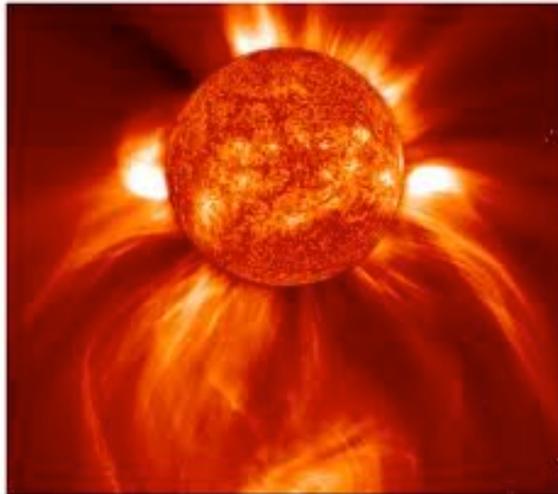
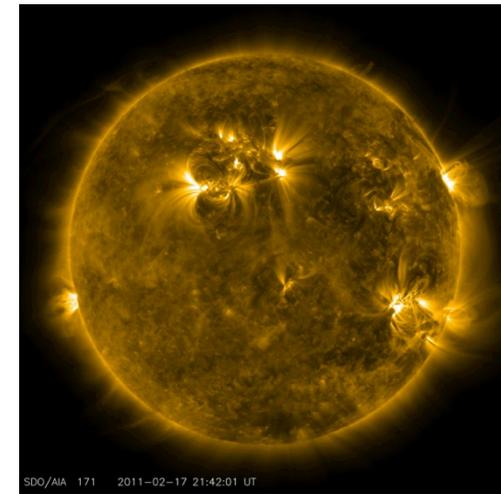


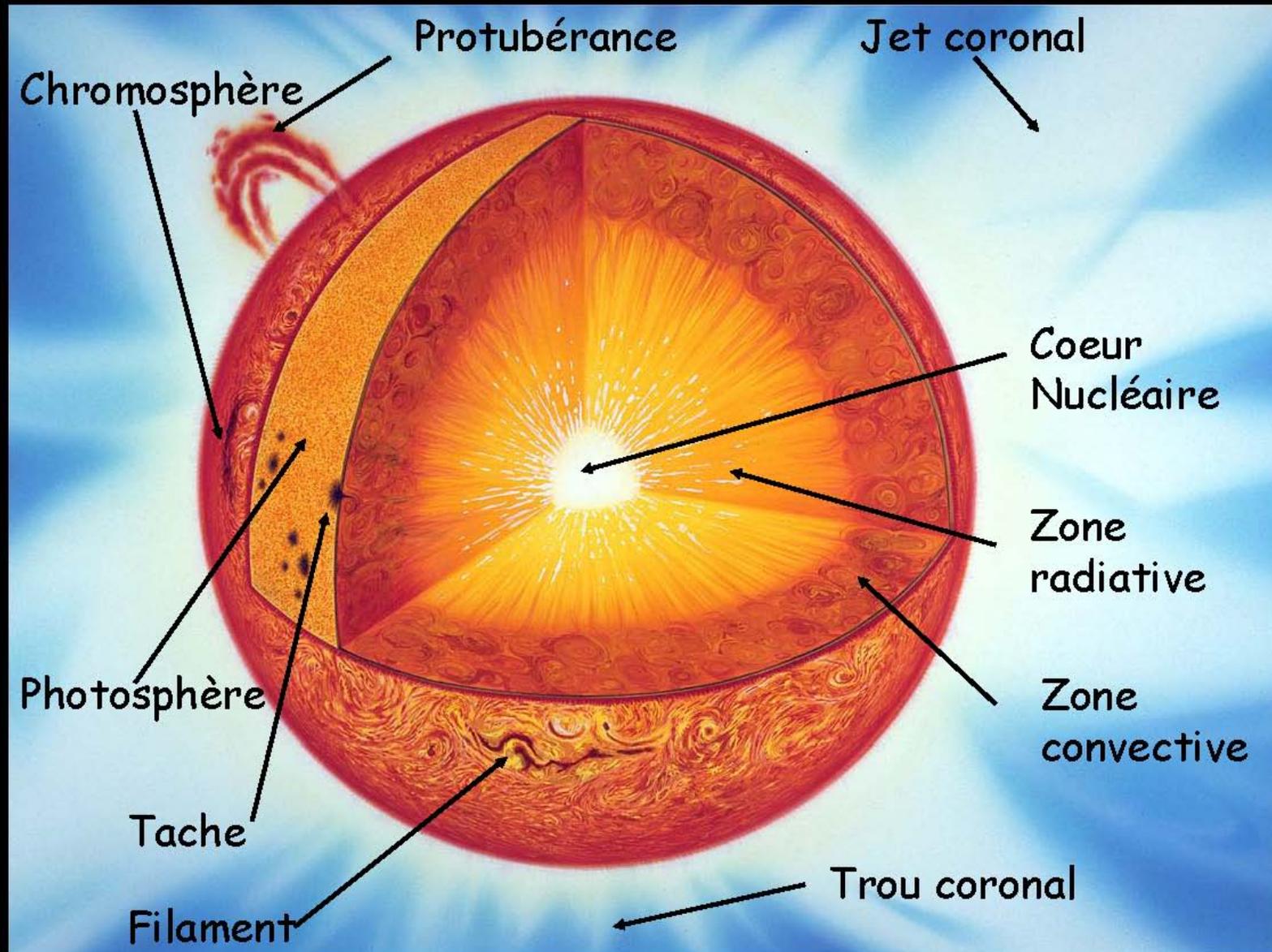
# Quoi de neuf sous-dans le Soleil, grâce à SoHO ?



Patrick Boumier  
et collaborateurs



# Le Soleil



## Comment sonder l'intérieur alors que nous n'observons que du signal superficiel ?

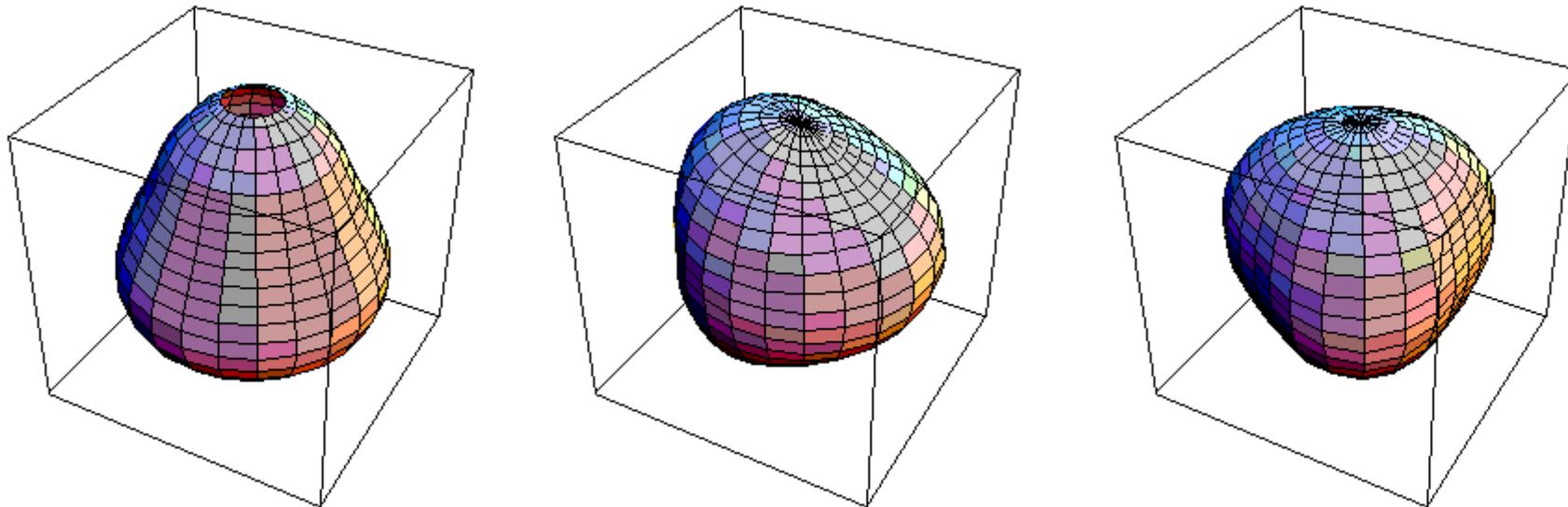
« A première vue, il semblerait que l'intérieur profond du soleil et des étoiles est moins accessible aux investigations scientifiques que n'importe quelle autre région de l'univers. Nos télescopes peuvent sonder de plus en plus loin dans les profondeurs de l'espace ; mais comment pourrions-nous jamais 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? »

Réponse ~ 50 ans plus tard :

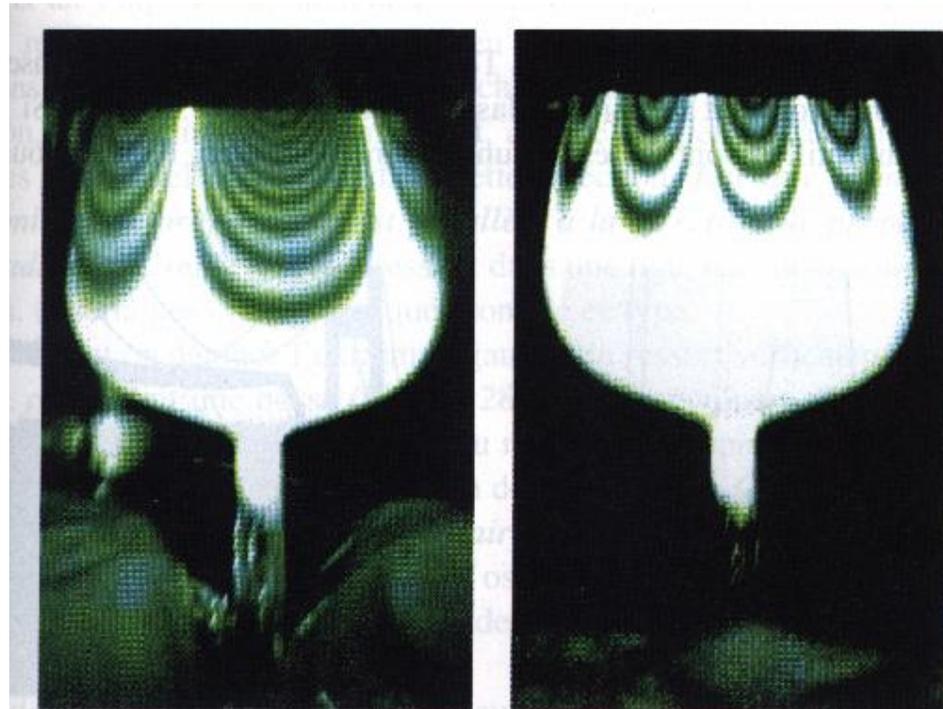
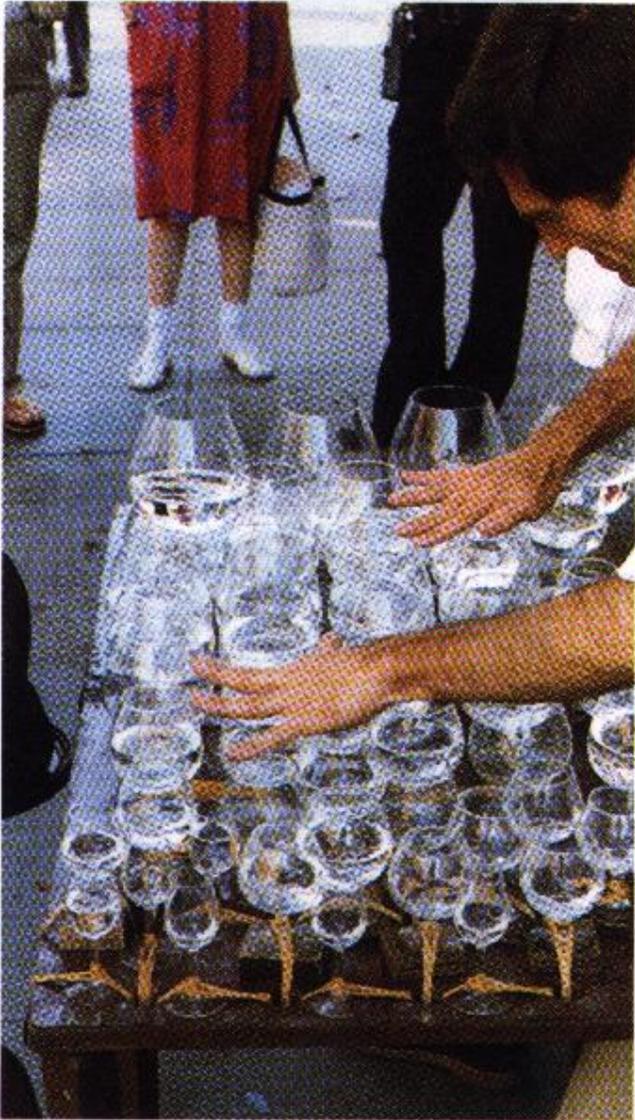
grâce à la sismologie de l'étoile !

Par l'observation et l'analyse des vibrations propres du Soleil :

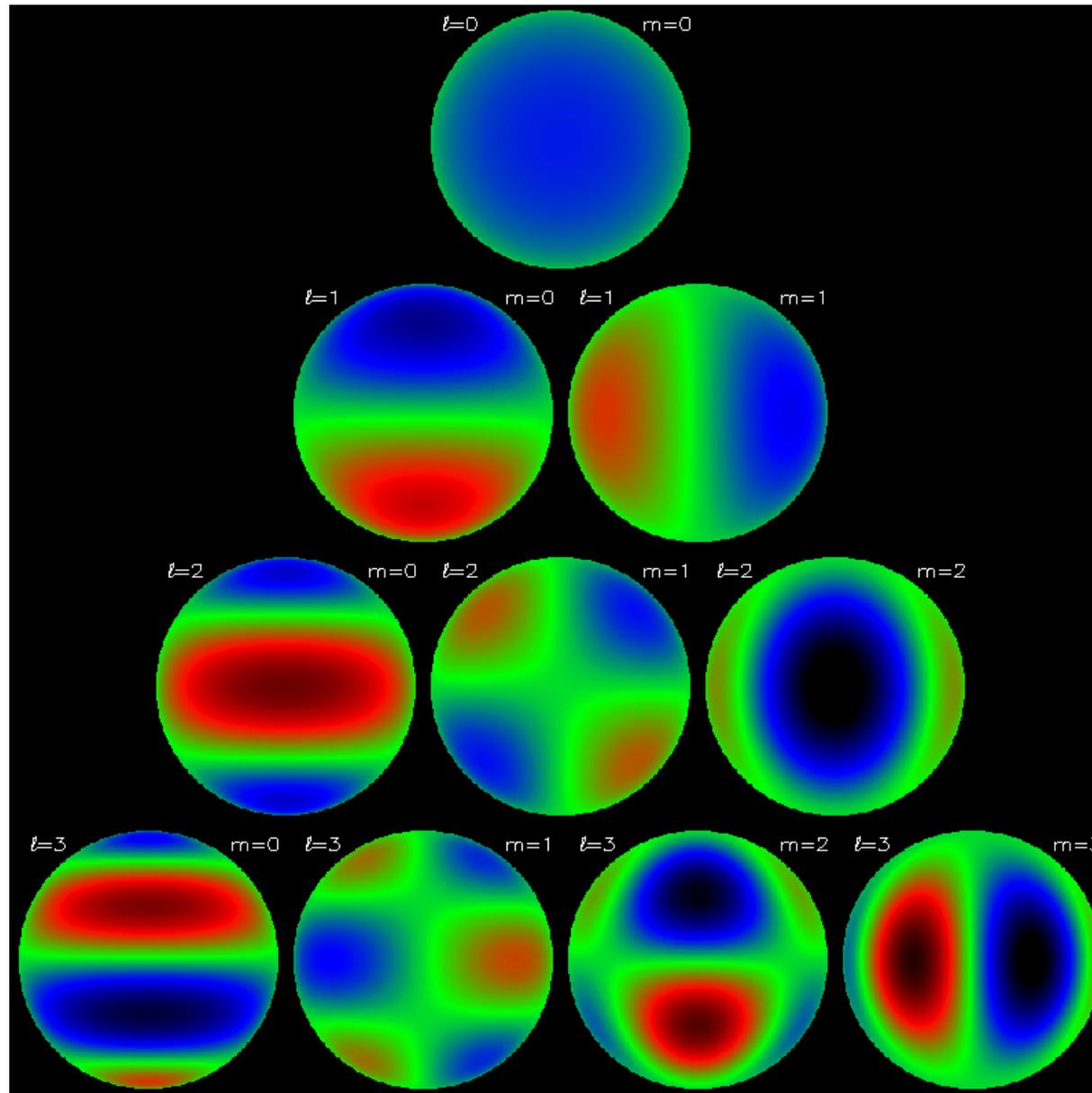


Plusieurs modes de vibrations propres liés à :

la géométrie de l'objet, à la composition du milieu qui résonne (cavité), aux conditions physiques présentes dans le volume, comme la température par exemple.

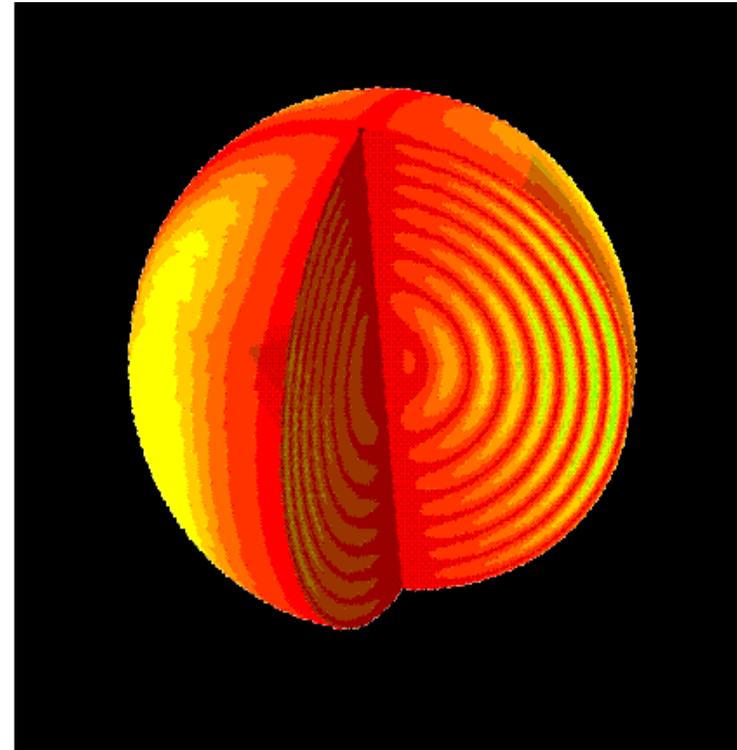
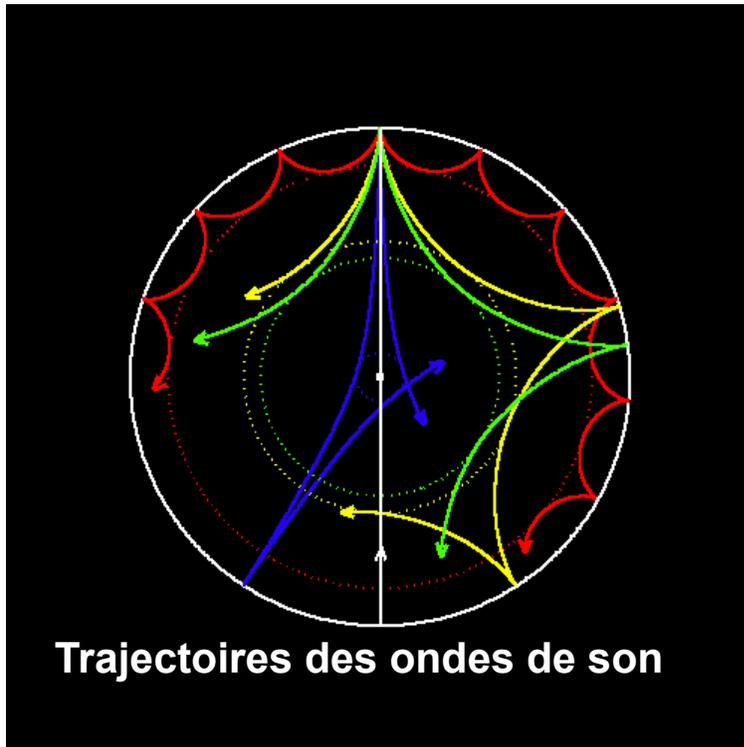


Harmoniques sphériques



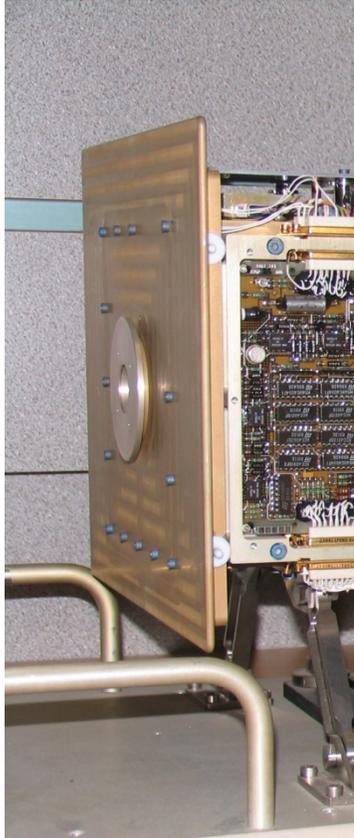
## Vibrations “propres” globales

... issues d'ondes qui se propagent depuis une certaine profondeur jusqu'à la surface

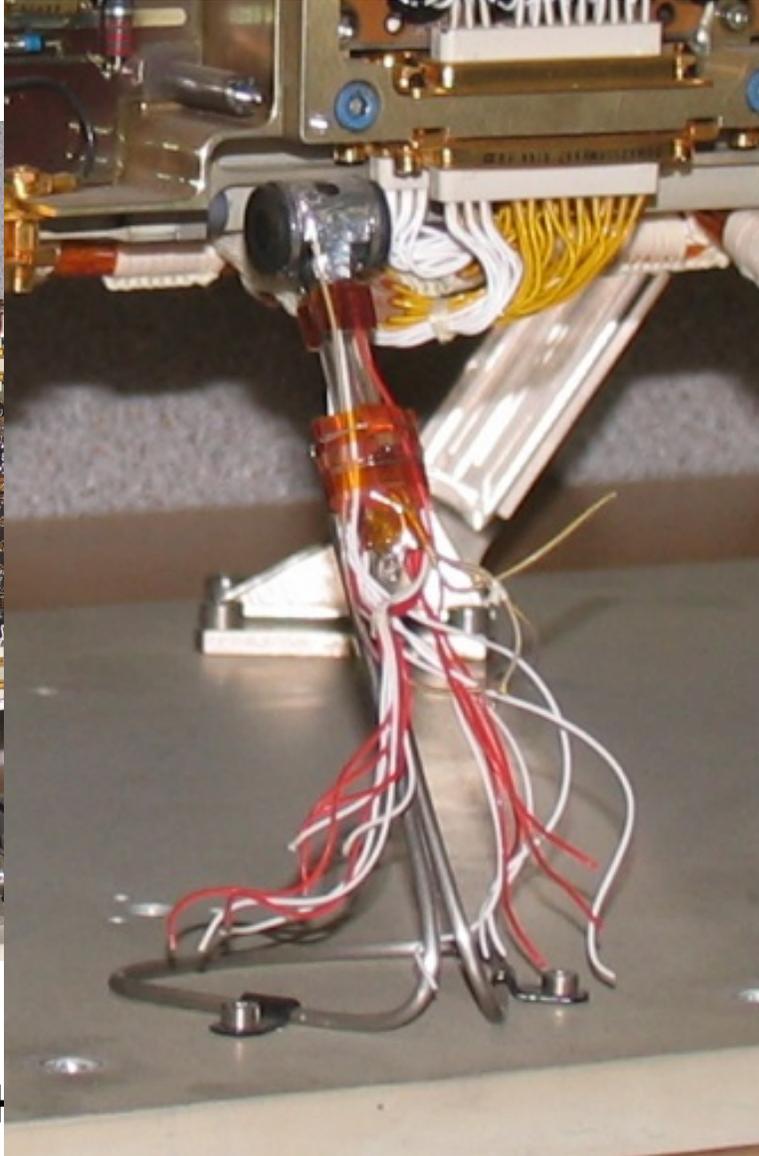


Des milliers de vibrations différentes « porteuses » d'une information spécifique  
⇒ une grande richesse pour sonder l'intérieur solaire avec précision !

L'instrument



IAS + OCA +

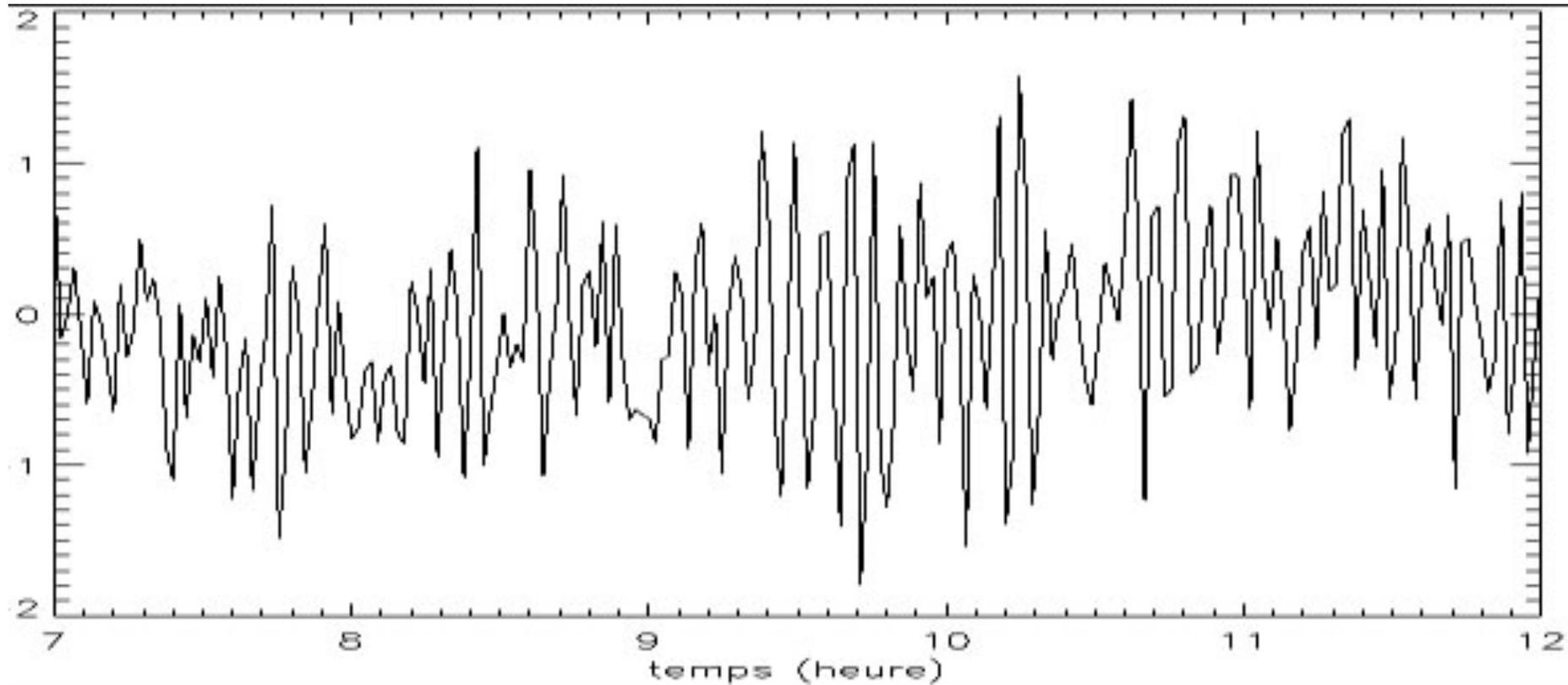


e à résonance



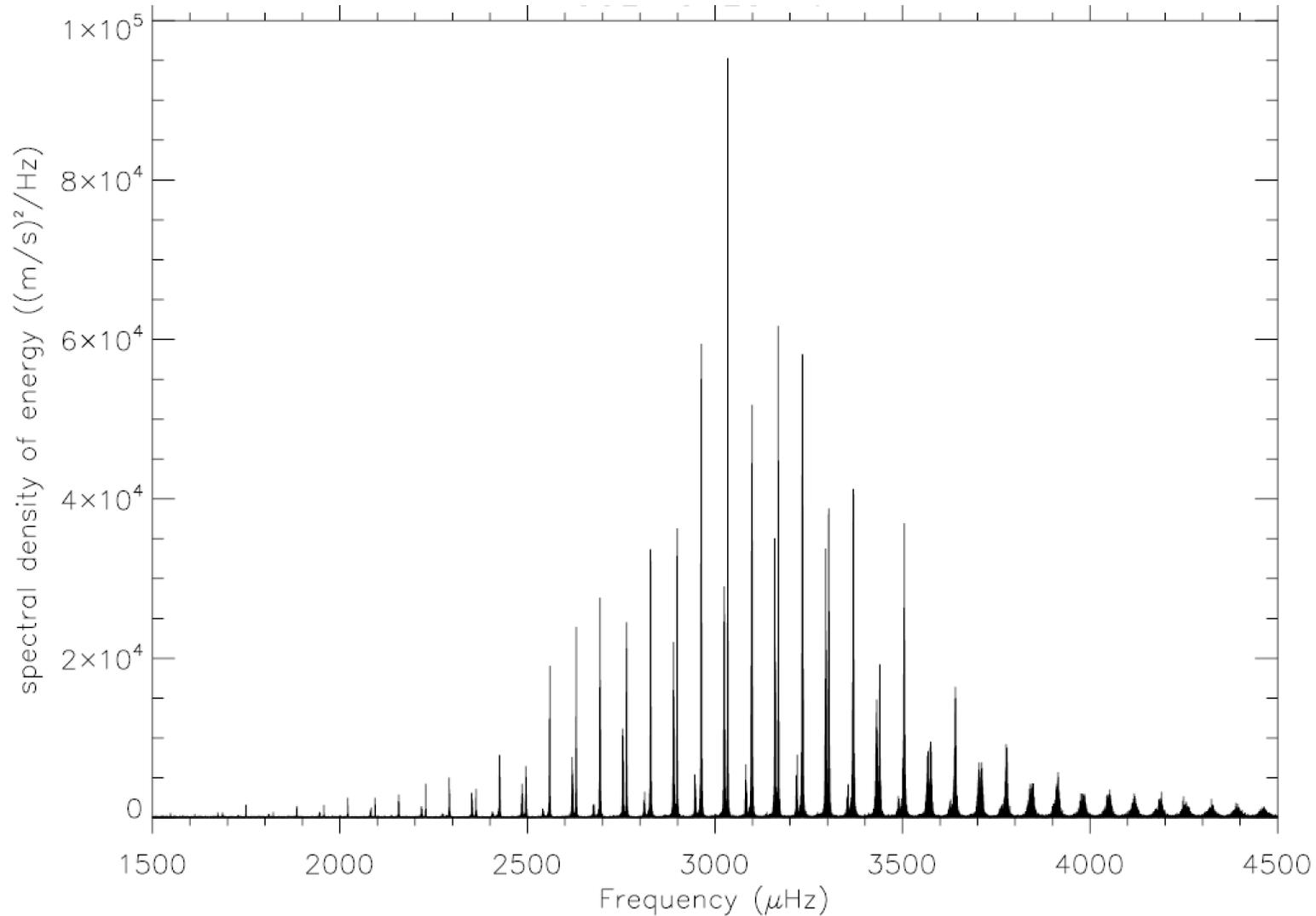
+ IAC + UCLA

## Observation des vibrations solaires

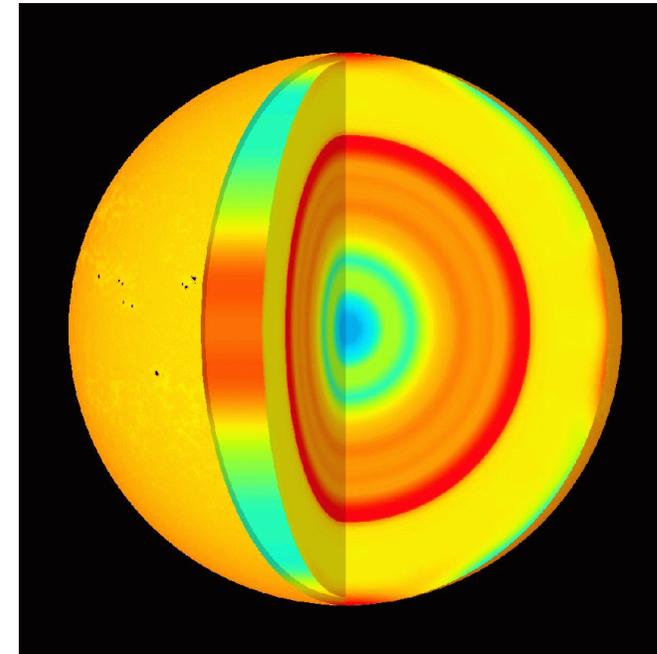
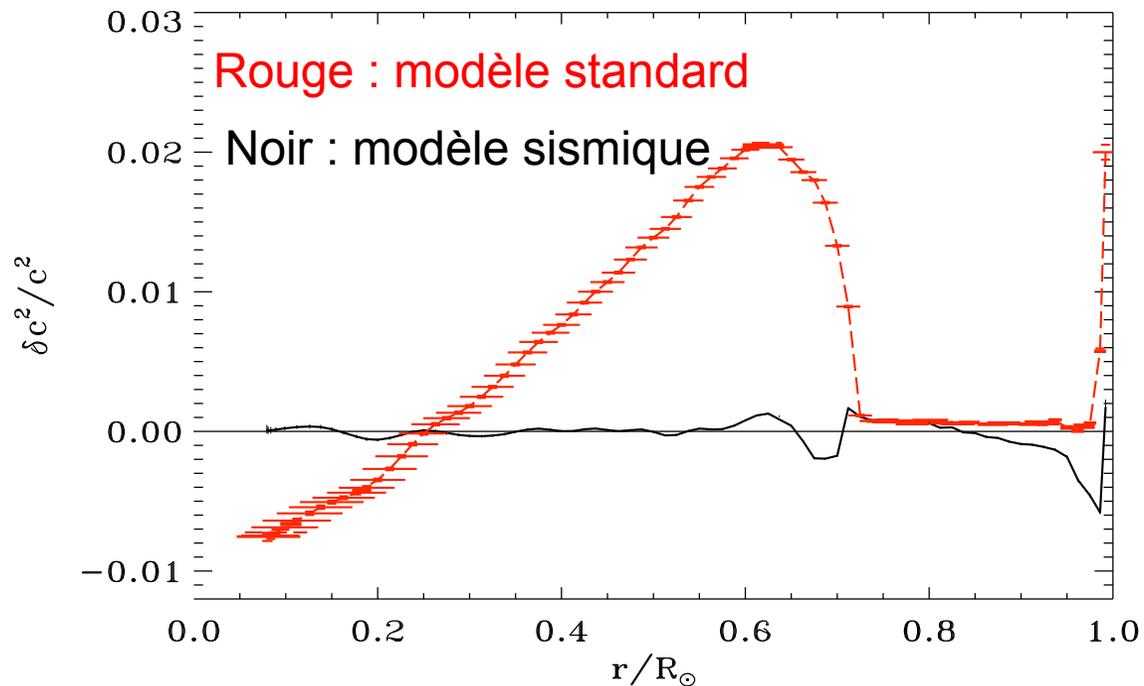


Vitesse du Soleil sur lui-même (m/s) ; GOLF/SoHO

## Spectre des modes acoustiques (GOLF/SoHO)



Différences entre observations (GOLF + MDI) et modèles, du centre à la surface. Exemple de la vitesse du son, liée à la température et à la densité.



Température centrale : 15.76 ( $\pm 0.15$ ) millions de degrés

Densité centrale :  $\sim 150 \text{ g cm}^{-3}$

## Modèle sismique et Physique

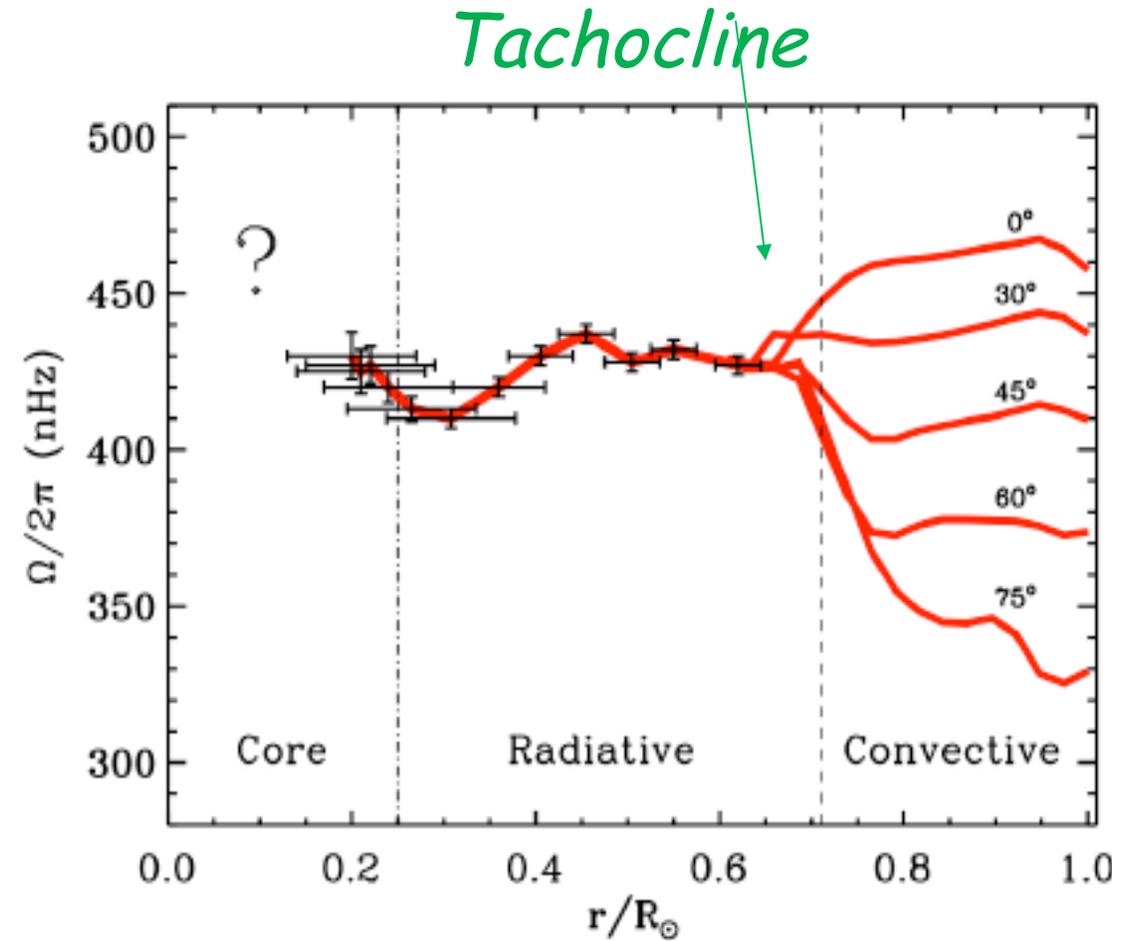
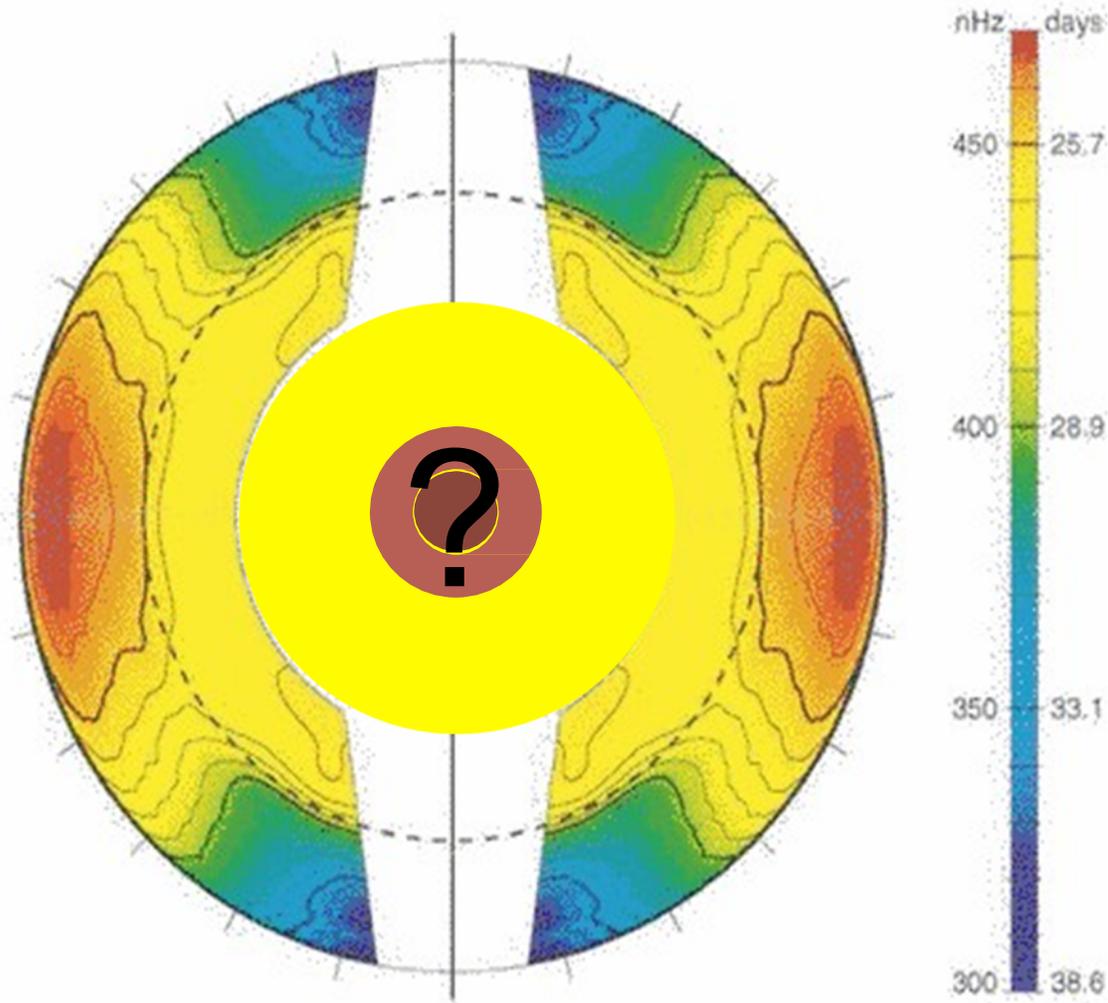
- **Processus macroscopiques** : diffusion gravitationnelle, turbulence...
- **Ingrédients** : réactions nucléaires (p-p au %), équations d'état, opacités, ...
- **Neutrinos** : l'étau s'est resserré sur les taux  $\Rightarrow$   
**enfin un accord entre prévision et mesure ! ☺**

modèle sismique :  $5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

SNO:  $5.05 \pm 0.30 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

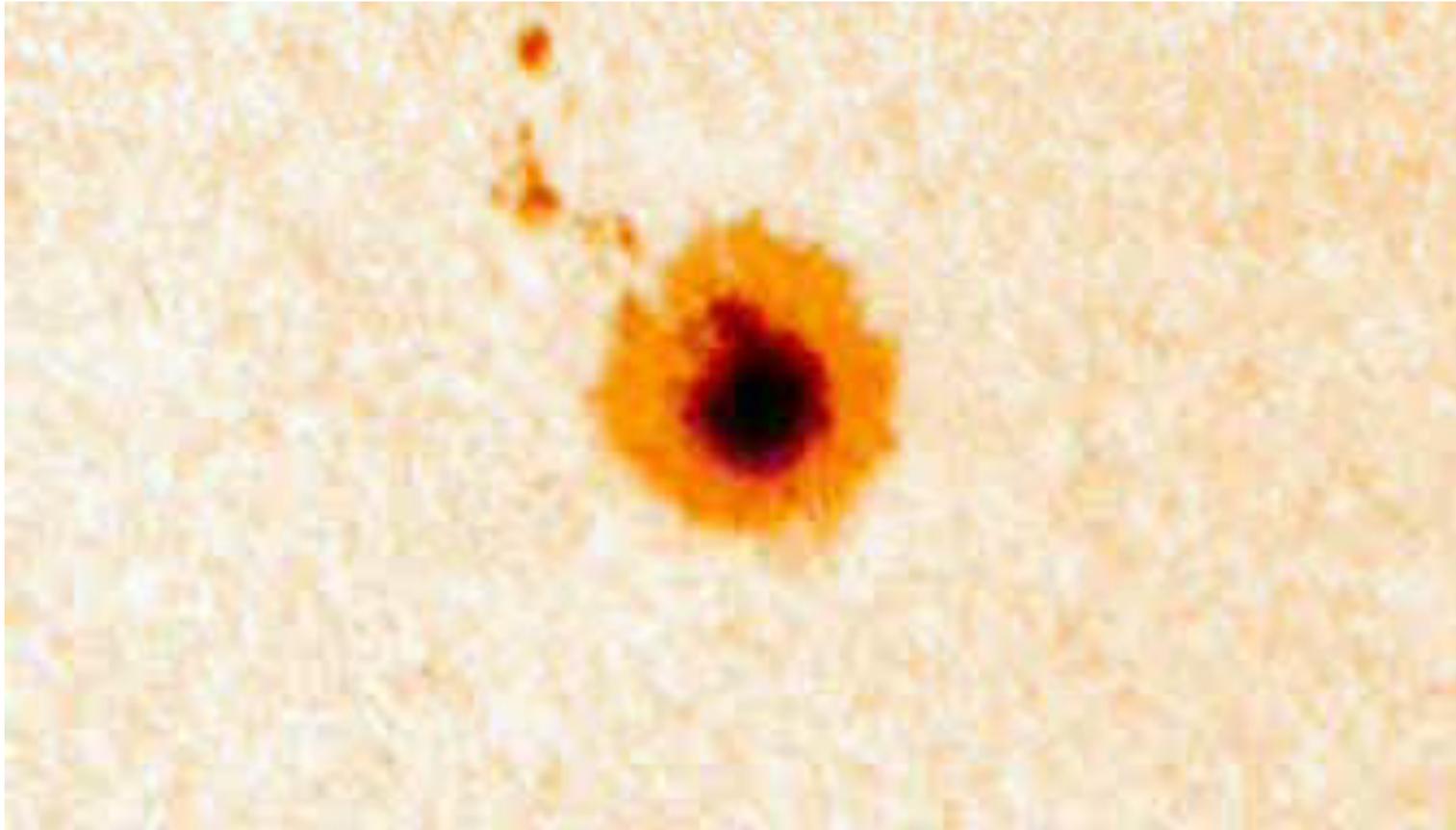
$^8\text{B}$  neutrinos (énergétiques + les 3 familles)

## Rotation en profondeur et en latitude



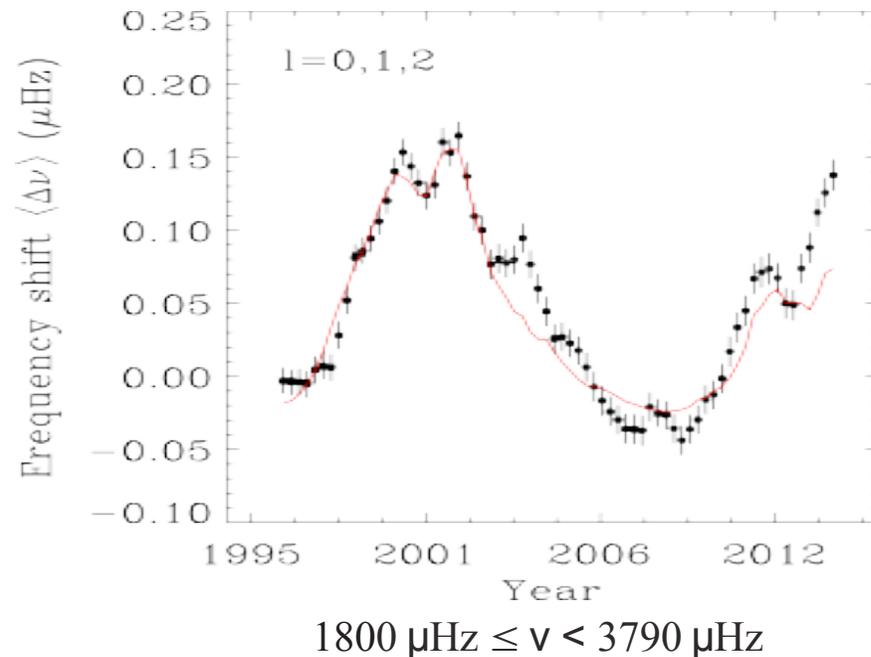
## Sismologie locale

Thermique et dynamique sous une tache solaire (tomographie acoustique)



## Oscillations acoustiques et cycle d'activité magnétique

- Evolution des fréquences acoustiques  $\Rightarrow$  confirmation du démarrage du cycle 24, même en l'absence d'indicateurs de surface (Salabert et al 2015).
- Découverte d'oscillations biennales.

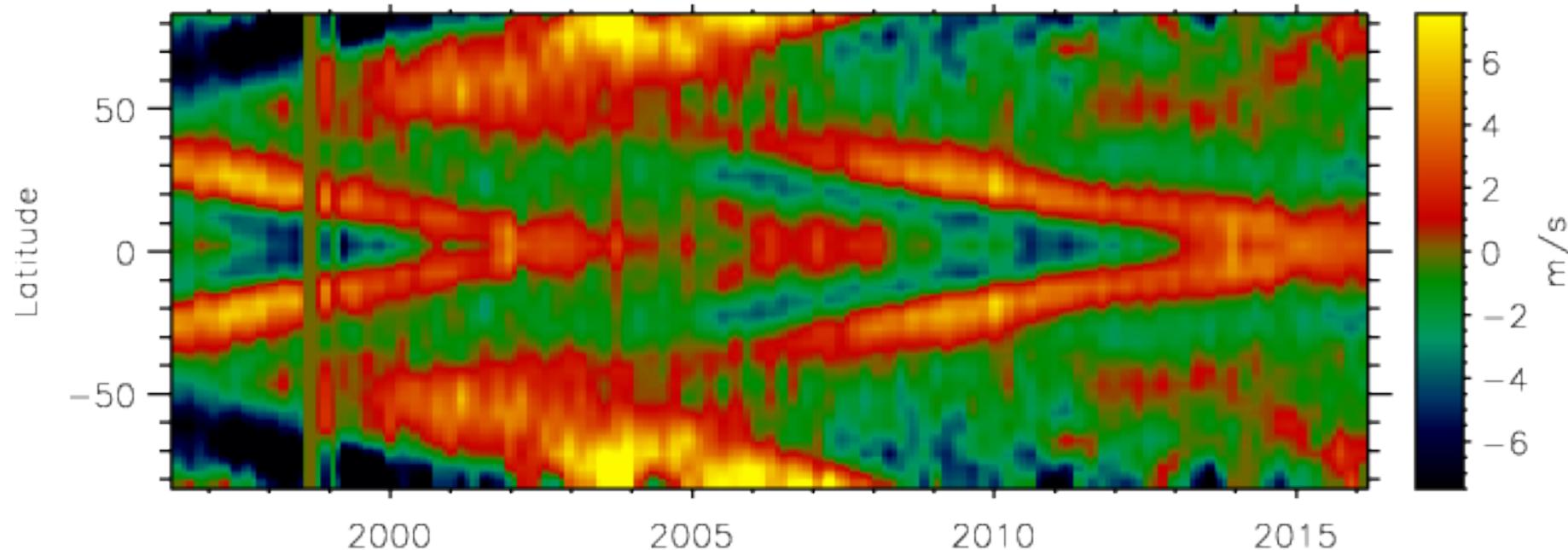


### Les processus du cycle magnétique dépendent de la profondeur dans le Soleil

- Les modes propres de basse fréquence, sensibles aux couches plus profondes que 1400 km, montrent des décalages en fréquence identiques pour les Cycles 23 and 24.
- Les modes à plus haute fréquence, sensibles aux couches plus superficielles, montrent des décalages en fréquence inférieurs de 30% sur le Cycle 24, par rapport à ceux du Cycle précédent, ce qui est en accord avec la décroissance observée dans les indicateurs magnétiques de surface.

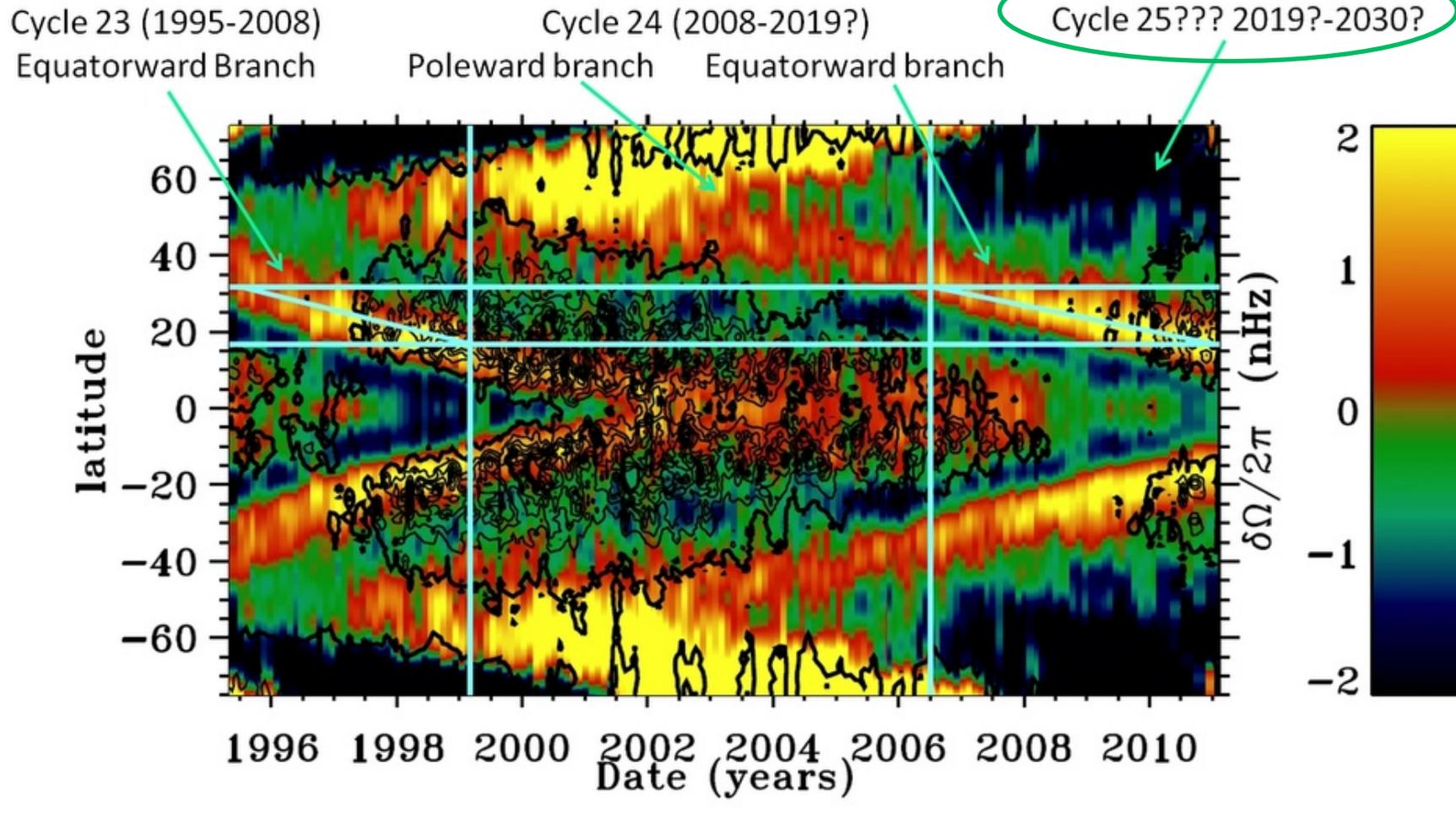
## Oscillations acoustiques, cycle d'activité magnétique ET rotation !

Update of Corbard & Thompson (2002) using MDI and HMI f-modes



- Modulation de la rotation interne au cours du cycle.
- Circulation méridienne vers les pôles (matière + flux magnétique) : retour vers l'équateur : où ? Tachocline ? Près de la surface ?

## Quid du cycle prochain ?



Il manque le courant vers les pôles qui précède le départ d'un nouveau cycle !

## Vers un minimum d'activité ?

Communiqué de presse de collègues du NSO en juin 2011 :

3 études indépendantes et complémentaires (intérieur, surface, haute atmosphère)



Le cycle 25 sera retardé, voire inexistant...

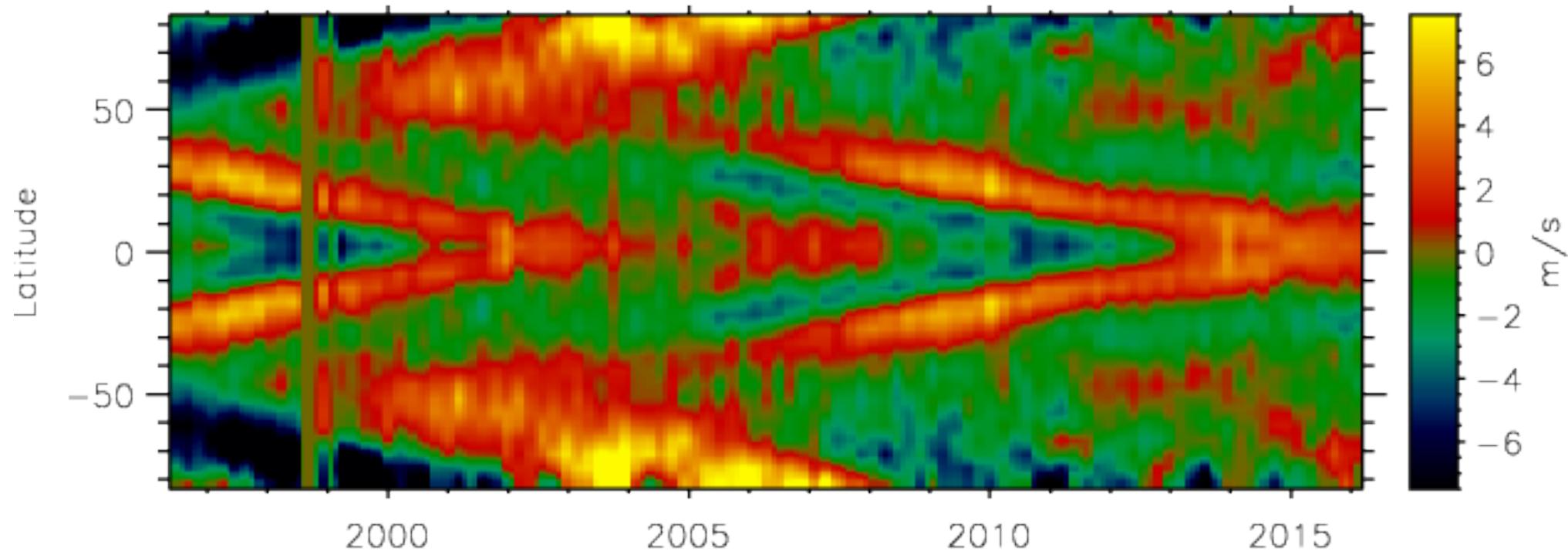
⇒ **Petit refroidissement terrestre dans une dizaine d'années ?  
(le Soleil émet plus de lumière globalement, quand il est taché)**

Rassurons-nous, il y aura en principe de l'activité locale, avec des belles CMEs !

**A plus long terme : climat. Prédiction de l'amplitude des cycles solaires sur des siècles et des siècles :  
difficile à établir (et à vérifier...)...**

# Nouvelle branche polaire de bien plus faible intensité

Update of Corbard & Thompson (2002) using MDI and HMI f-modes



## Conclusion

- SoHO a permis une réelle **vision 3D** de l'intérieur du Soleil et permet même de rajouter la dimension temporelle (**dynamique** à court et moyen termes). Le **magnétisme** tient une place essentielle.
- Parmi les grandes questions :
  - Rotation du cœur (magnitude et inclinaison) ?
  - Matière noire dans le coeur (nature et quantité) ?
  - Champ magnétique fossile ?
  - Cycle magnétique 25 ?
  - Le Soleil est-il dans une phase particulière (baisse du niveau des cycles depuis plusieurs cycles) ? Se prépare-t-il à un minimum du type de Maunder ?
  - Origine des cycles magnétiques ?