



Processus dynamiques au niveau de la sous-surface solaire

Sandrine Lefebvre
SAP - CEA Saclay

& P. Nghiem, S. Turck-Chièze (SAP),

Introduction et plan

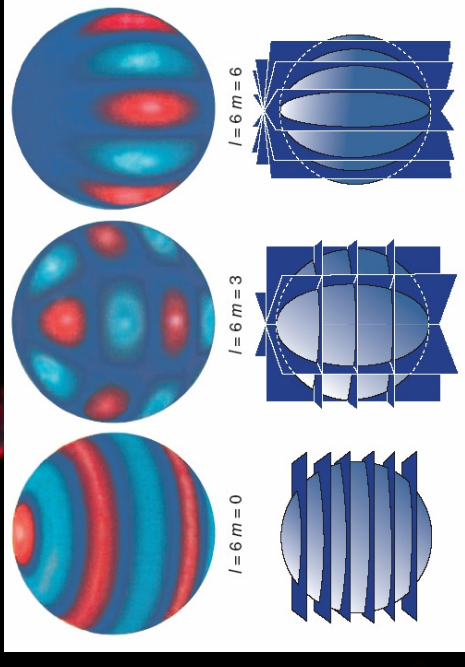
- 📍 **Leptocline**
 - Zone de transition entre la zone convective et la photosphère
 - Zone longtemps négligée du fait de sa faible masse et de sa complexité physique
 - Important pour une meilleure connaissance du fonctionnement de la machine solaire et en particulier du cycle solaire
 - Probable origine des variations du rayon solaire observé en surface
 - Emergence de phénomènes énergétiques à la surface du Soleil => forçage solaire et météorologie de l'espace
- 📍 **Plan**
 - Inversion de données héliosismiques : modes f
 - 📍 **Variation de la stratification des couches sous-surfaciques**
 - **Lefebvre & Kosovichev, 2005, ApJL, 633, L149**
 - **Lefebvre, Kosovichev & Rozelot, 2007, ApJL, 658, L135**
 - Utilisation de modèles solaires
 - 📍 **Influence d'une variation de rayon sur la physique de ces couches**
 - **Lefebvre, Nghiem & Turck-Chièze, ApJ, en préparation**

Inversion des modes f



Principe

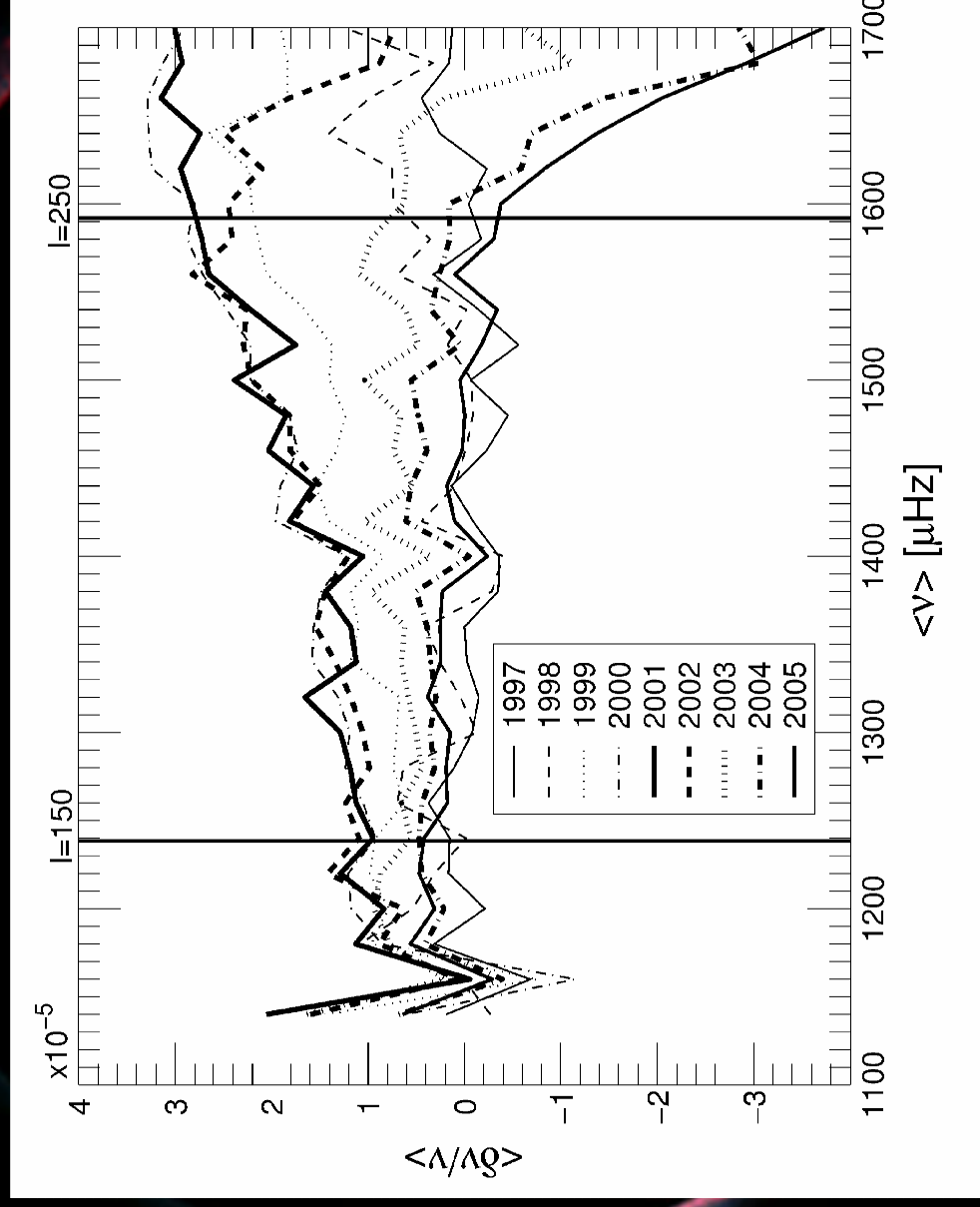
- ☛ Modes d'oscillation → 3 nombres l , n , m
→ f -modes : $n = 0 \Rightarrow$ onde de surface



- ☛ Idée : calculer la position des couches de sous-surface en utilisant les modes f sensibles à la sous-surface
→ Evolution de la stratification avec la profondeur?
- ☛ Nouveau point : calcul avec *la profondeur*
- ☛ Ref :

- ☛ Lefebvre & Kosovichev, 2005, *ApJ*, 633, L149
- ☛ Lefebvre et al., 2007, *ApJ*, 658, L135

Variation des fréquences des modes f avec le cycle solaire



Données compilées par J. Schou et disponibles sur <http://quake.stanford.edu/~schou/anaww72z/>

Formalisme mathématique (1)

■ Dziembowski & Goode (2004)

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_{r,0} = -\frac{3l}{2\omega_l^2 I} \int dI \frac{g}{r} \frac{\delta r}{r}$$

- ☉ ν frequency of f-mode
- ☉ r radius of the considered layer
- ☉ l degree of f-mode
- ☉ I moment of Inertia
- ☉ ω eigenfrequency
- ☉ g acceleration due to gravity
- ☉ Kl kernel associated to degree l
- ☉ ξ/l mode eigenfunction
- ☉ ρ density

$$\left(\frac{\delta\nu}{\nu}\right)_l = \int_0^{R_{\odot}} K_l \frac{\delta r}{r} dr$$

$$K_l = -\frac{3l}{2\omega_l^2 I_l} \rho \left| \xi_l \right|^2 g r$$

$\delta r/r$ constant avec la profondeur



$$\frac{\Delta\nu_l}{\nu_l} = -\frac{3}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

Formalisme mathématique (2)

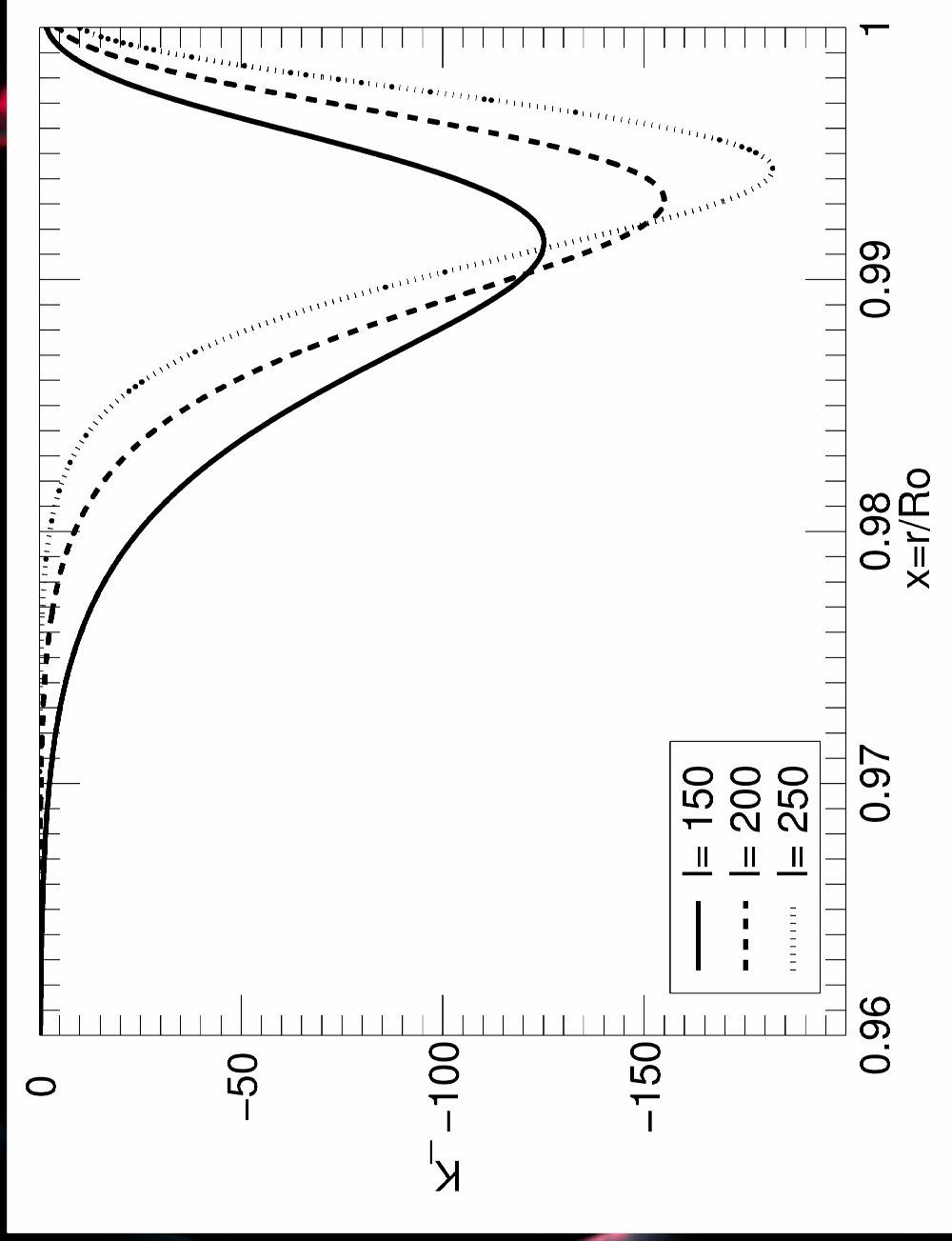
- Problème inverse utilisant la méthode RLS (Regularized Least-Square) et les fréquences des modes f (Schou) avec $150 < l < 250$

$$E = \sum_l \frac{1}{\sigma_l^2} \left(\int_0^{R_\odot} K_{l,r} y \, dr - f_l \right)^2 + \alpha \int_0^{R_\odot} y^2 \, dr + \beta \int_0^{R_\odot} \left(\frac{dy}{dr} \right)^2 \, dr$$

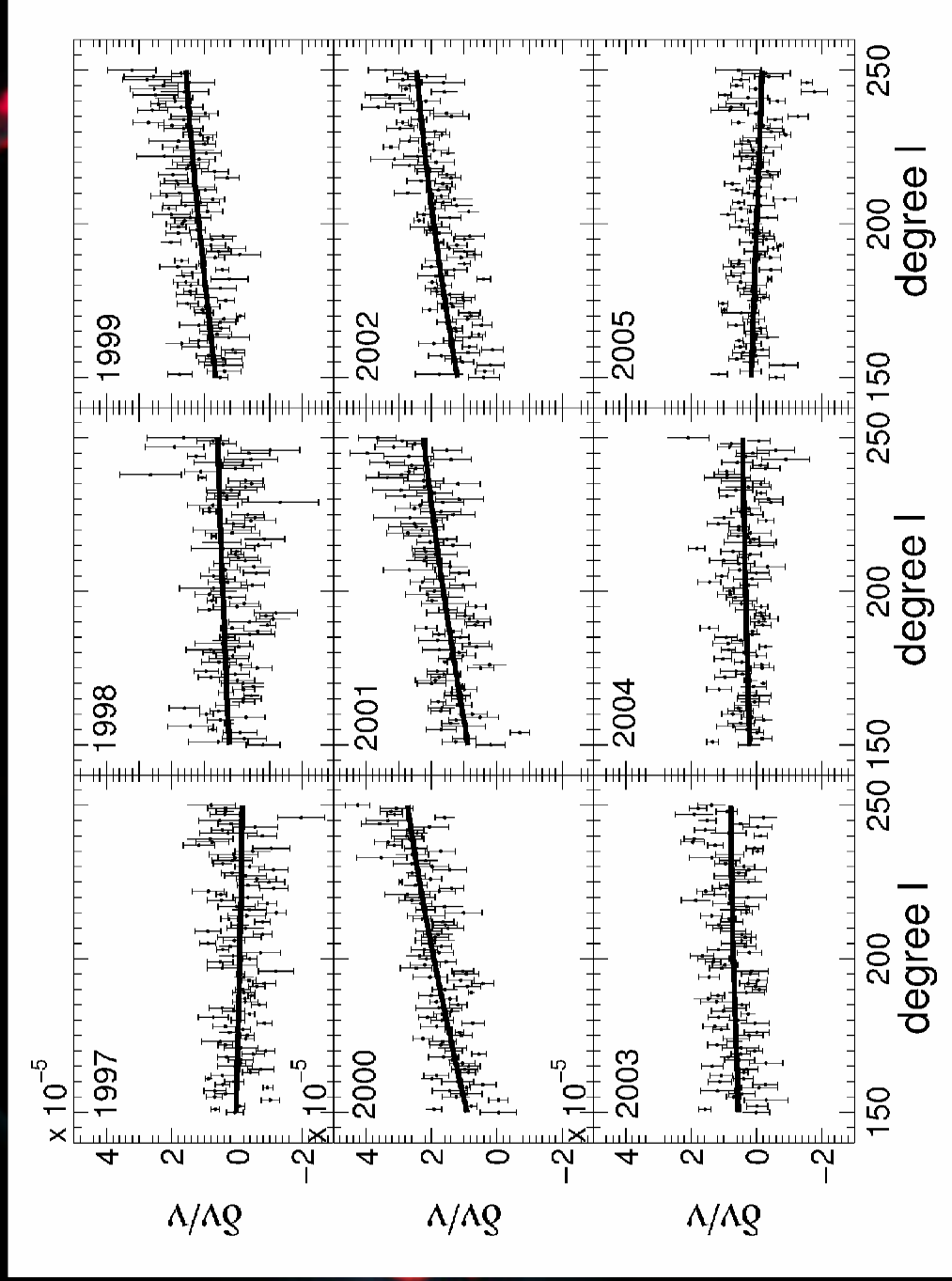
$$y = \frac{\delta r}{r}$$

$$f_l = \frac{\delta \nu}{\nu}$$

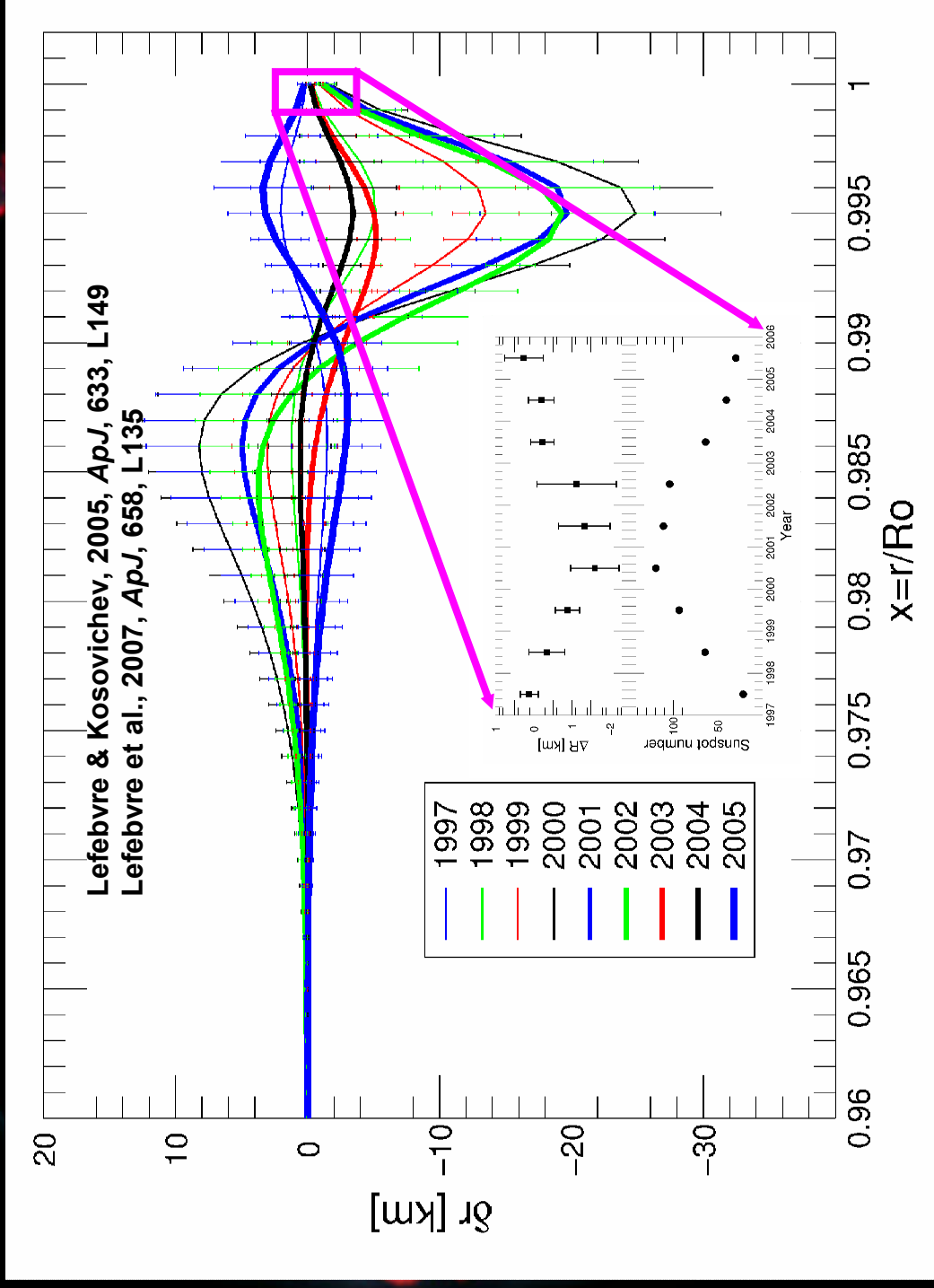
Kernels



Variations des fréquences avec le cycle



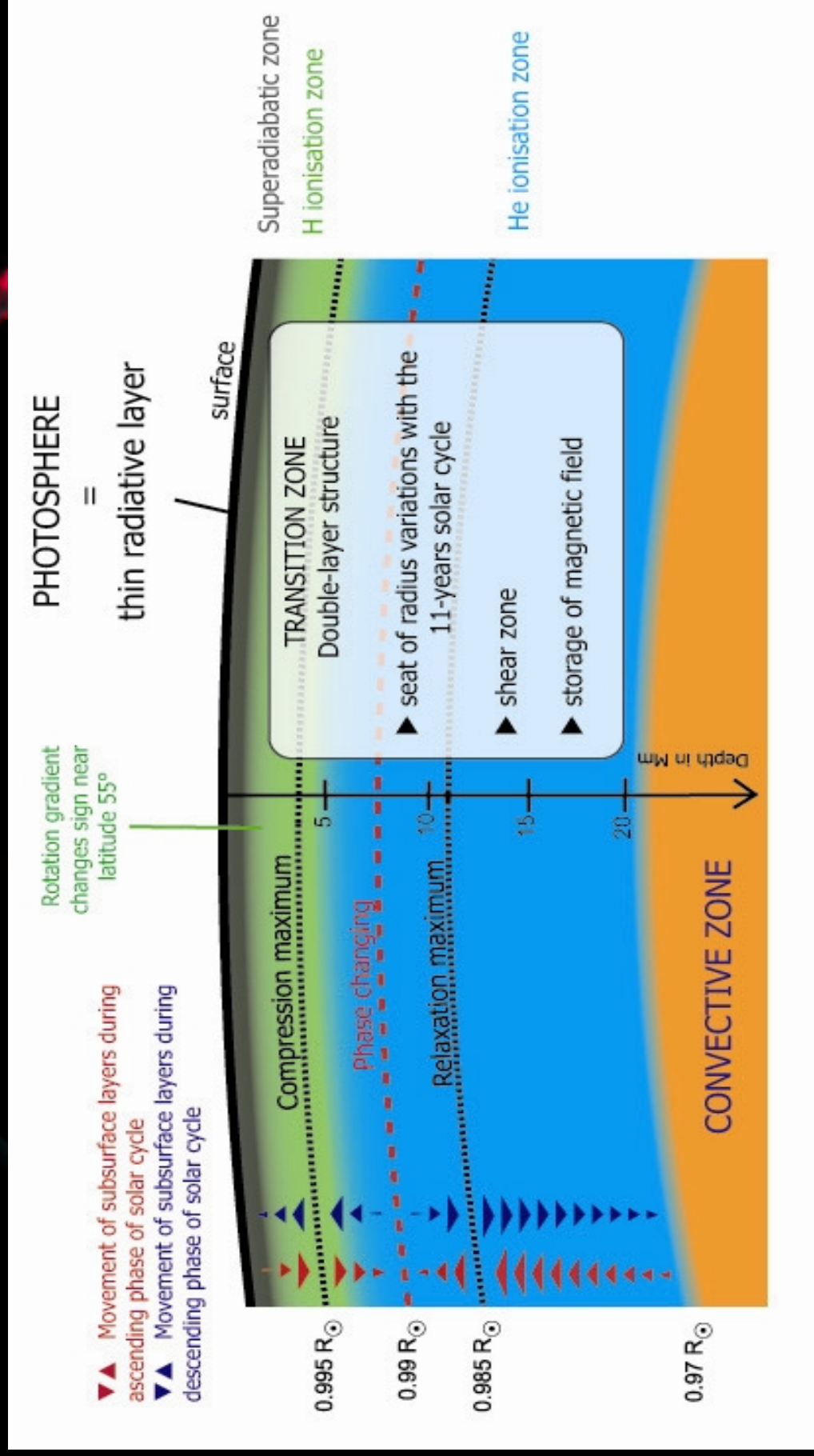
Variation de la position des couches en sous-surface



Analyse de modèles

The image features a central circular graphic. The background is a gradient of dark blue and black. A prominent feature is a glowing ring or arc that transitions from a bright pink at the top to a deep red at the bottom. The ring has a textured, almost crystalline appearance with some irregularities and bright spots. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

Vue schématique de la Leptocline

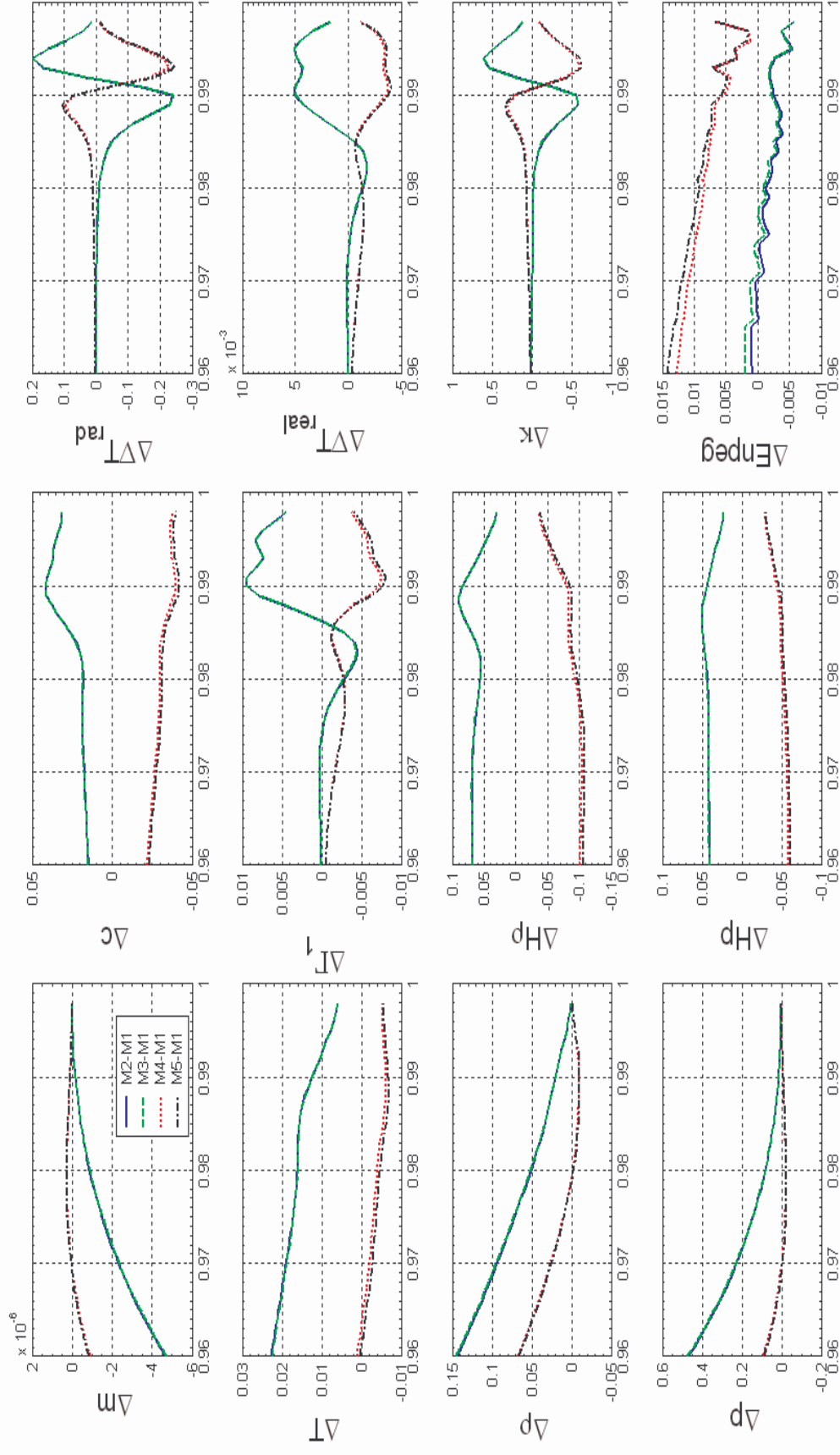


Principe

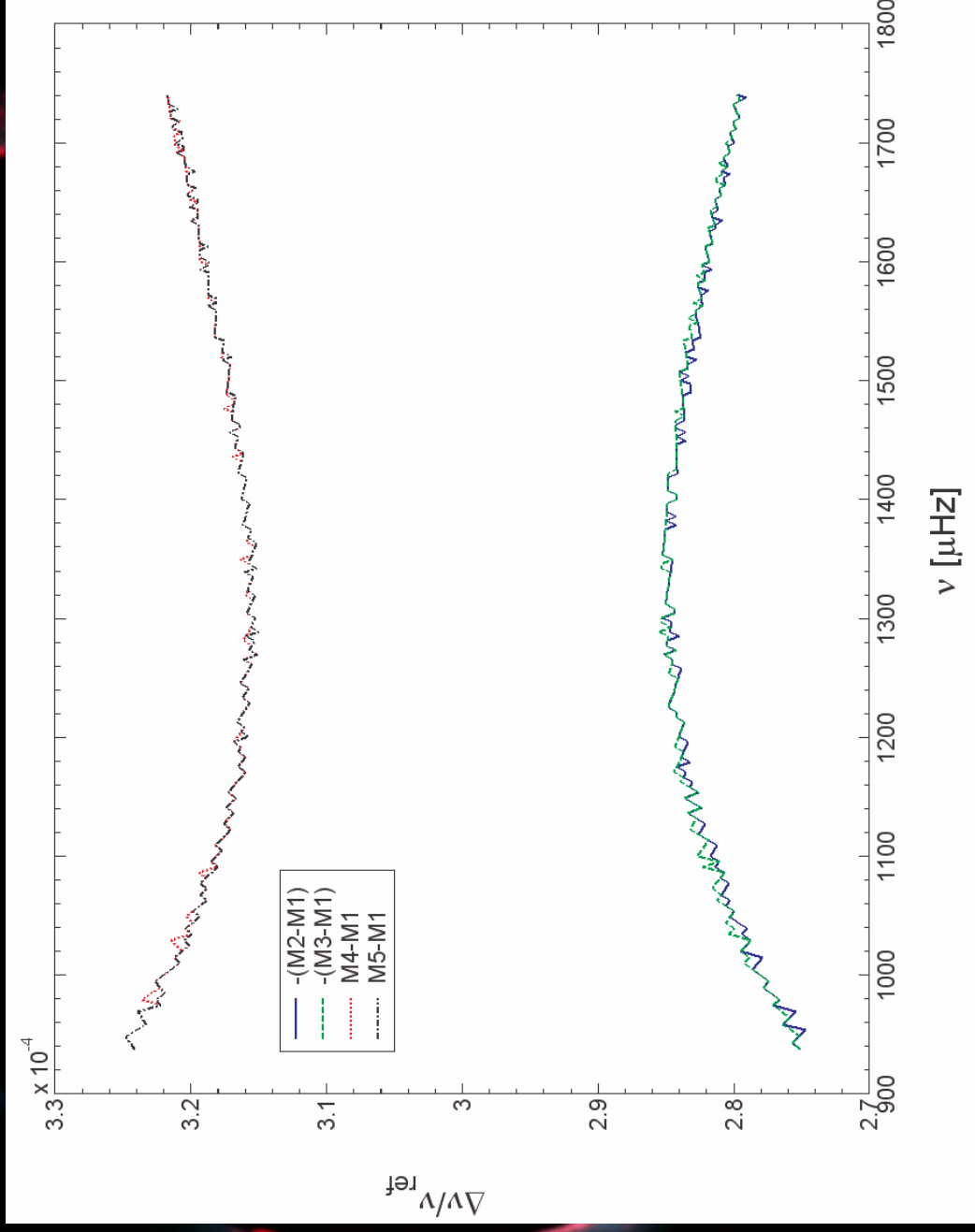
- But : voir l'influence d'une variation de rayon et de luminosité sur la physique de sous-surface
- Code CESAM
 - 1^{ère} étape : Modèles sismiques sans rotation ni champ B
 - $|\Delta R/R| \cong 2 \times 10^{-4}$ (limite de précision) $\Rightarrow |\Delta R| \cong 135 \text{ km}$
 - $|\Delta L/L| \cong 1 \times 10^{-3}$

| Model | R (x 10 ⁵ km) | R/R _⊙ | L (x 10 ³³ ergs/s) | L/L _⊙ |
|-------|-----------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| 1 = ⊙ | 6.9599 | 1.0000 | 3.8460 | 1.0000 |
| 2 | 6.9613 | 1.0002 | 3.8499 | 1.0010 |
| 3 | 6.9613 | 1.0002 | 3.8422 | 0.9990 |
| 4 | 0.9586 | 0.9998 | 3.8499 | 1.0010 |
| 5 | 6.9585 | 0.9998 | 3.8422 | 0.9990 |

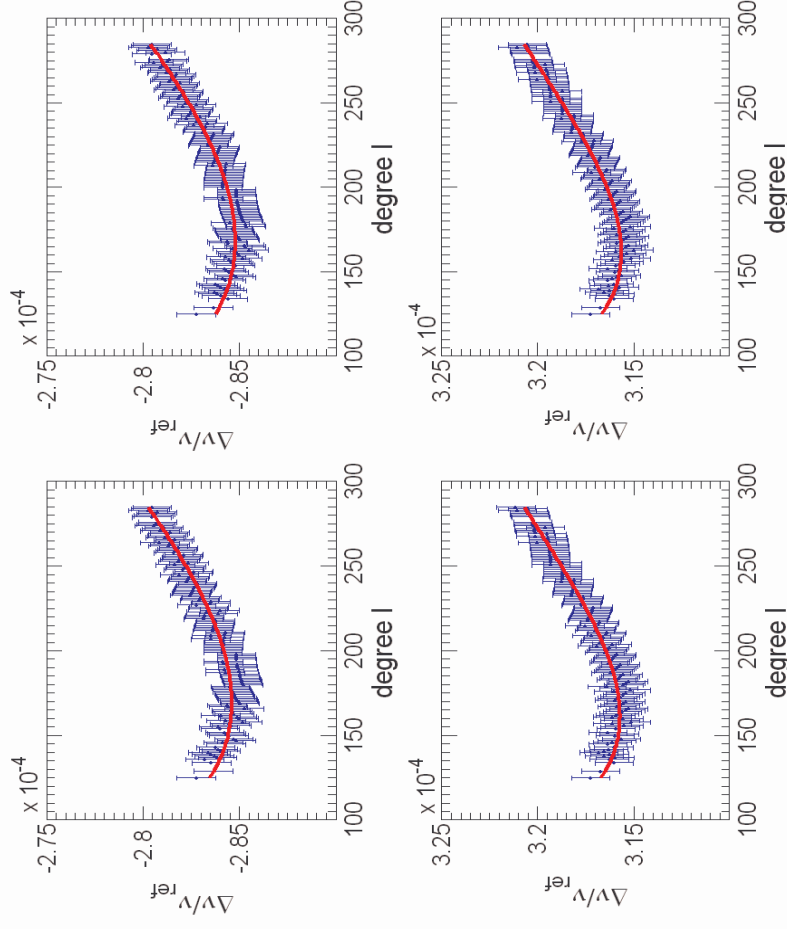
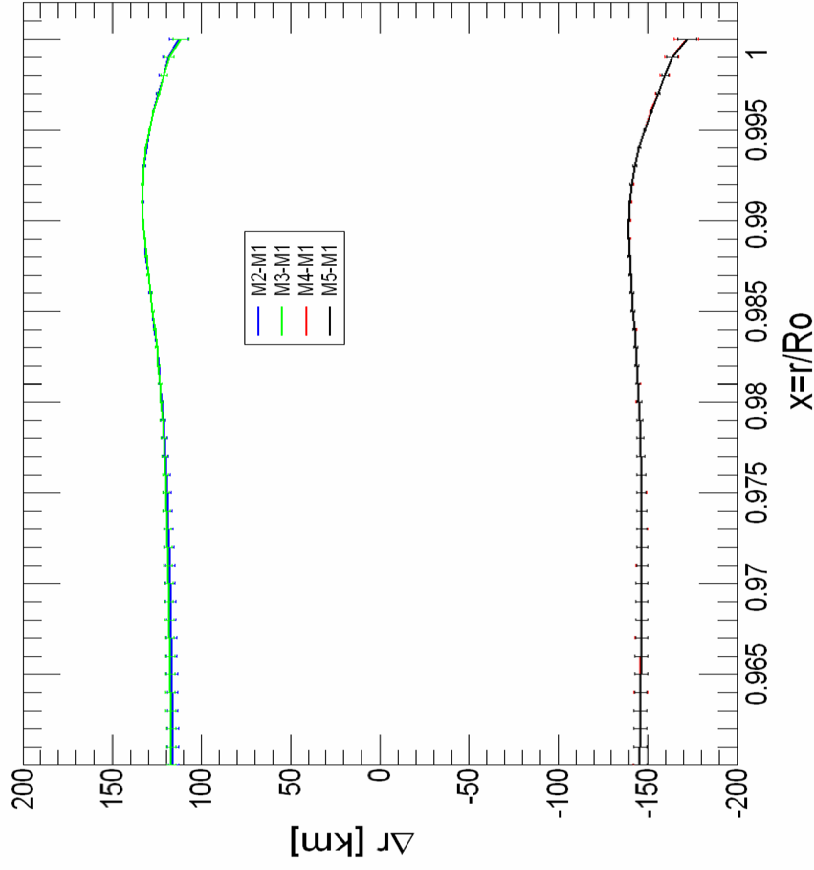
Différence entre les modèles



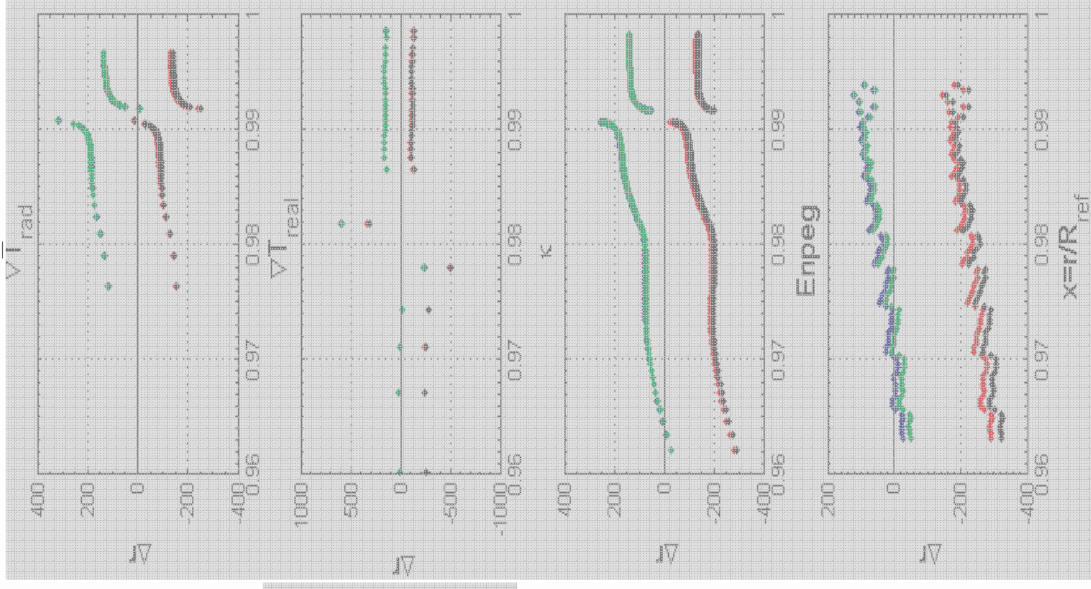
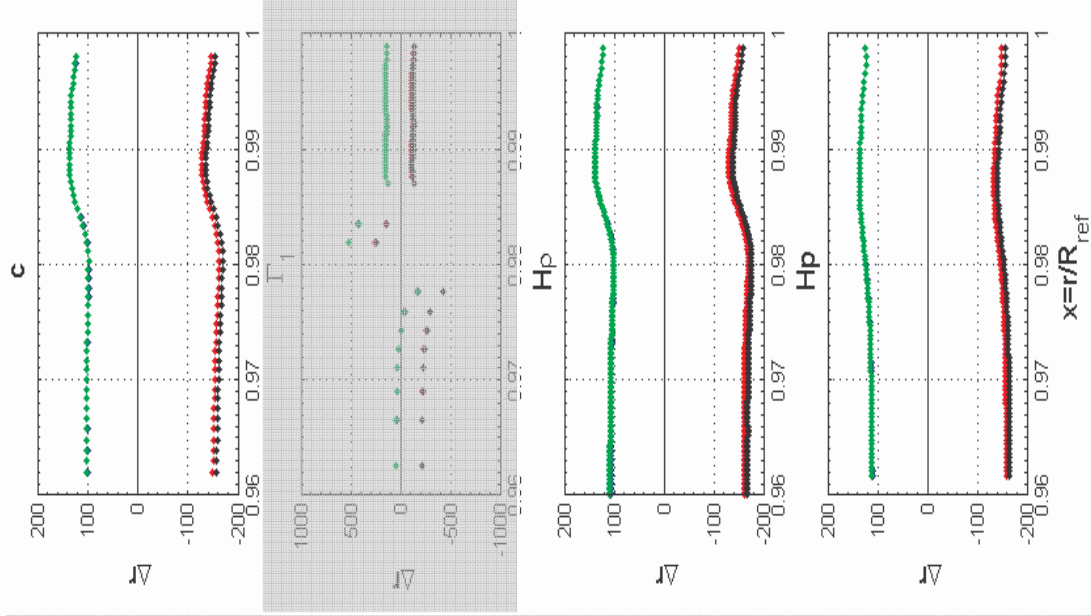
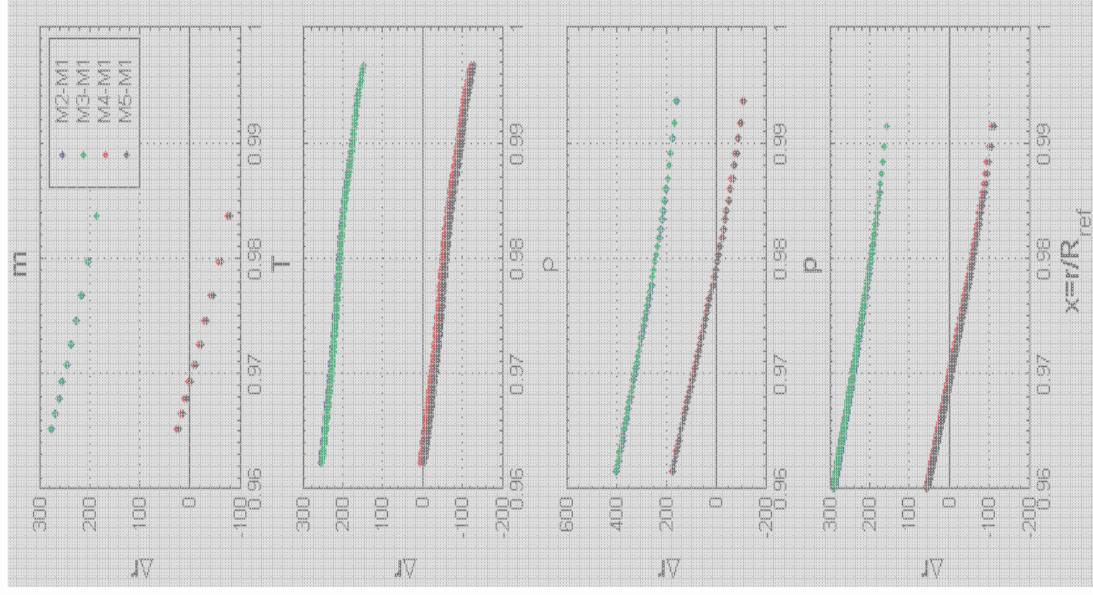
Variation relative des fréquences théoriques



Inversion des fréquences théoriques



Lien avec les paramètres physiques

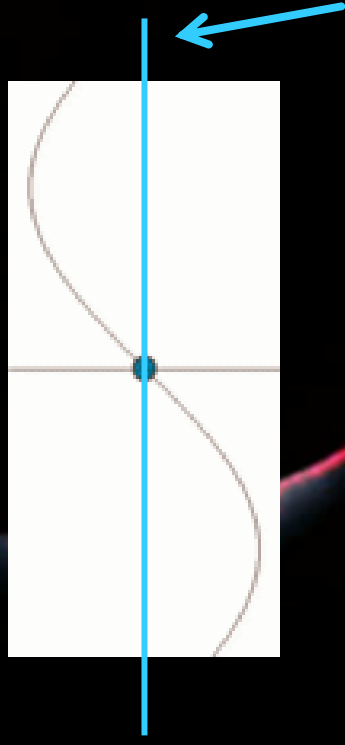


Un début d'explication...

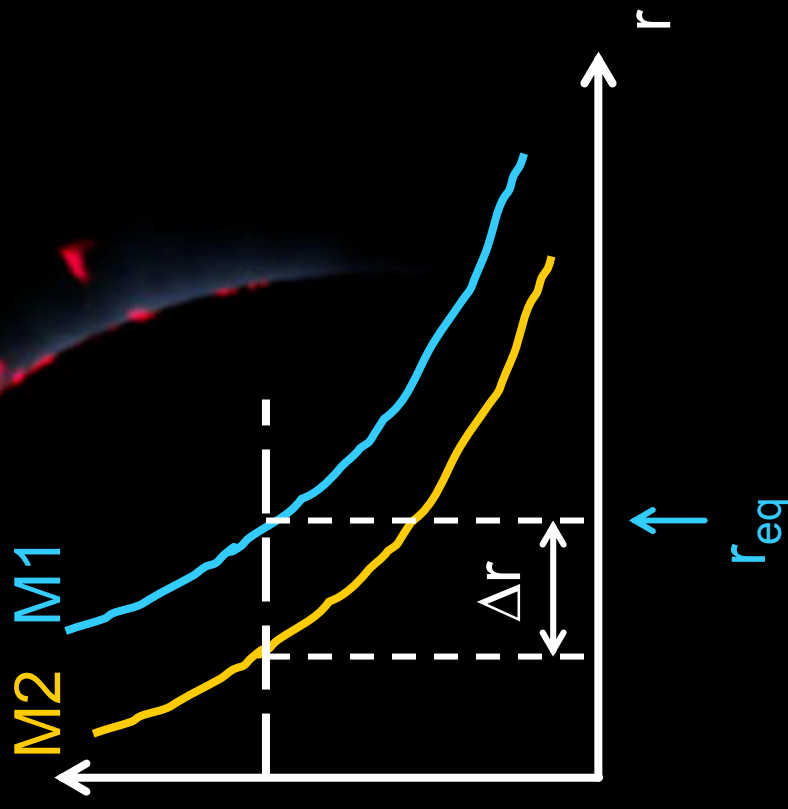
Mode f
=
Onde de surface

H_p, H_p


<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=8169>



Rayon d'équilibre
 r_{eq}

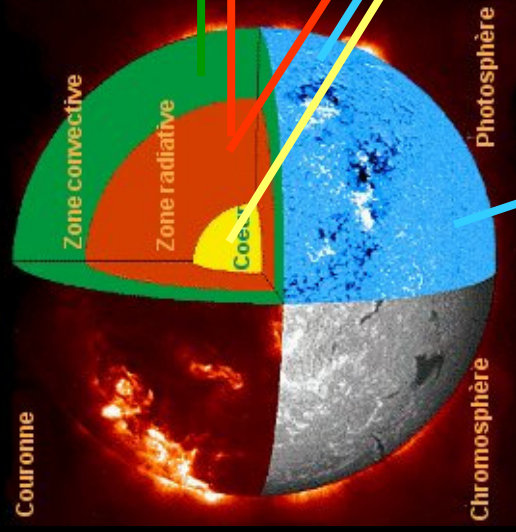


Conclusions

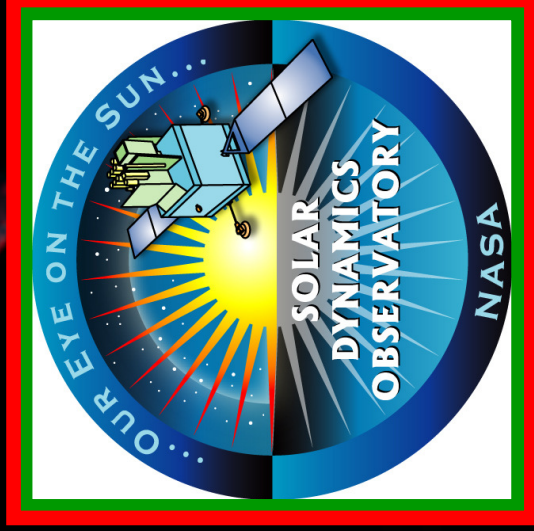
- Leptocline :
 - zone de transition entre ZC et Photosphère
 - modes- f => variation de la stratification avec le cycle
 - structure en double couche
 - couches les plus externes en antiphasse avec le cycle
 - Propagation des modes f liée à H_p , H_p et c ?
- Perspectives :
 - Utilisation de modèles dynamiques avec rotation et champ magnétique
 - Asphéricités en sous-surface 

Perspectives

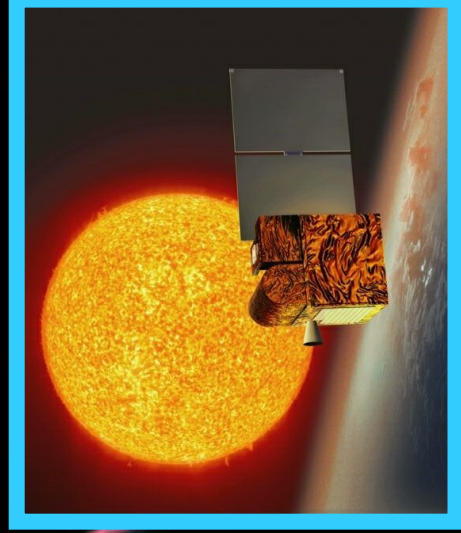
SDO



Credit NASA

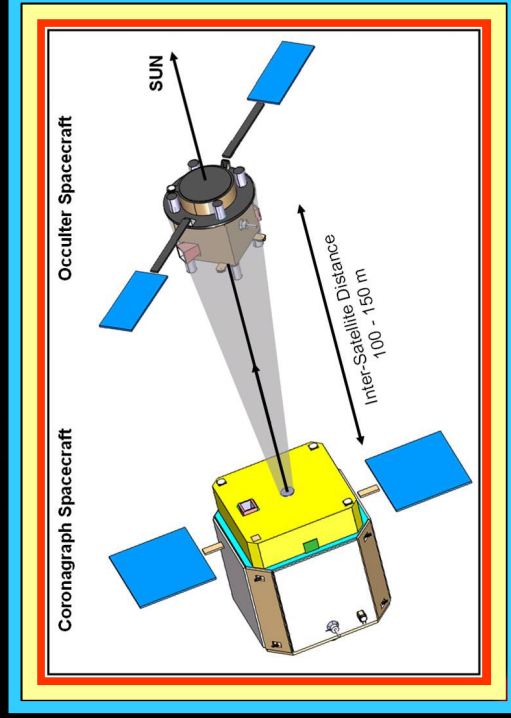


Credit CNES



PICARD

Credit CEA



A circular graphic with a glowing red and blue border. The text "Merci..." is centered in the dark interior of the circle.

Merci...