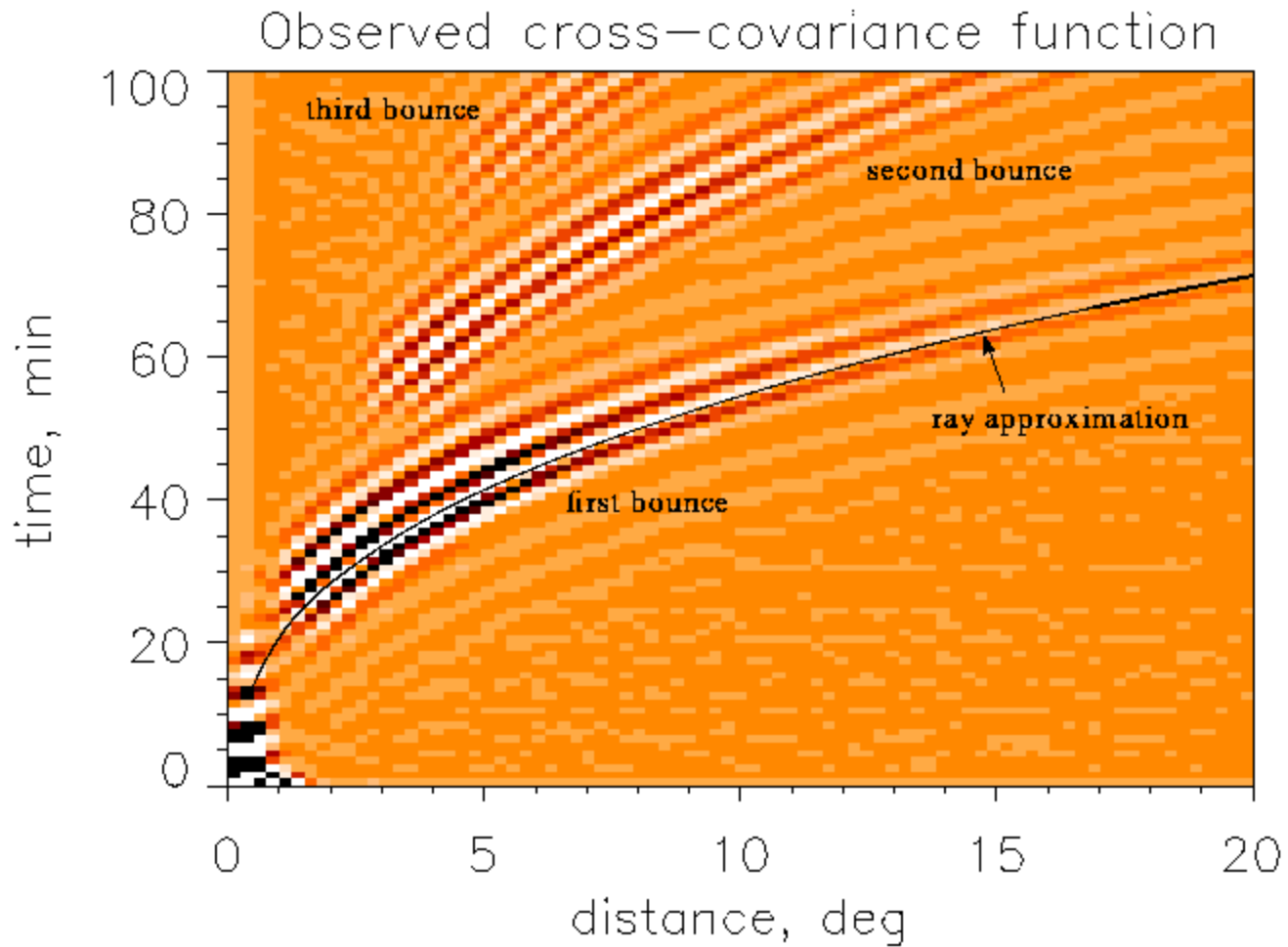
↓  
1D and 2D sound speed and rotation inversions

Travel times



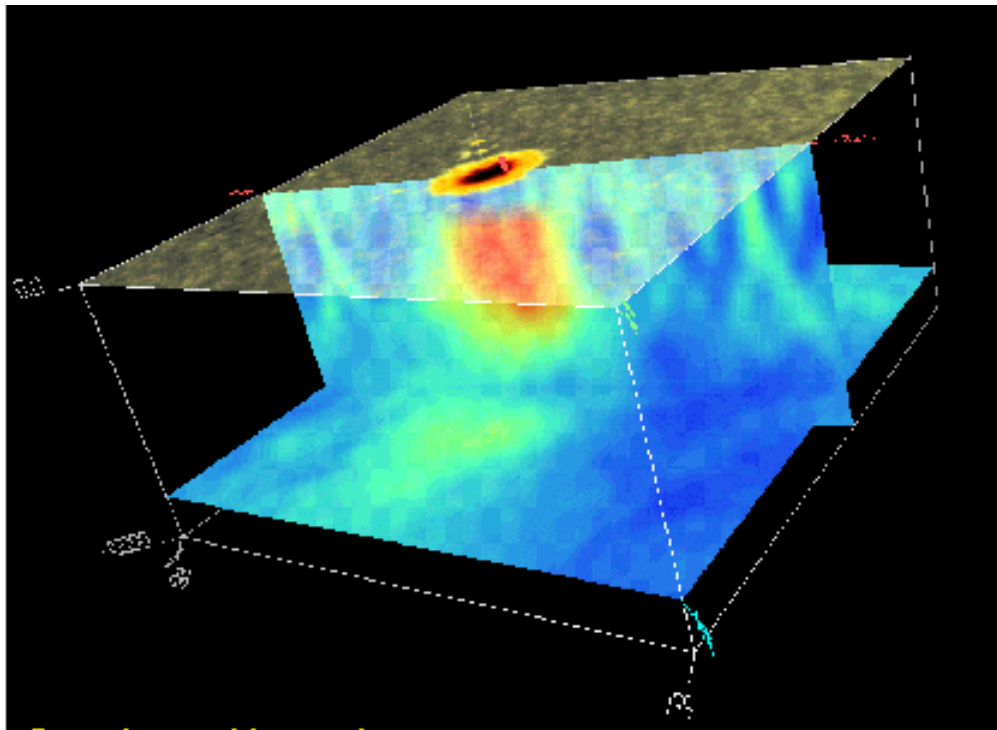
↓  
3D sound speed and flow velocity maps

# « Temps-distance »



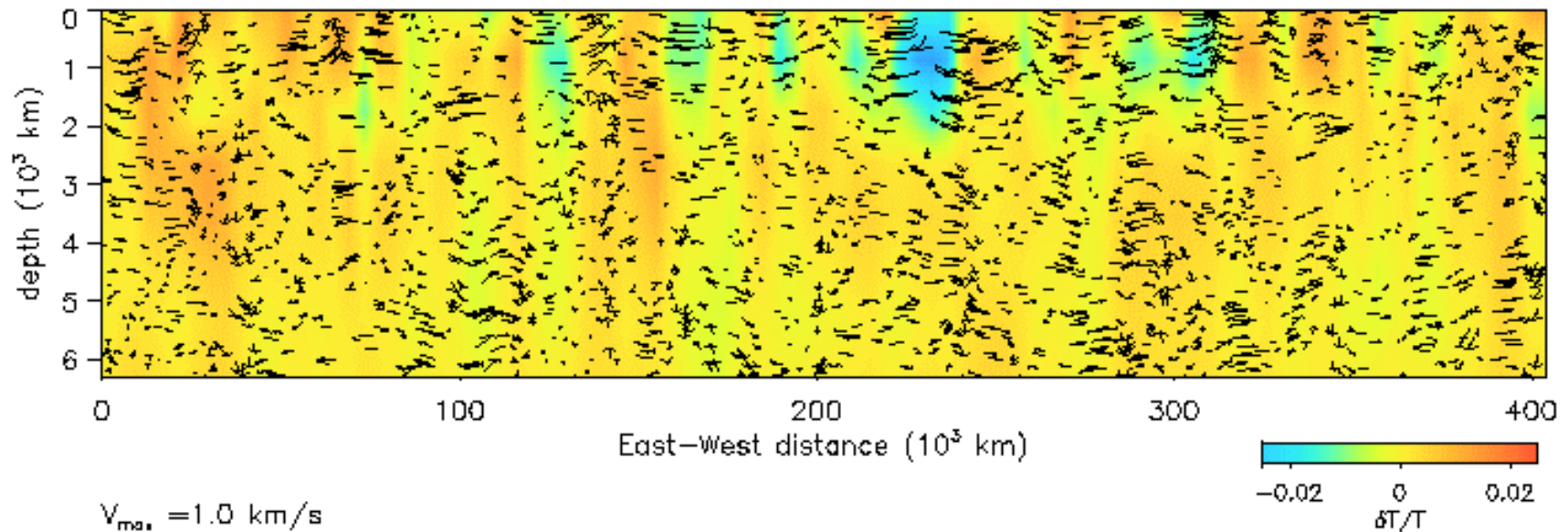
*Mes remerciements à Tom Duvall*

# Température en-dessous une tache

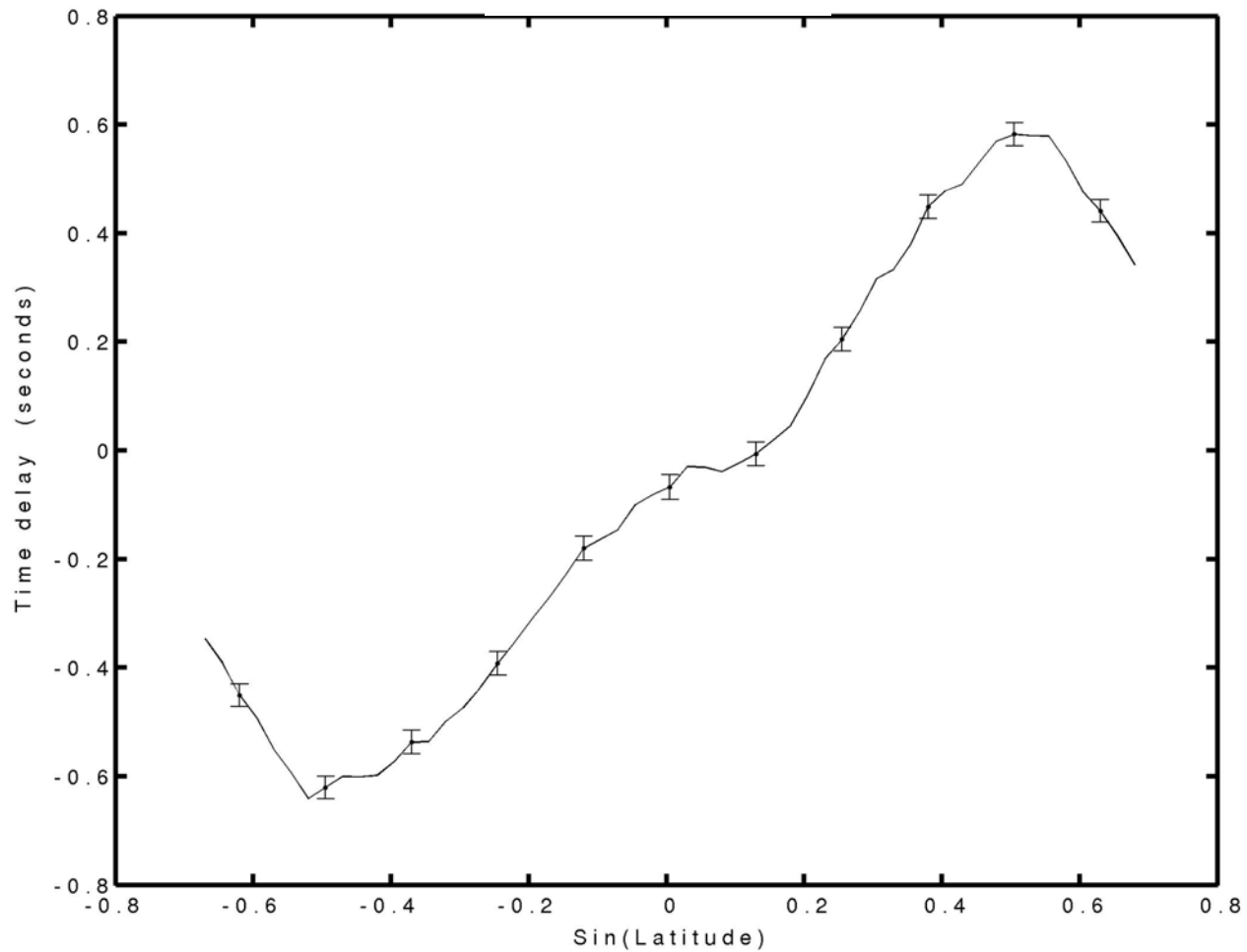


*Merci a Tom Duvall*

# Ecoulements convectifs

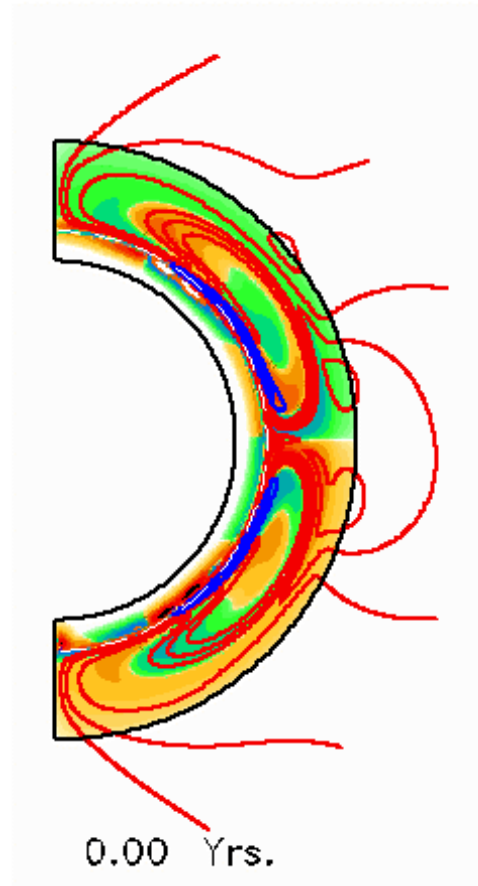


# Circulation méridionale

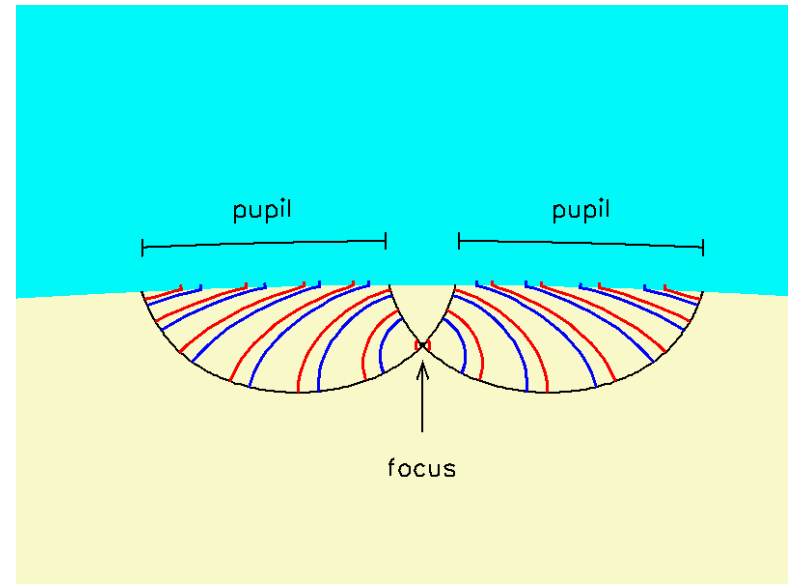
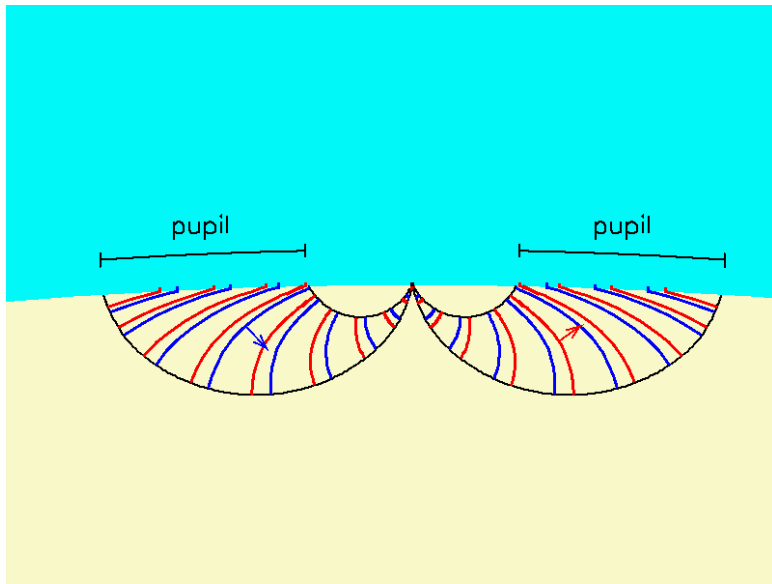


# Modèles de transport du flux

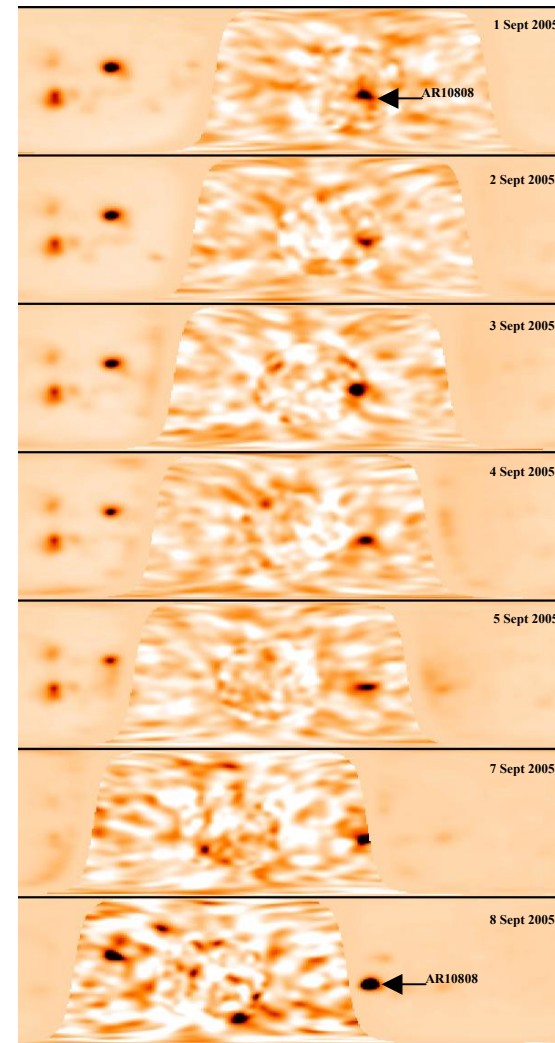
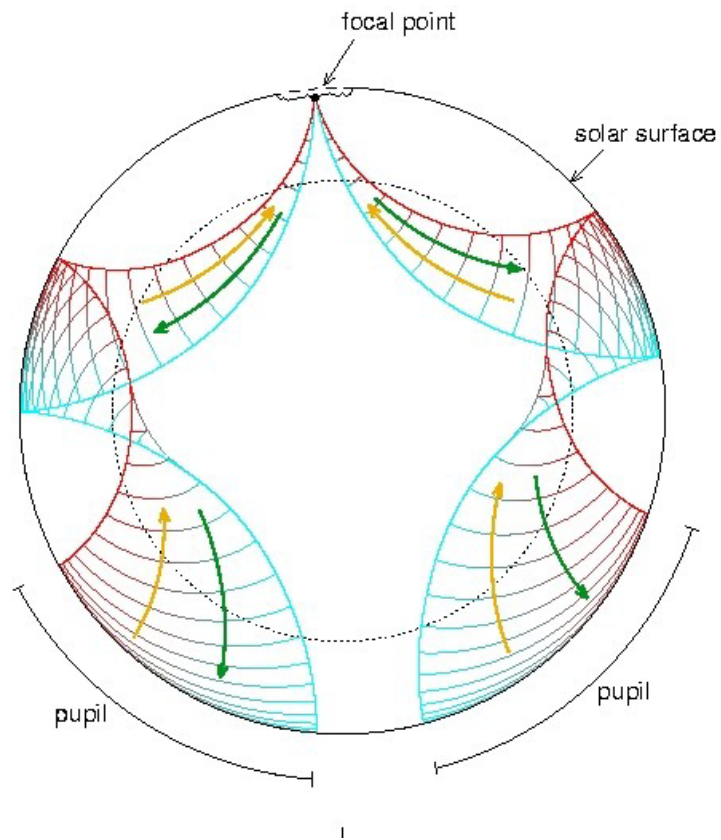
« Cycle de Hale » (22 ans)



# Front d'ondes holographiques



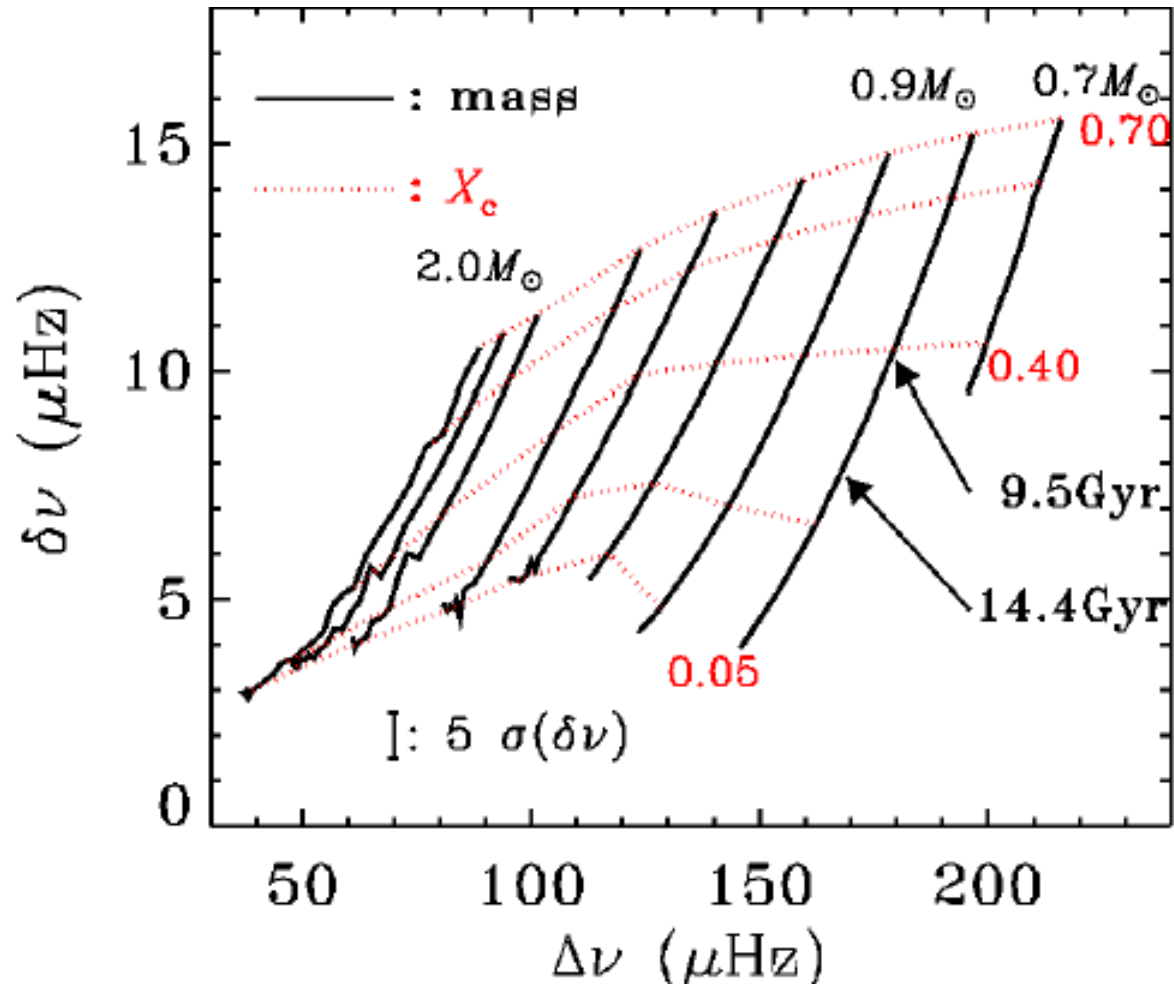
# La face cachée du soleil



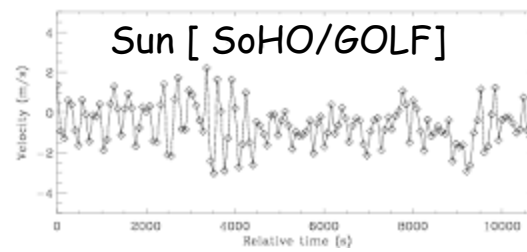
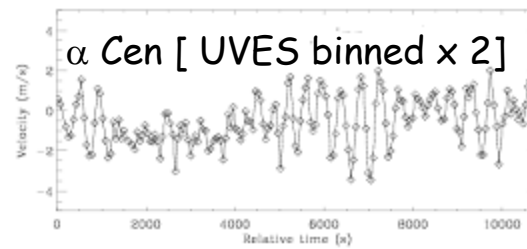
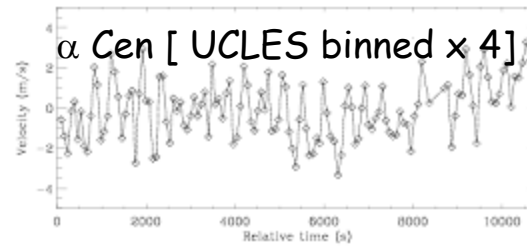
*Mes remerciements à Irene Gonzalez Hernandez, Charlie Lindsey, et Doug Braun,*



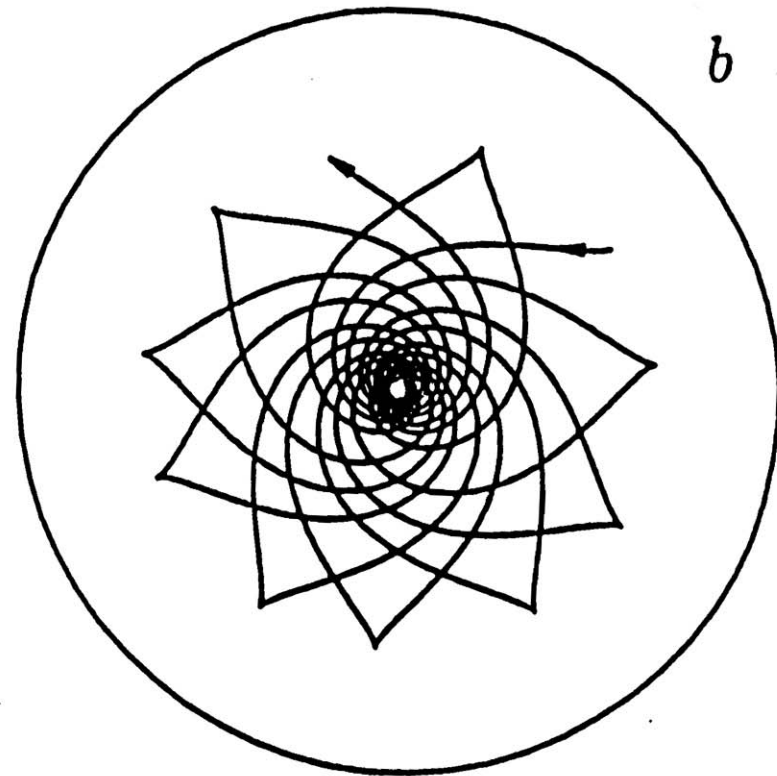
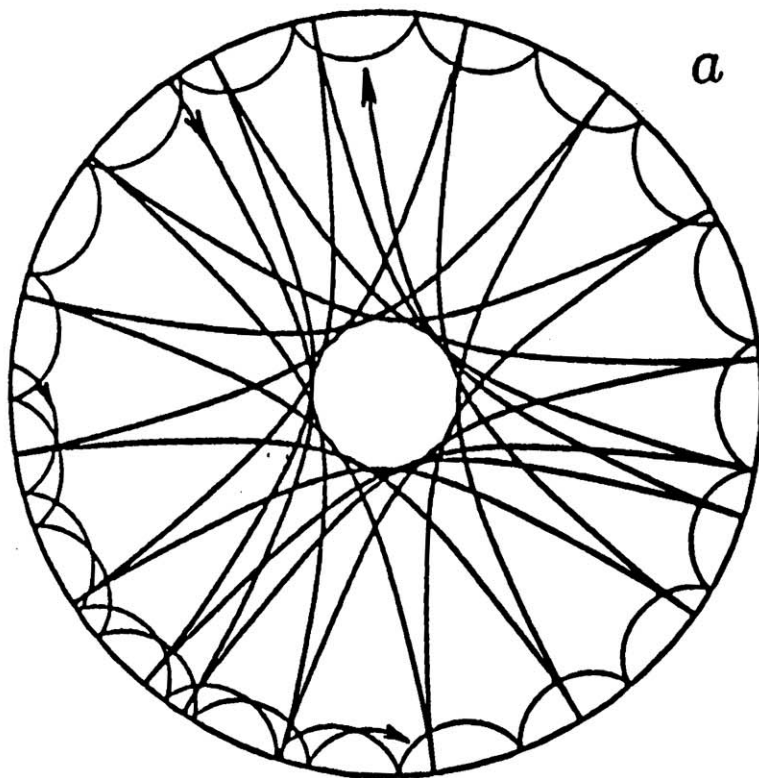
# « Diagramme H-R » Astérosismique



# $\alpha$ Cen A

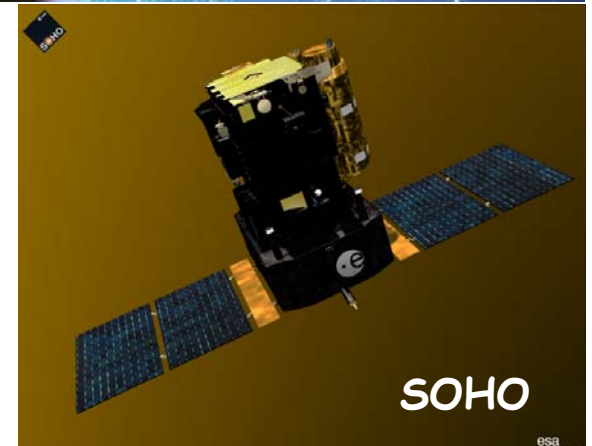
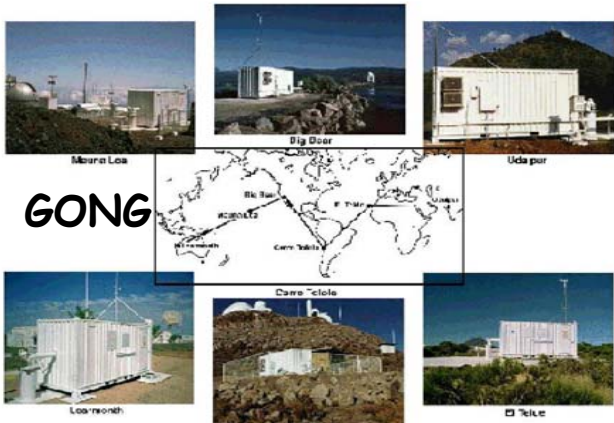
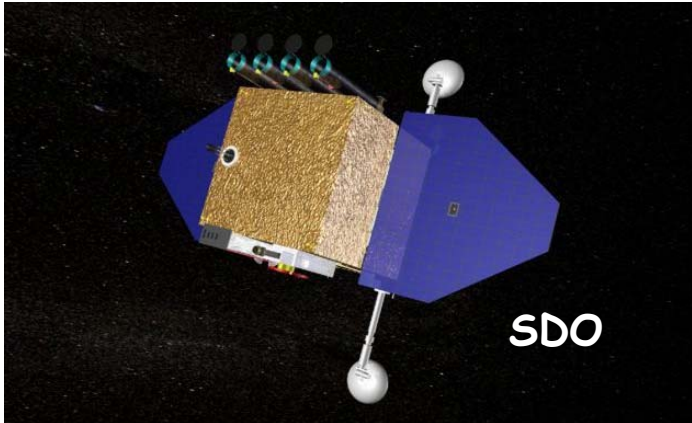


# Rayons de pression et gravité



*Mes remerciements à Juri Toomre and Douglas Gough*

# D'importants moyens



# Rappel

- **Phénomène**
  - Oscillations de « 5 minutes » de la surface
  - Ondes de pression, réfractées par la remontée de la vitesse sonore vers l'intérieur, et réfléchies par la chute de densité à la surface; excitées par la convection à la surface
- **« Outils »**
  - Fréquences de modes de résonance radiale
  - Temps de propagation des ondes horizontales
  - Amplitudes, largeurs, asymétries des modes
- **Méthodes**
  - Directes (modèle/mesure) et Inverses (équation intégrale)
  - Globales et Locales
- **Résultats**
  - $J_2$ ,  $\nu$ , WIMP, opacités, diffusion, éq. d'état, abondances
  - Rotation, cisaillements, écoulements, structures
- **Frontières**
  - Astérosismologie ( $g$ ,  $T_{\text{eff}}$ ) et modes de gravité (cœur)

© UFS, Inc.

