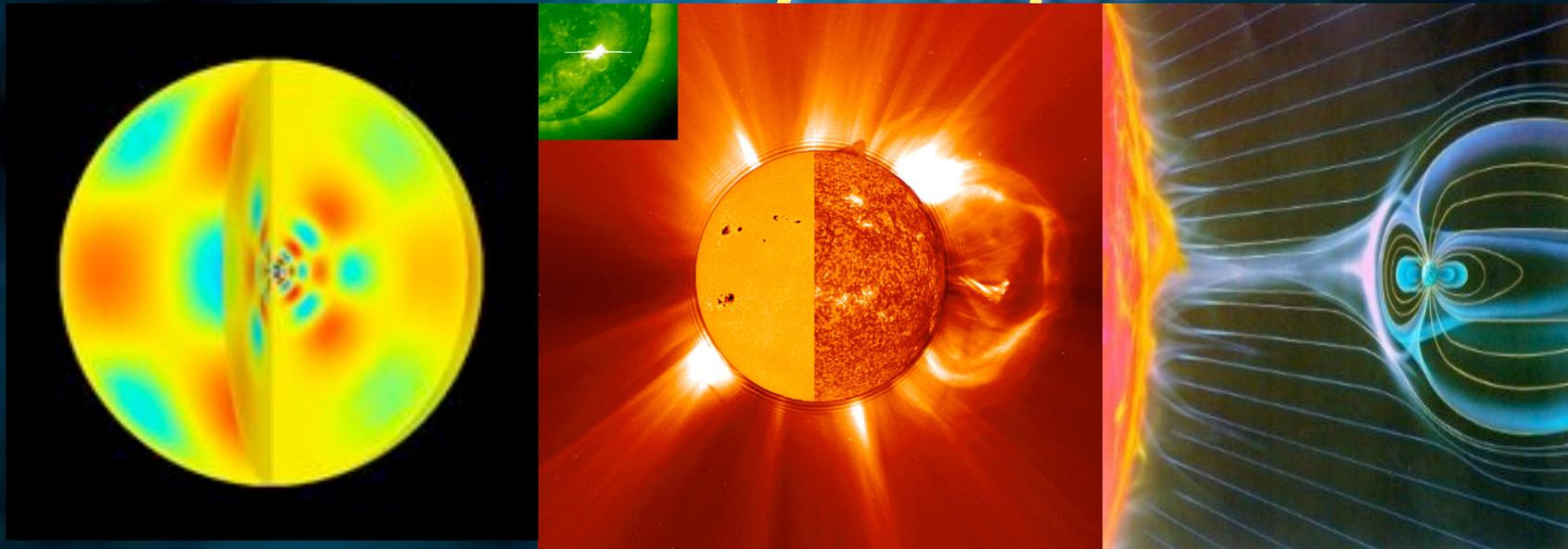


# Le Soleil un plasma dense, chaud et dynamique



S. Turck-Chièze, S. Brun, P.H. Carton, J.-C. Barrière, J. Ballot, V. Duez, P. Daniel-Thomas, R. Garcia, R. Granelli, C. Lahonde-Hamdoun, D. Loiseau, G. Loisel, S. Mathis, S. Mathur, F. Nuno, L. Piau, Y. Piret

- 
- Pourquoi le Soleil est particulièrement étudié au CEA

## Récentes directions d'étude (4)

- Le projet GOLF-NG
  - Contexte
  - Où en sommes nous ?
  - Perspectives à Ténérife, au Dôme C, dans l'espace

# Pourquoi le Soleil est particulièrement étudié au CEA

Intra IRFU: détection neutrinos solaires (SPP)

prédictions (SAp) *STC et al. Phys. Report 1993, 230, 59*

Gallex: neutrinos pp, SuperKamiokande, SNO ( $^8\text{B}$ ), Borexino

Développement de la sismologie 1988 Construction GOLF

Utiliser la sismologie pour contraindre les prédictions du modèle standard solaire et mieux comprendre les propriétés du plasma

Lancement SoHO 1995- 2012

# Neutrinos

- Stabilisation de la prédiction des neutrinos
- Très bon accord entre prédiction et détection (sommant les différentes saveurs de neutrinos) et entre sismologie et neutrinos
- Aujourd'hui probablement début de **l'Astronomie des neutrinos** avec Borexino pour les neutrinos de CNO si précision suffisante

# Directions actuelles d'études

- Développement de la simulation numérique au SAp: simulation 3D de l'intérieur solaire et stellaire

Séminaire DSM : 25 Septembre 11h

- Etude théorique des processus dynamiques et implantation dans les codes d'évolution stellaire

Nécessaire pour une confrontation quantitative des observables (soleil-étoiles)

- Contraintes venant de l'observation
- Contraintes expériences en laboratoire

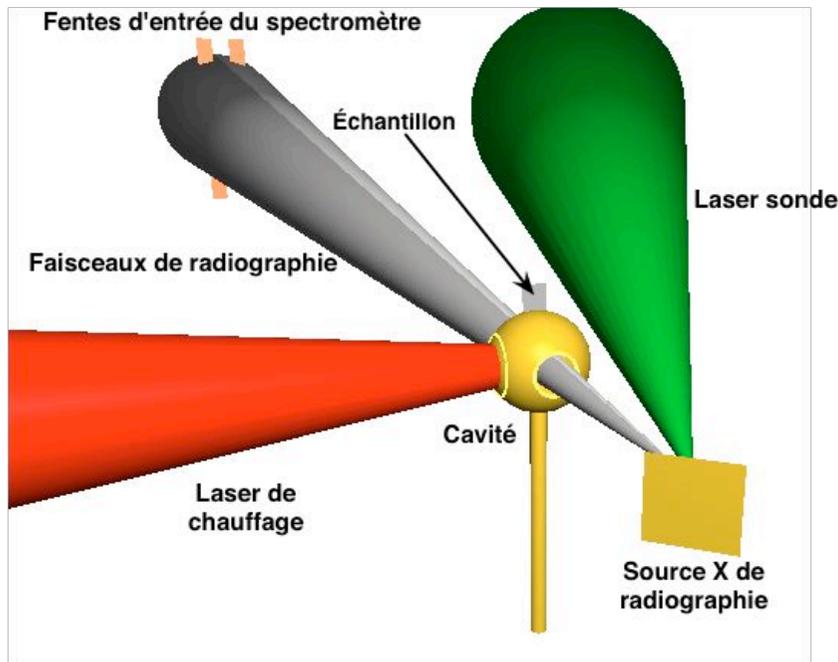
=> Objectif: Irfu devrait réaliser des contributions majeures sur l'interaction Soleil-Terre et le climat ? !! Et aussi sur la compréhension des processus dynamiques en évolution stellaire

# Contraintes expérimentales

- Arrêt des essais nucléaires en 1995-1997, demande du CEA de contribuer à valider scientifiquement la simulation et l'approche laser de Bordeaux
  - **Activités opacités**: mesure de sections efficaces photon-matière utilisés dans les codes d'évolution stellaire
  - Début des expériences LULI 2000 Juin 2008: collaboration SAp- DRECAM-DAM
  - Préparation d'un programme pour la LIL avec fabrication d'un diagnostic **reproduire un plasma stellaire en laboratoire**: demande Irfu 2009 ?

**Ce programme vient d'être validé entre SAp- DAM réunion 12/9/08 avec le Directeur scientifique de la DAM**

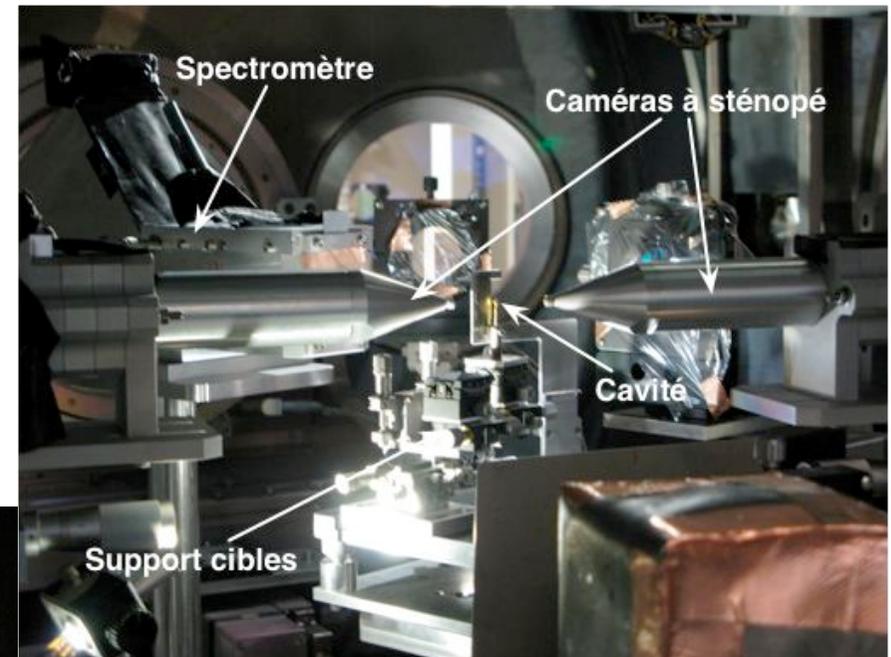
# Comparaison des mesures d'absorption spectrale d'éléments de Z voisins Fe, Ni, Cu, Zn, Ge: l'interaction spin-orbite dans un plasma



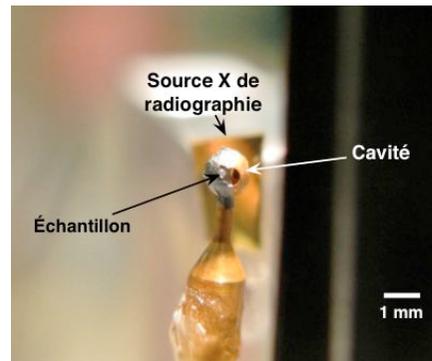
## Schéma de principe

- Spectrométrie sur 2 voies de mesures :
- Source X seule
  - Source X à travers l'échantillon

## Intérieur chambre d'expérience :



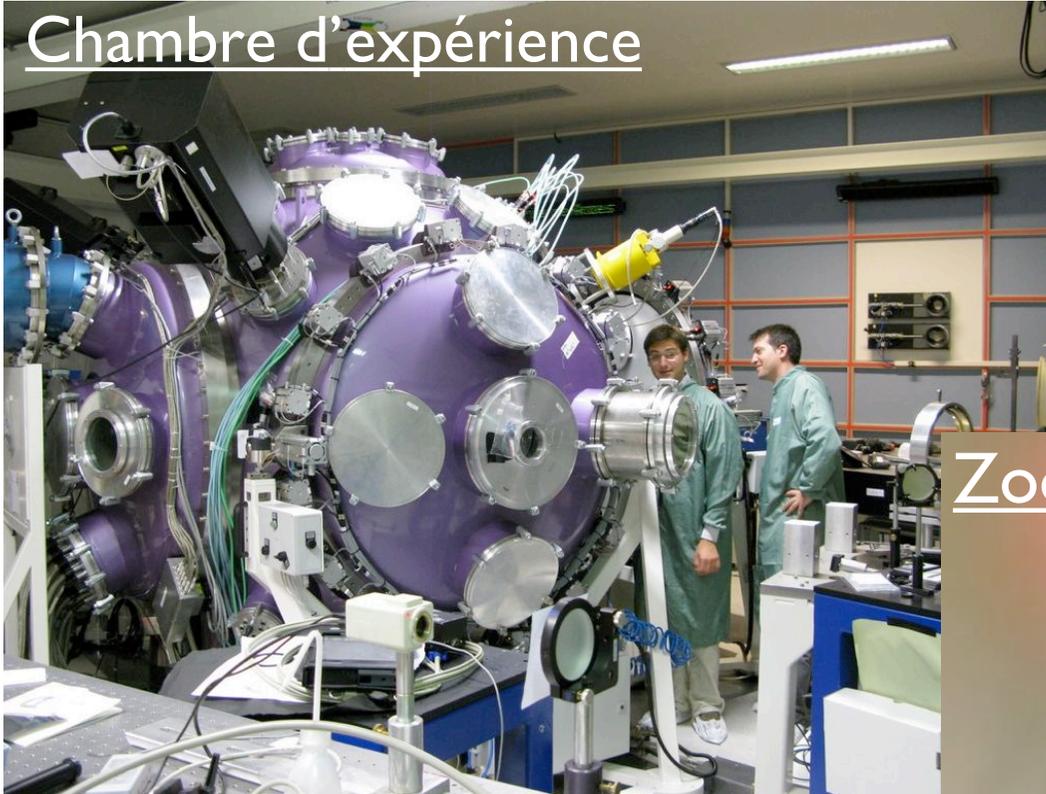
- Laser de chauffage : 100 à 200 J, impulsion 500 ps
- Laser sonde : 10 à 20 J, impulsion 10 ps, retardé de 1.5 ns
- Cavité :  $\Phi 1200 \mu\text{m}$
- Échantillon : Feuille C/Métal/C



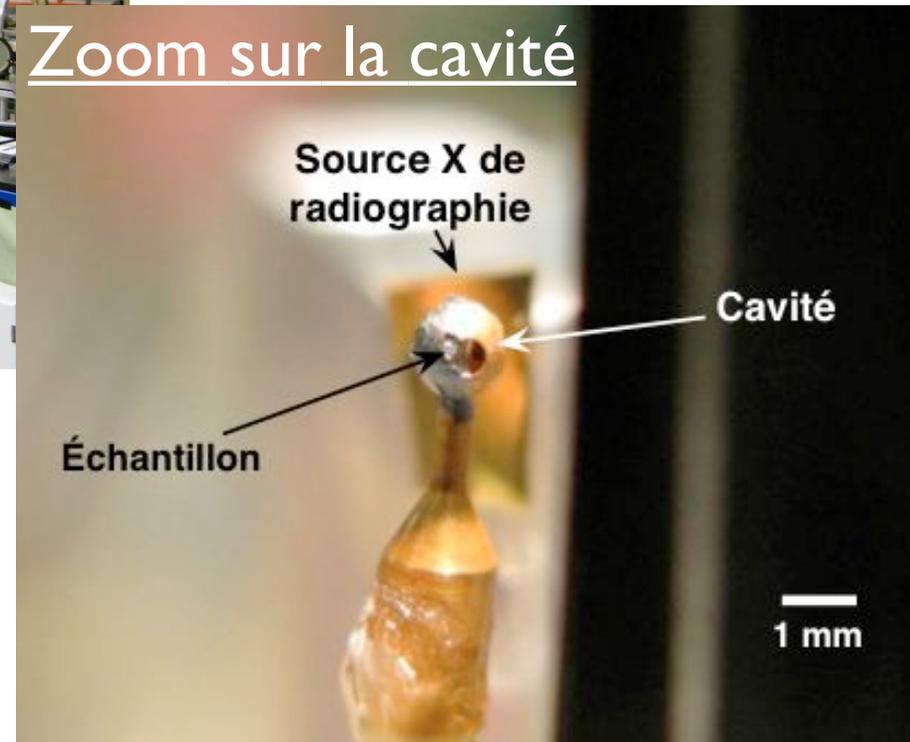
Collaboration DSM/DAM thèse G. Loisel  
DRECAM: F. Thais, T. Blenski, M. Poirier  
équipe d'environ 20 personnes)

Expérience DSM au LULI (juin 2008) - mesure d'opacités spectrales d'éléments de  $Z$  moyens et voisins : Fe, Ni, Cu, Zn, Ge

Chambre d'expérience



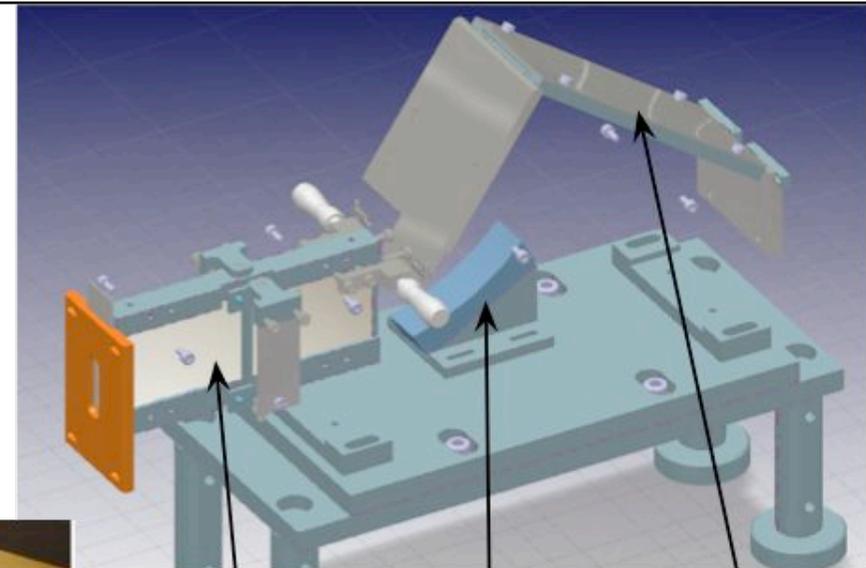
Zoom sur la cavité



# Expérience DSM/DAM au LULI (laser de Polytechnique)

## Spectromètre X à cristal :

- 2 voies indépendantes
- Gamme spectrale atteinte : 8 - 18 Å
- Pouvoir de résolution :  $\langle \lambda / \delta \lambda \rangle \sim 400$   
(théorique 800)

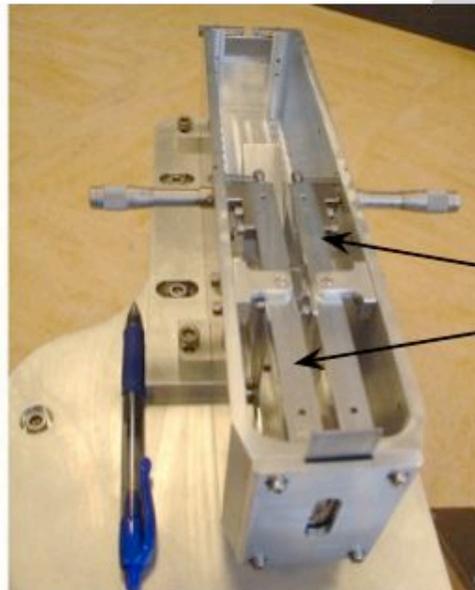


Plan détecteur

Cristal cylindrique

Miroirs focalisants

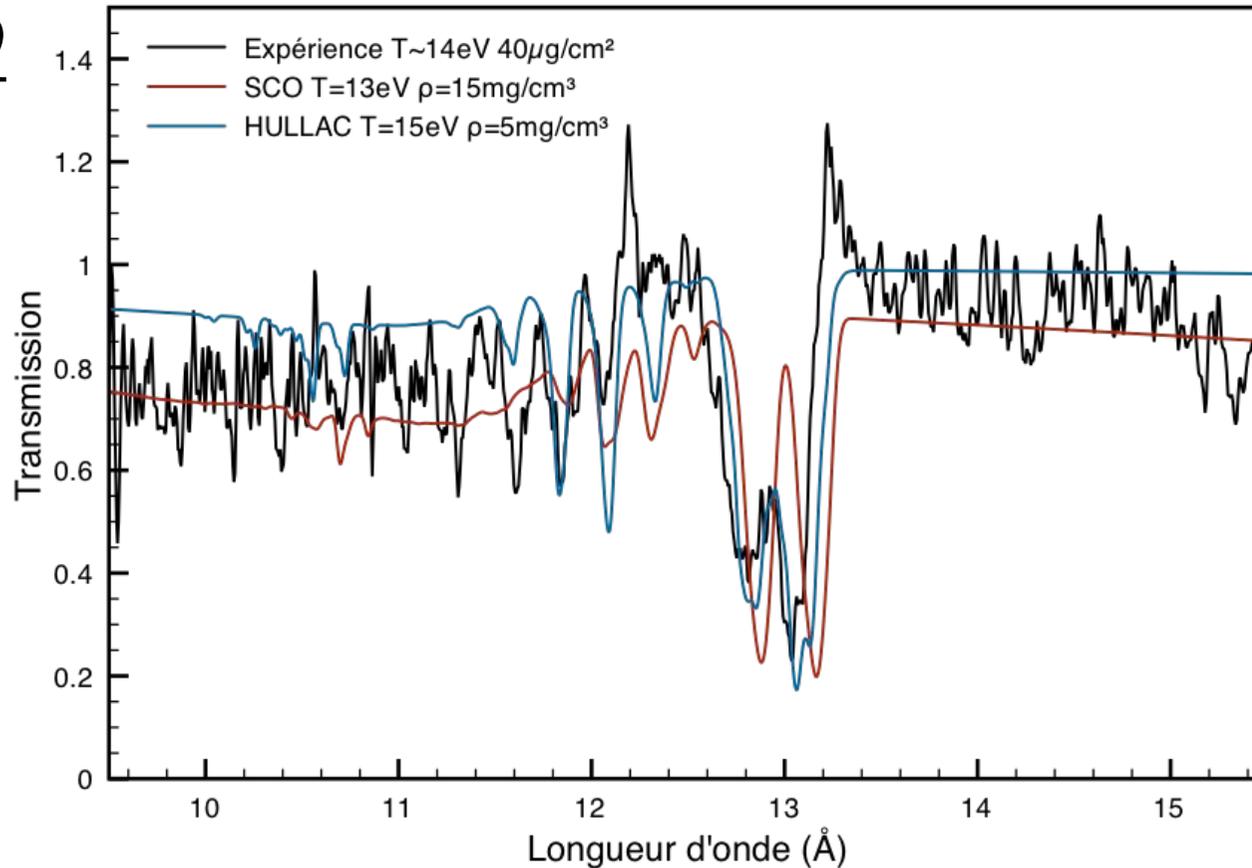
Détecteur = film photostimulable  
à cause IEM due au laser ps.



Préparer un tel diagnostic pour  
la LIL en X-XUV à l' Irfu ??

## Comparaison avec calculs d'opacité

cuivre Z=29

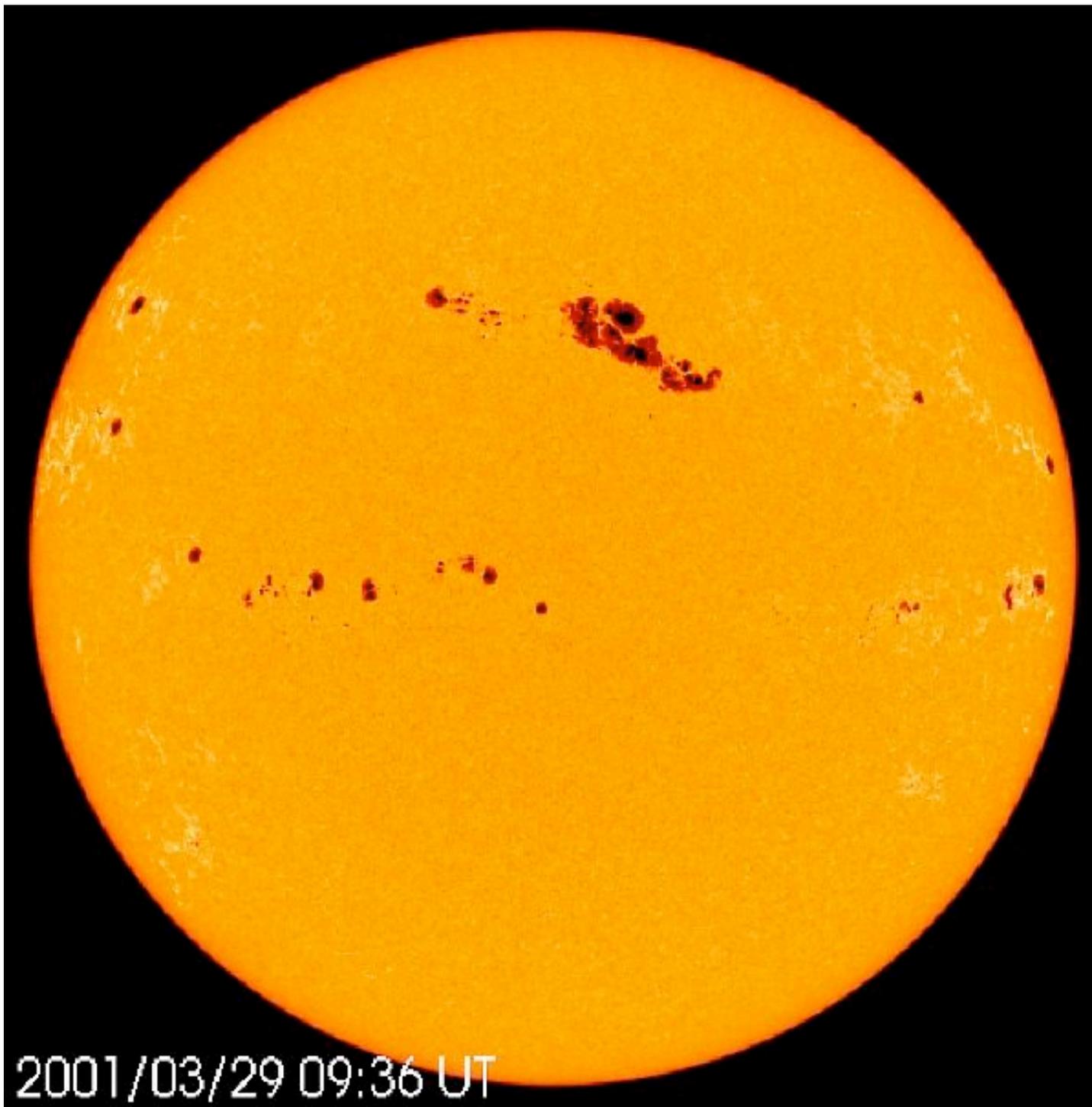


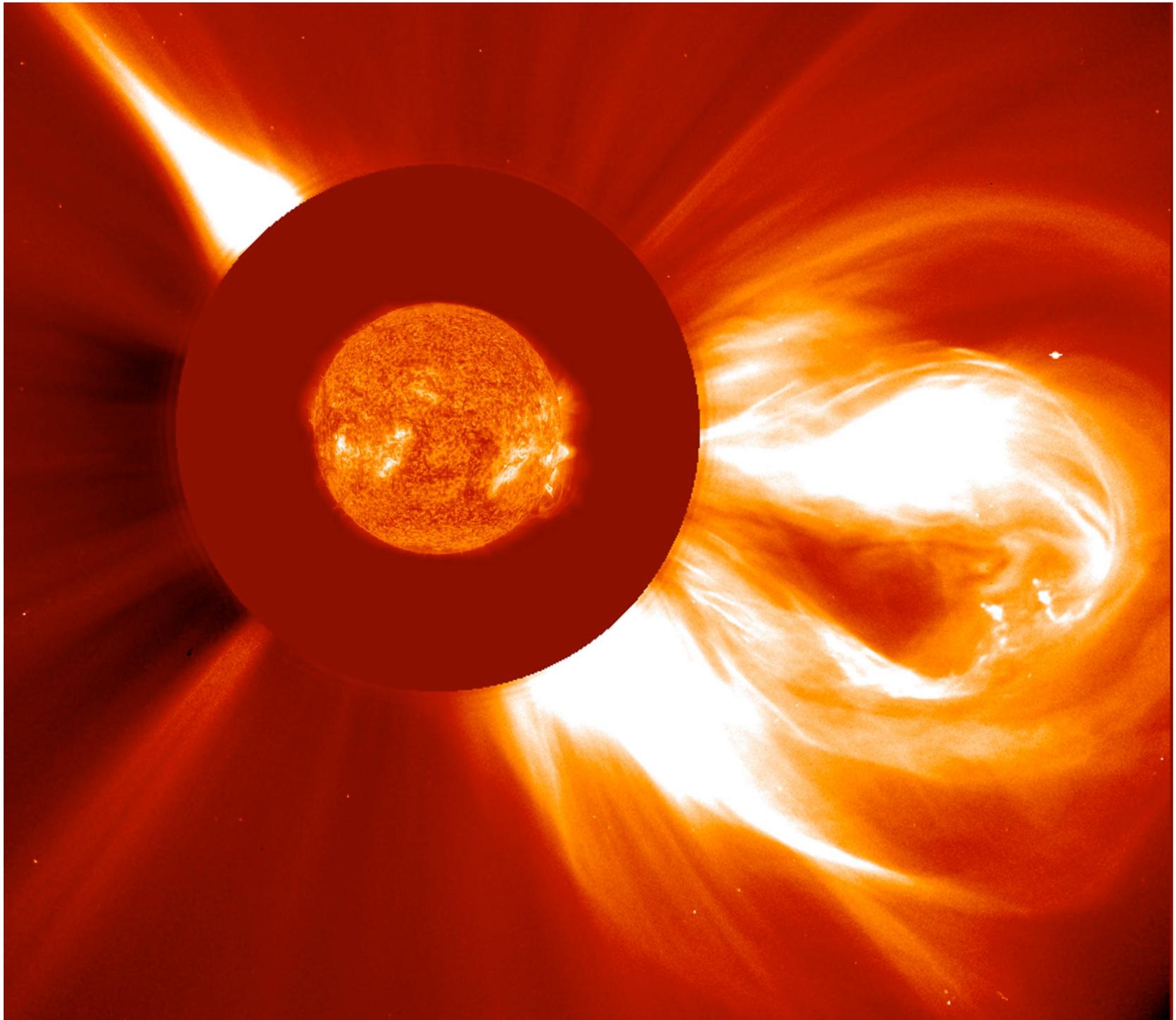
Montée en Température et densité pour atteindre des conditions astrophysiques auprès de la LIL (8 faisceaux + PetaWatt) puis LMJ à Bordeaux

# L'approche instrumentale

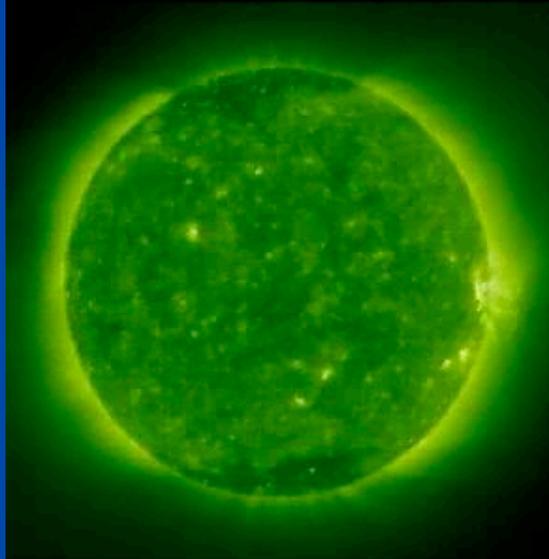
## Le Projet GOLF-NG

S. Turck-Chièze (Responsable scientifique), R. Garcia, S. Mathur (SAp)  
P.H. Carton (Chef de projet), R. Granelli, C. Lahonde-Hamdoun, Y. Piret (SEDI)  
J.-C. Barrière, P. Daniel-Thomas, D. Loiseau, F. Nunio (SIS)  
P.Pallé (Responsable des observations à Ténérife), D. Salabert, S. Jimenez (IAC  
Espagne) et JM. Robillot (Observatoire de Bordeaux)

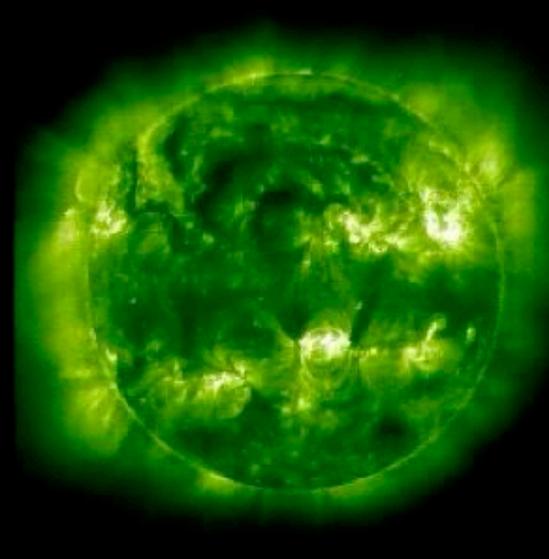




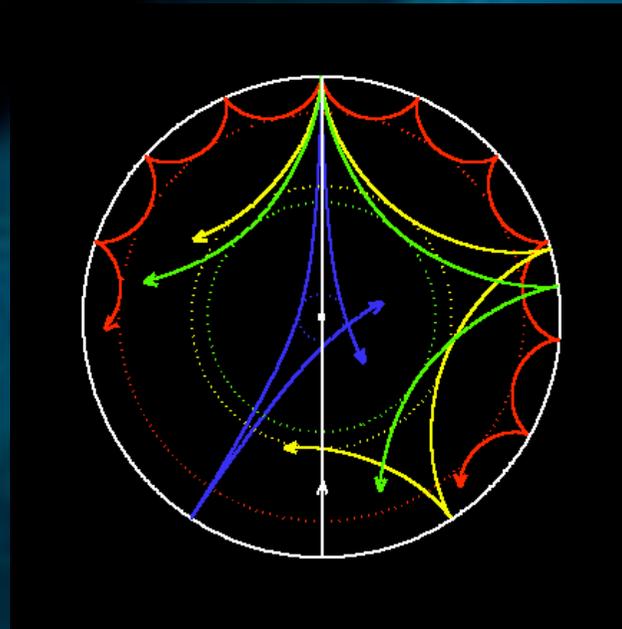
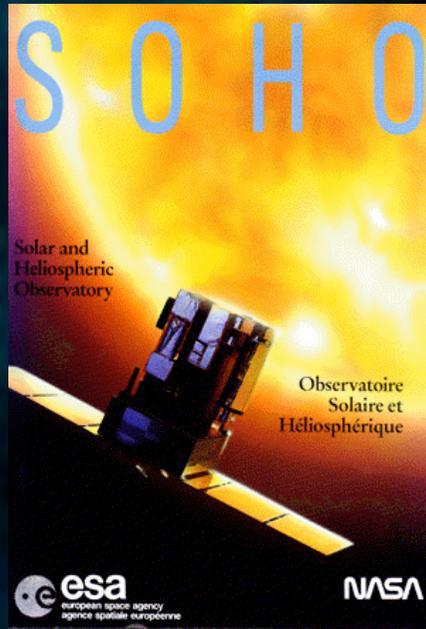
EIT 195 Å  
Dec. 1996



EIT 195 Å  
June 1999



# La surface solaire et son atmosphère oscillent



2 useful seismic instruments:

SOI/MDI and GOLF instruments

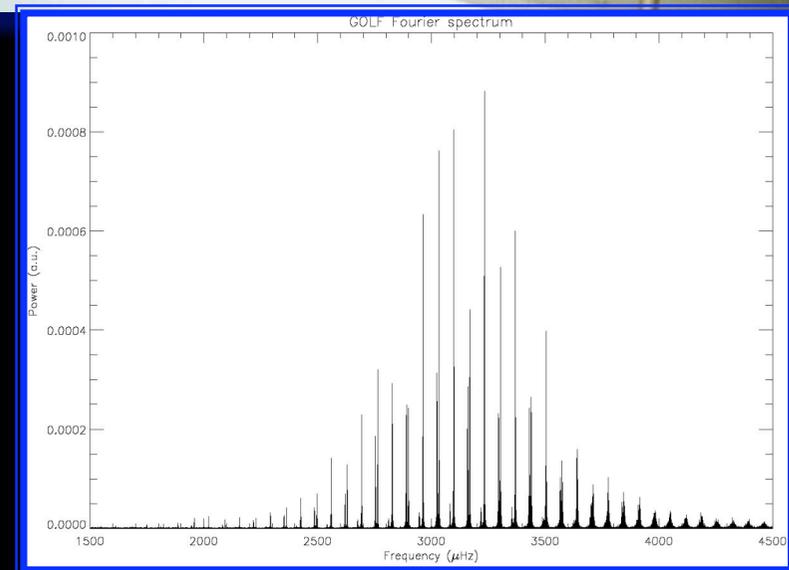
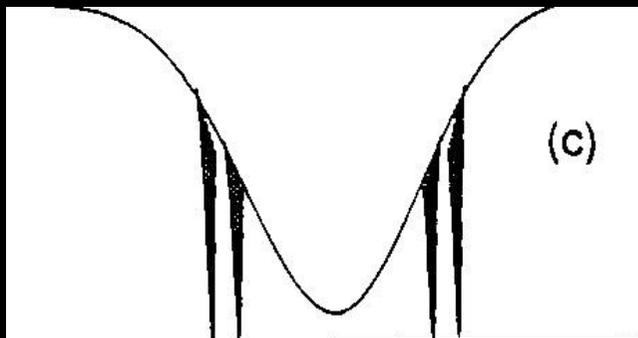
MDI: 1024x1024 points over visible disk

1-minute cadence or better

**One Million of independent modes excited.  
Each mode with a different tone!!**

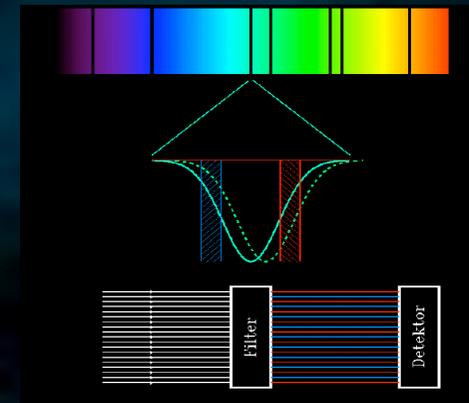
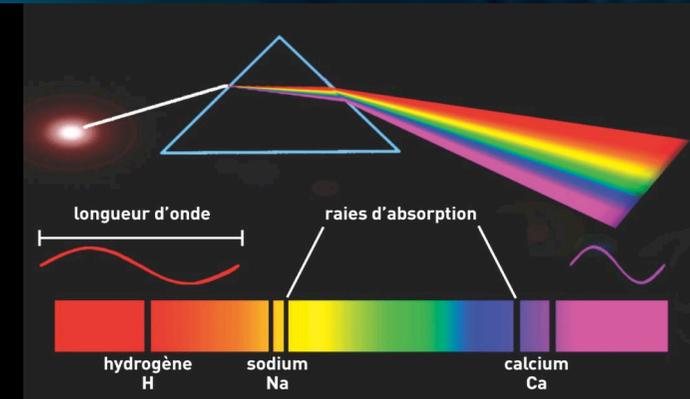
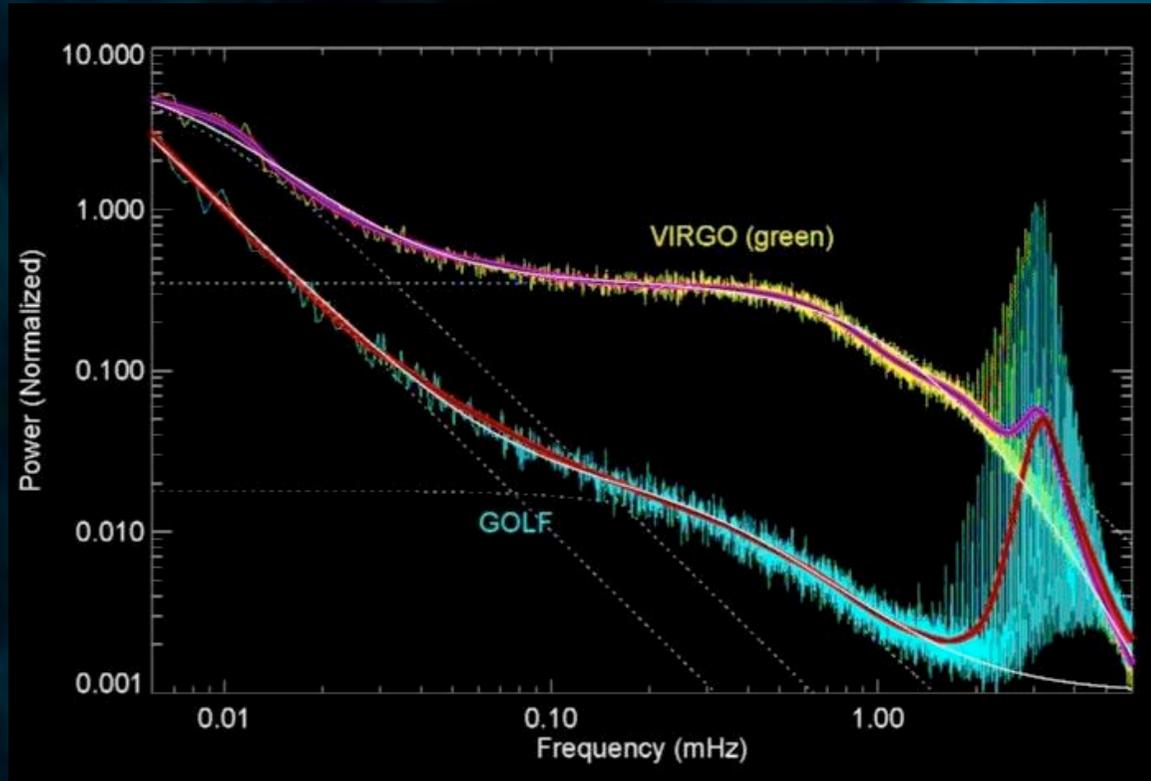
# GOLF: Global Doppler measurements

- detect the most penetrating hundred modes in the sodium line to better describe the solar radiative zone
- estimate the low degree acoustic and gravity mode frequencies for the Sun like a star



# Lesson from SoHO

Doppler velocity is the most promising to detect gravity modes



Factor better than intensity by a factor 10-30 in the range of gravity modes

**But a new instrument is necessary to gain another factor**

# Résultats majeurs

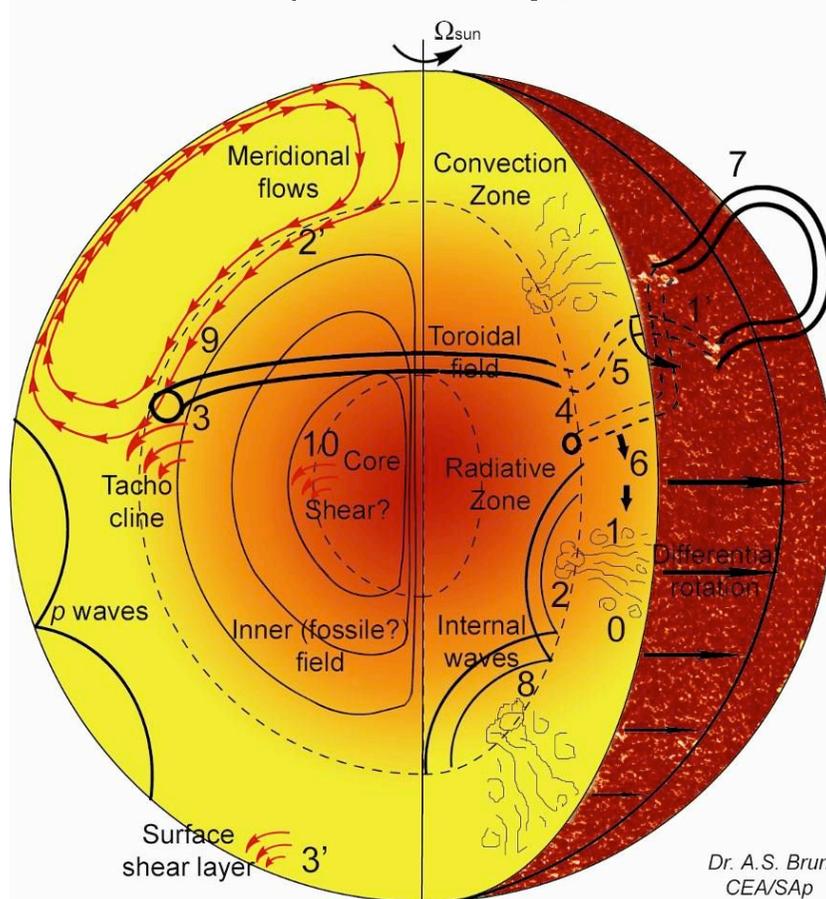
Extraction de la vitesse du son jusqu'au cœur nucléaire: contraintes sur la température centrale et le flux de neutrinos

ApJ 2001

Détection des premiers modes de gravité  
Science 2007

# Une vision 3D du Soleil

## Dynamique du cœur à la couronne solaire



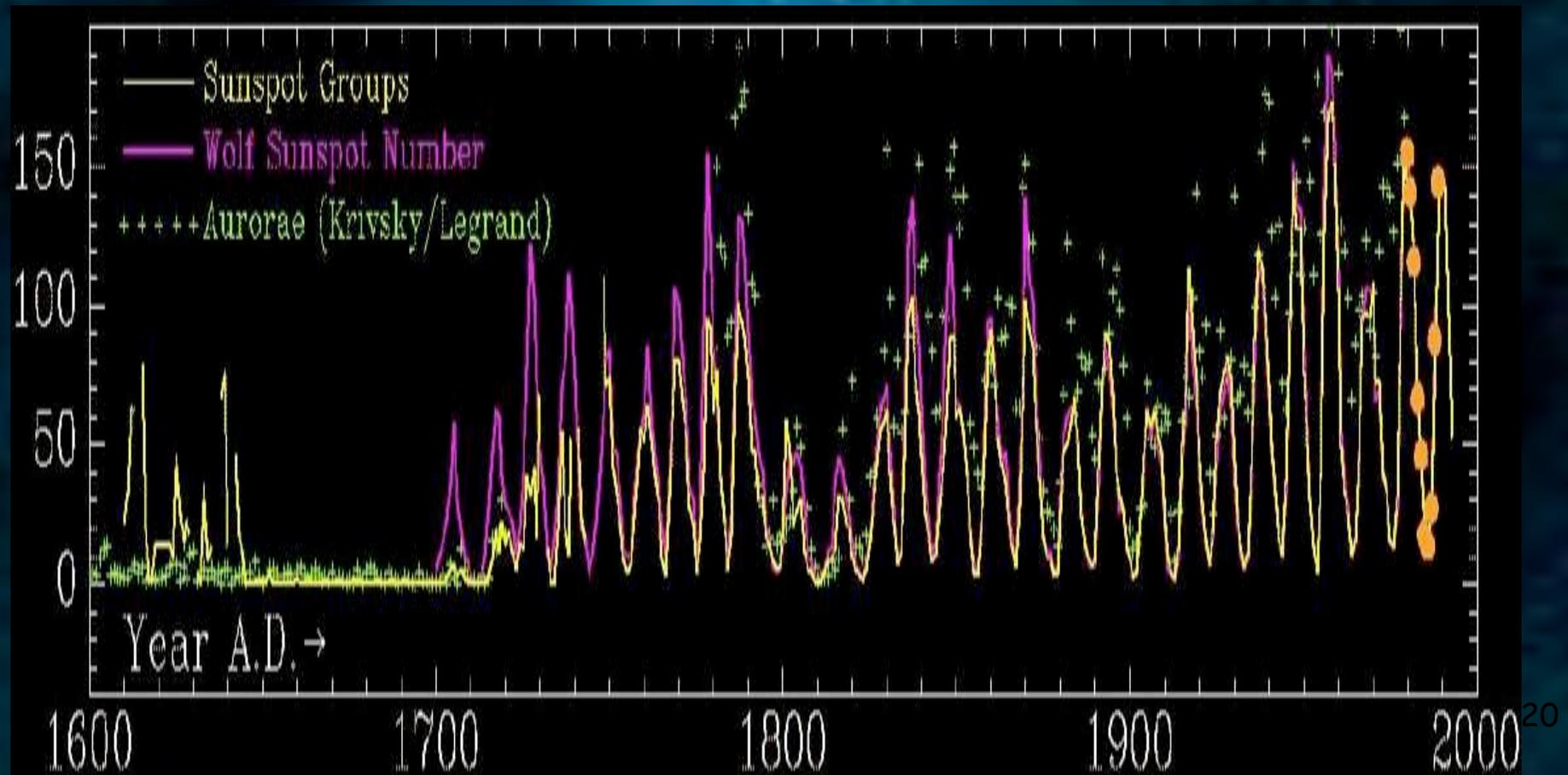
3D Simulations de l'intérieur solaire  
circulation méridienne, tachocline  
effet des ondes de gravité

Comprendre=> observations sismiques  
continues jusqu'au cœur: améliorer  
notre connaissance du profil de rotation  
et apporter des contraintes sur la  
champ magnétique profond.

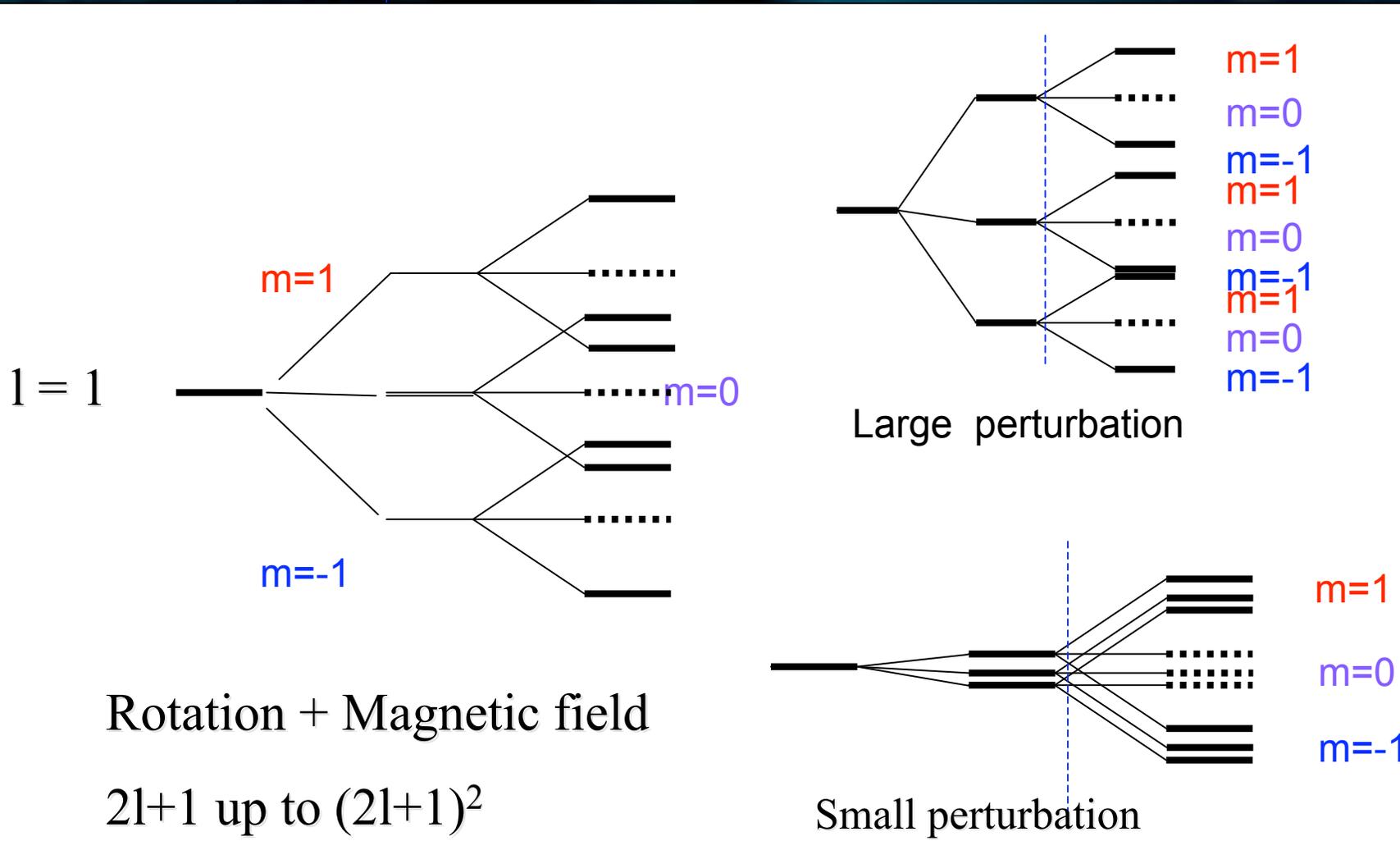
développement d'une nouvelle discipline  
rôle **quantitatif du Soleil** sur le climat de  
la Terre: aujourd'hui largement sous  
estimé

Observations des phénomènes dans la  
région de transition

# Comprendre les différentes sources d'activité solaire



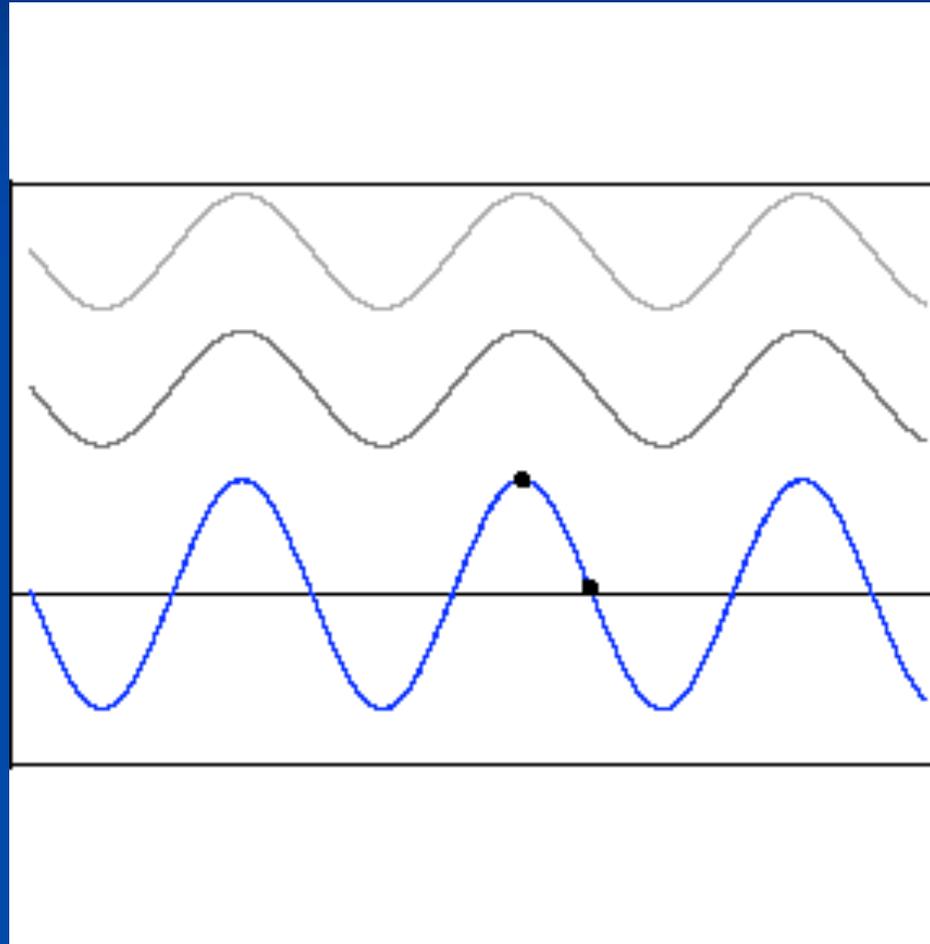
# Mesurer des modes de gravité individuels et toutes leurs composantes sans ambiguïté

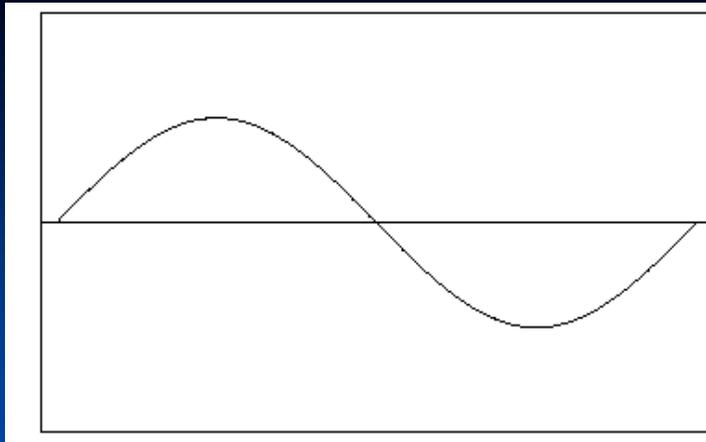


# Ordre de grandeur

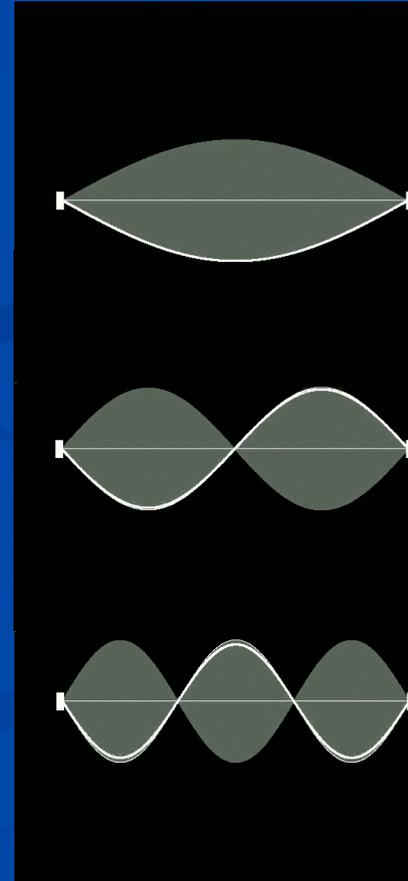
- Air = 343 m/s (20 C)
- Hélium = 965 m/s
- Hydrogène = 1284 m/s
- Eau = 1482 m/s (20 C)
- Granite = 6000 m/s
- Soleil = 500 à 7 km/s

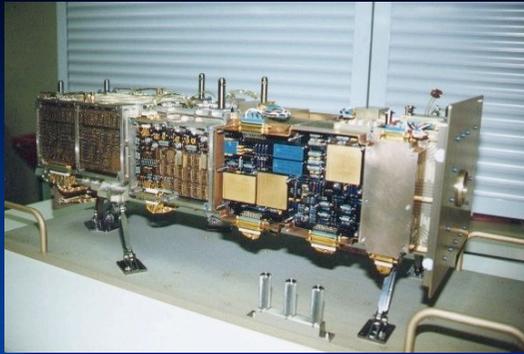
# Interference



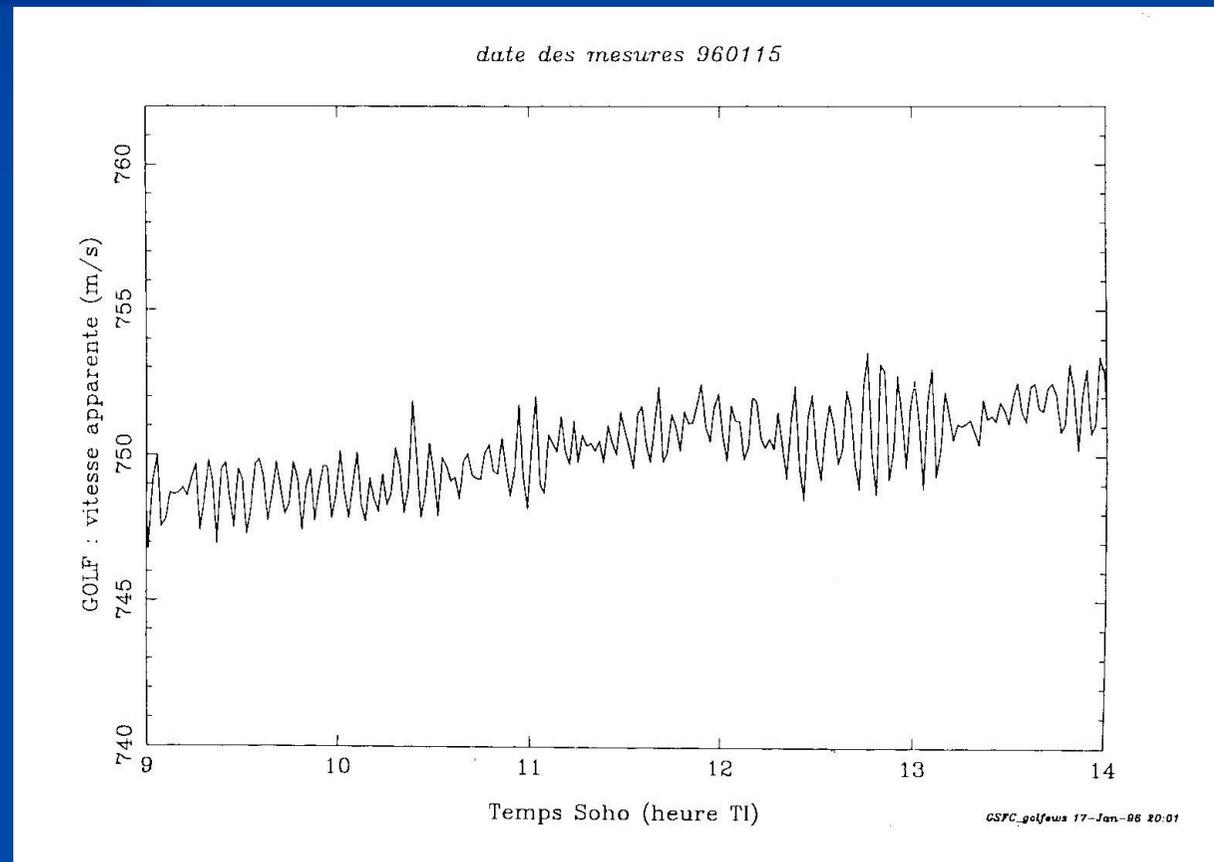


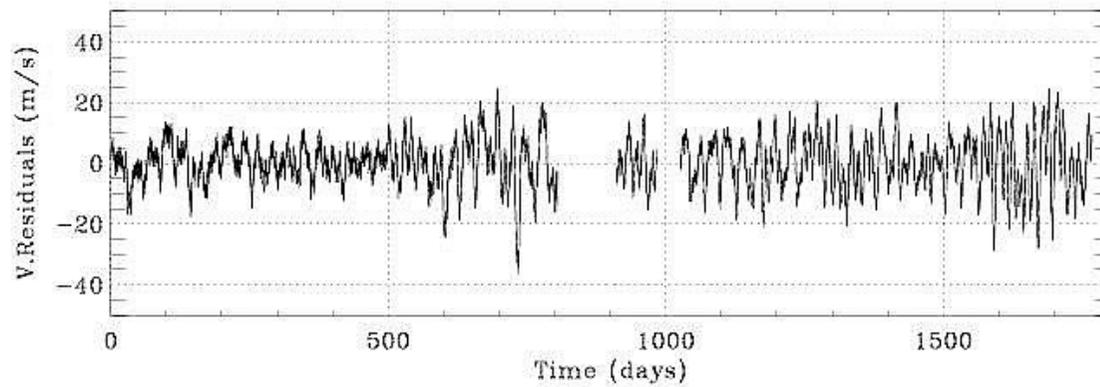
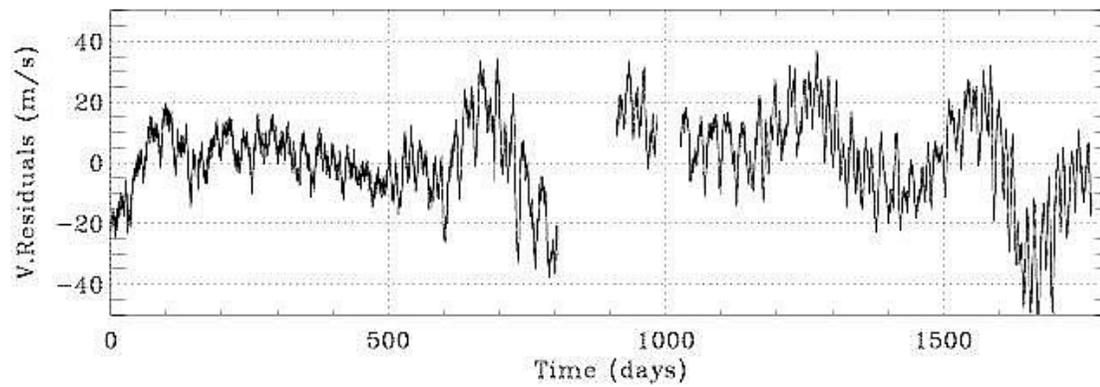
# Harmoniques





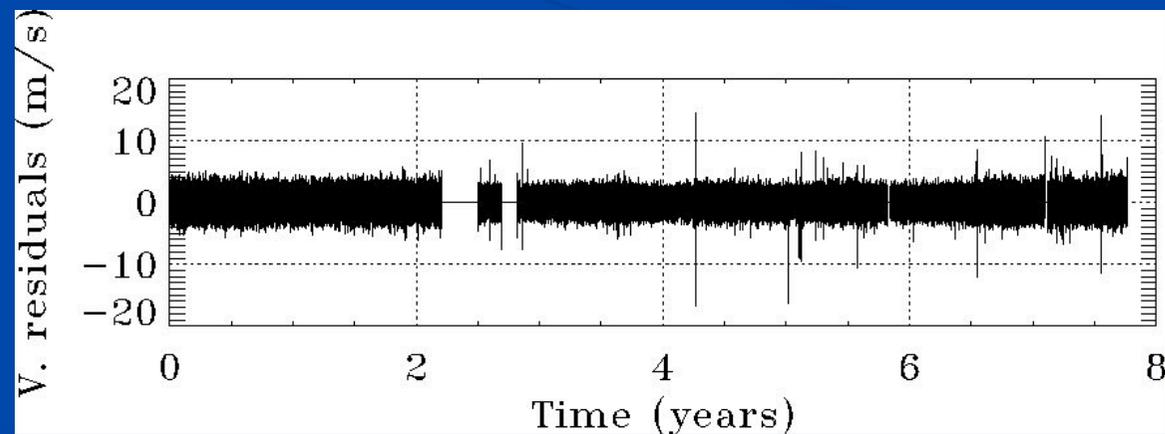
# Mesurer la vitesse Doppler avec l'instrument GOLF

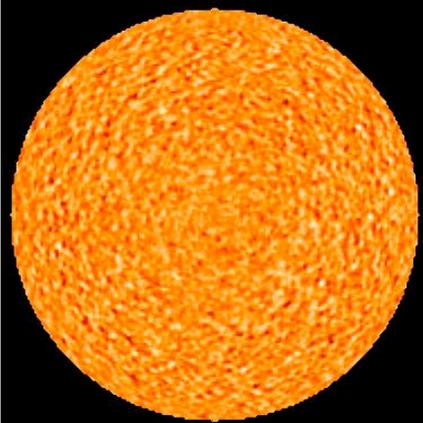




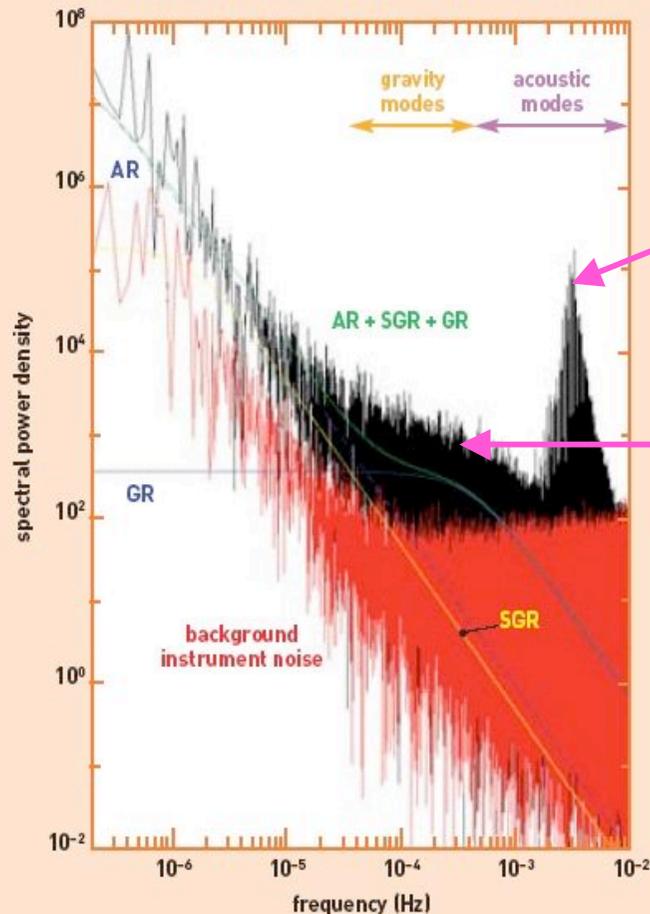
Effets de la  
supergranulation  
et des régions  
actives

Phénomènes  
d'oscillations  
+ bruit instrumental





# Le spectre fréquentiel des modes vu par GOLF et le rôle de la granulation solaire

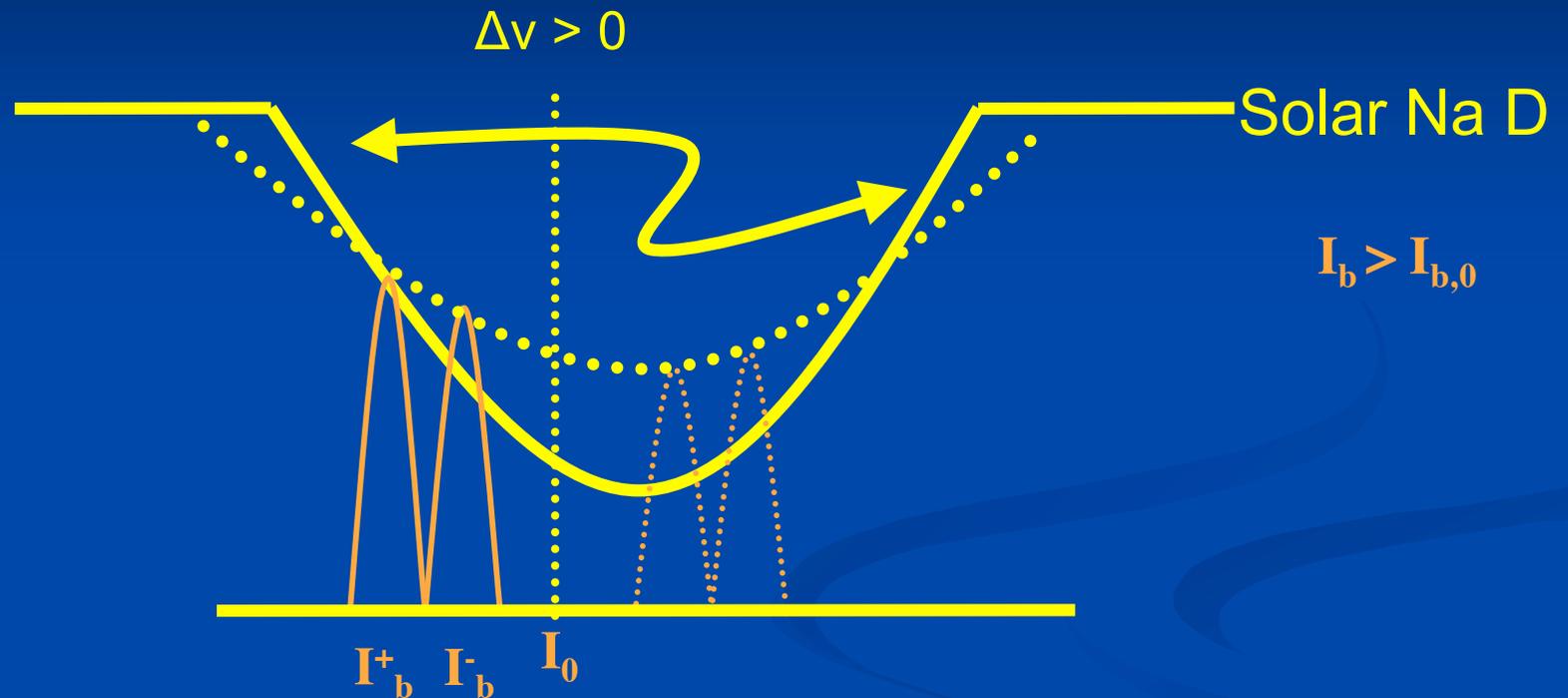


20cm/s

Built to get signal as low as 1 mm/s in 3 weeks below 1 mHz

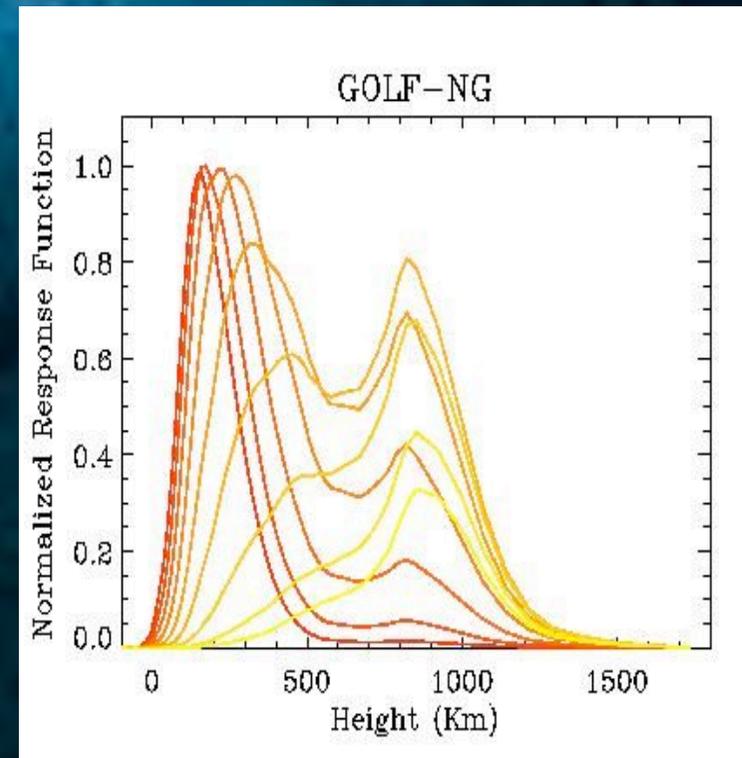
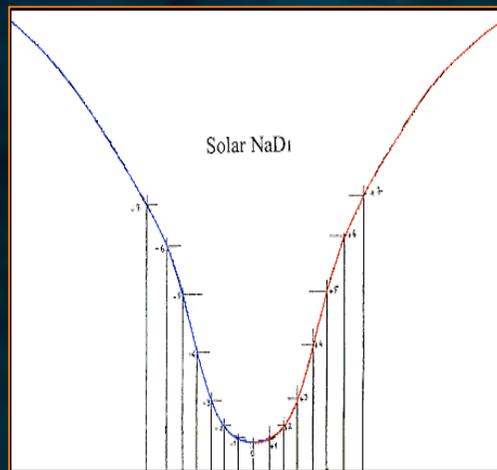
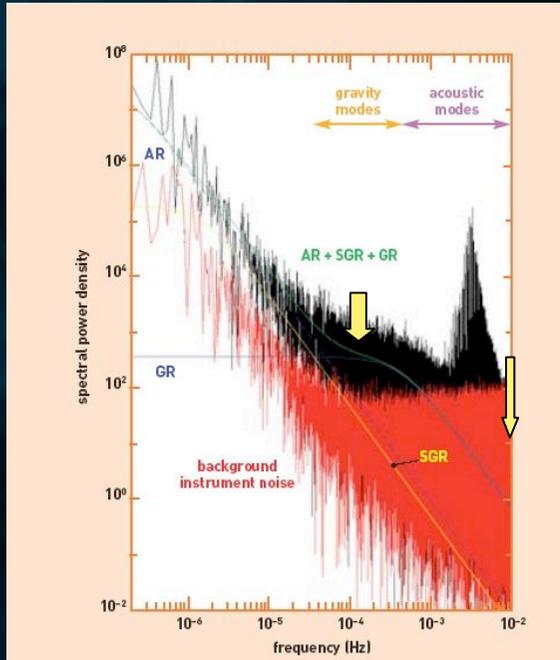
Get this level in several years

# Principe du spectromètre à résonance



Désign original de GOLF => concept de GOLF-NG

# Concept du spectromètre à résonance multicanal



# Le projet GOLF-NG

mesurer la dynamique du cœur nucléaire solaire  
progresser sur la région de transition photosphère -  
chromosphère

- **1998-1999**: phase d'étude, STC: rédaction document spécifications scientifiques
- **2000-2003**: phase 0 faisabilité avec le CNES SAp+ JM Robillot Construction de l'aimant et étude détecteur
- **2004- 2008**: phase I réalisation d'un prototype à l'Irfu  
Avec PH Carton et équipe SEDI, JC Barrière et l'équipe SIS  
et l'équipe de P. Pallé à l'IAC démonstrateur technologique
- **2008-2010**: phase II réalisation d'un prototype scientifique  
stabilité à  $10^{-7}$  0.1mm/s sur 1 km/s

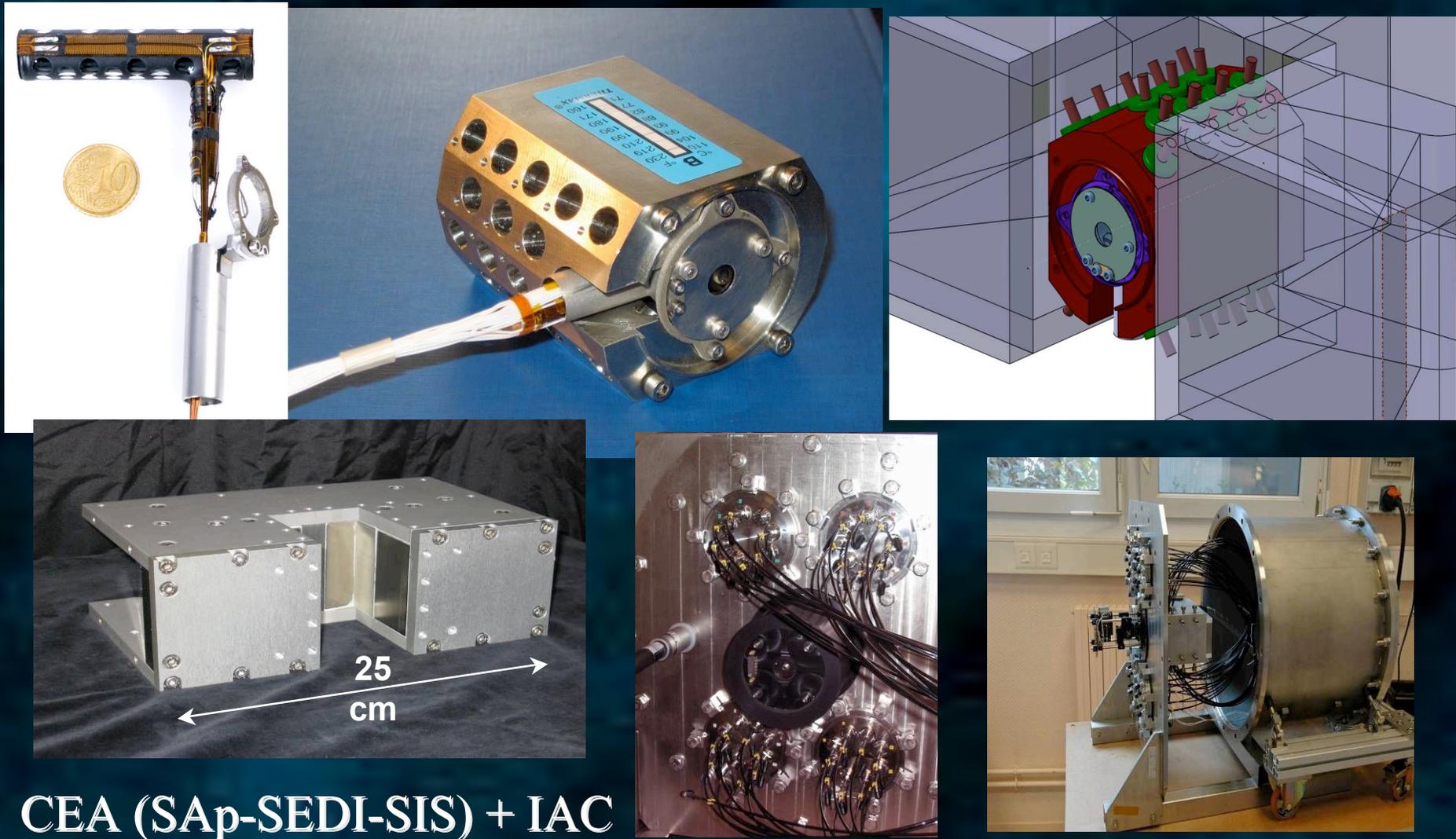
# Objectifs

- Assurer la succession de GOLF/SoHO dans le domaine des modes de gravité **dans l'espace**  
pour **déterminer la dynamique** du cœur solaire
- Réaliser une nouvelle génération d'instrument unique et plus performant :  
Prototype puis modèle de qualification

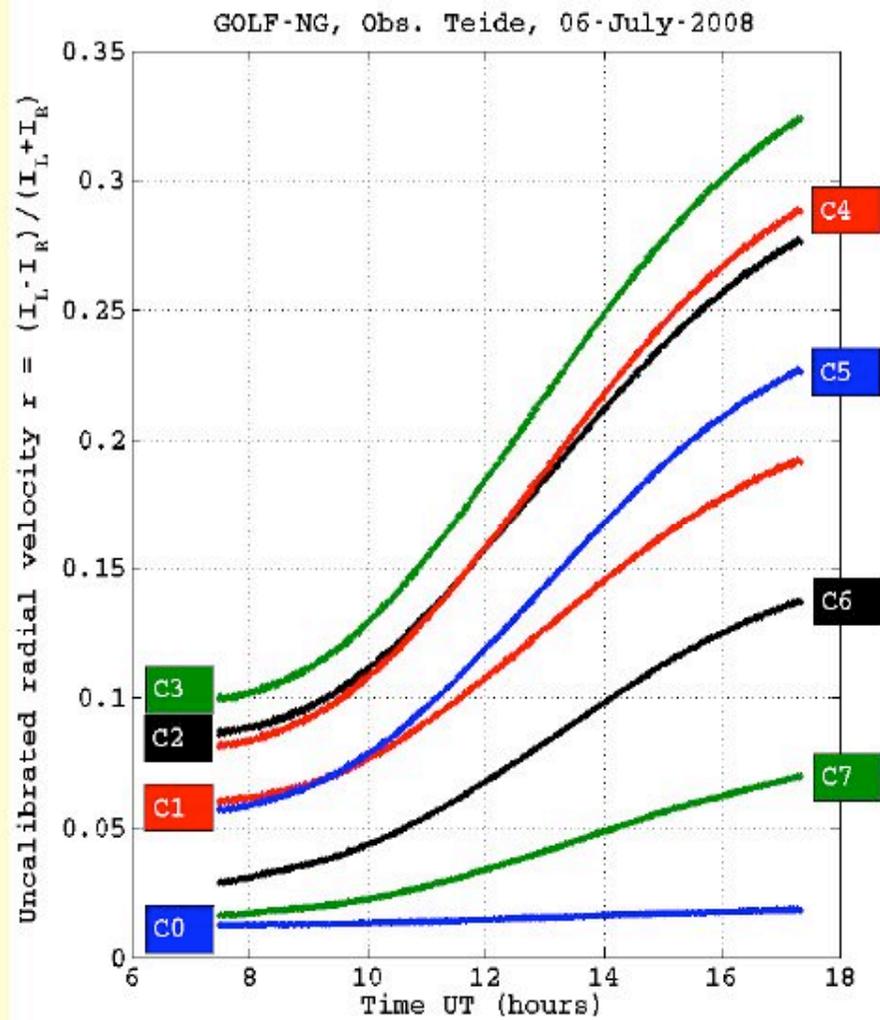
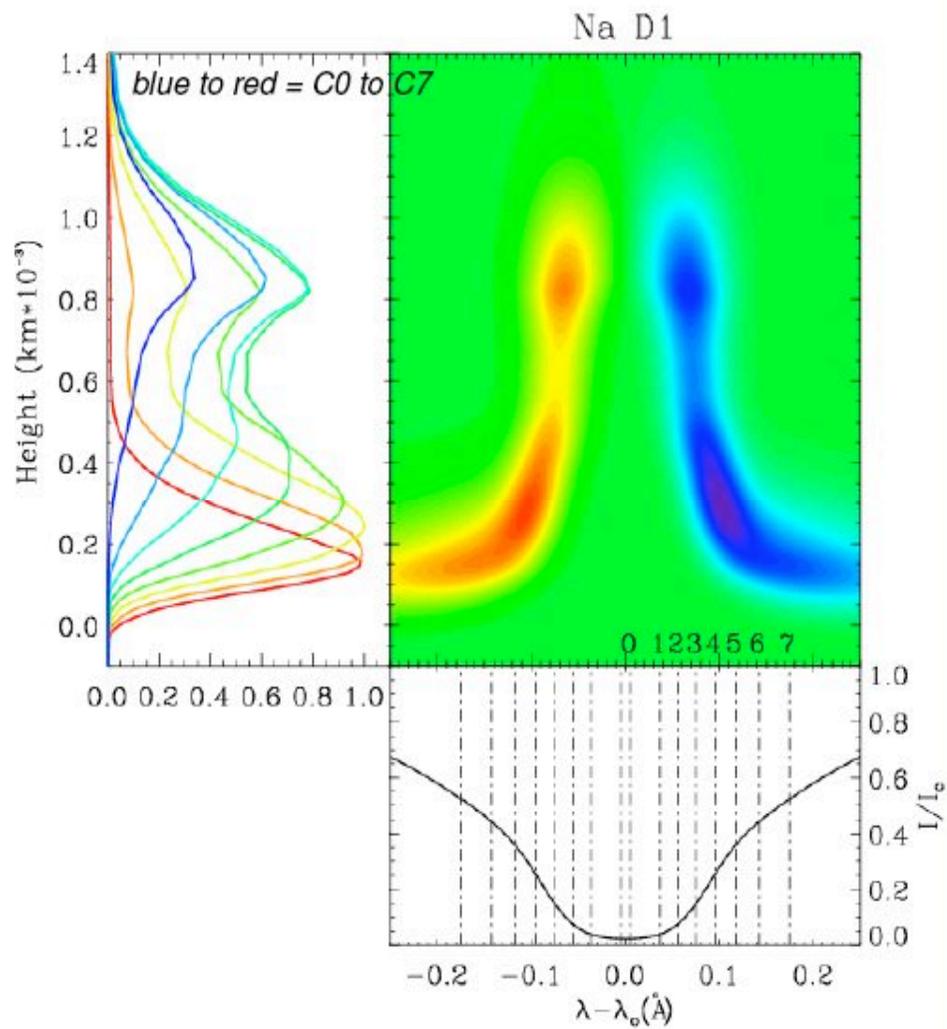
**Apporter des contraintes essentielles sur l'évolution temporelle de la région de transition Photosphère - Chromosphère**

LA GRANDE DIFFICULTE: **stabilité** de l'instrument pour la détection de signaux très faibles et **longévité** observation sur plusieurs cycles solaires

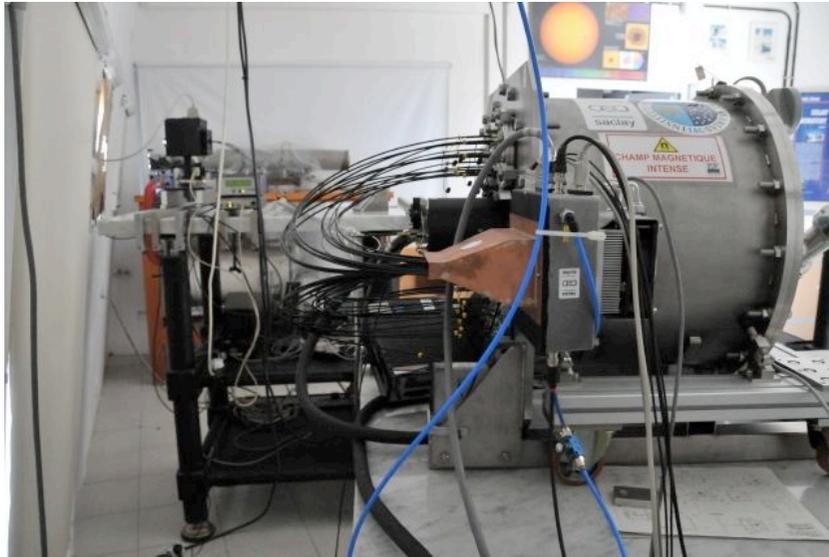
# Phase I: construction d'un prototechnologique



CEA (SAp-SEDI-SIS) + IAC



# Première lumière de **GOLF-NG prototype** spectromètre à résonance multicanal



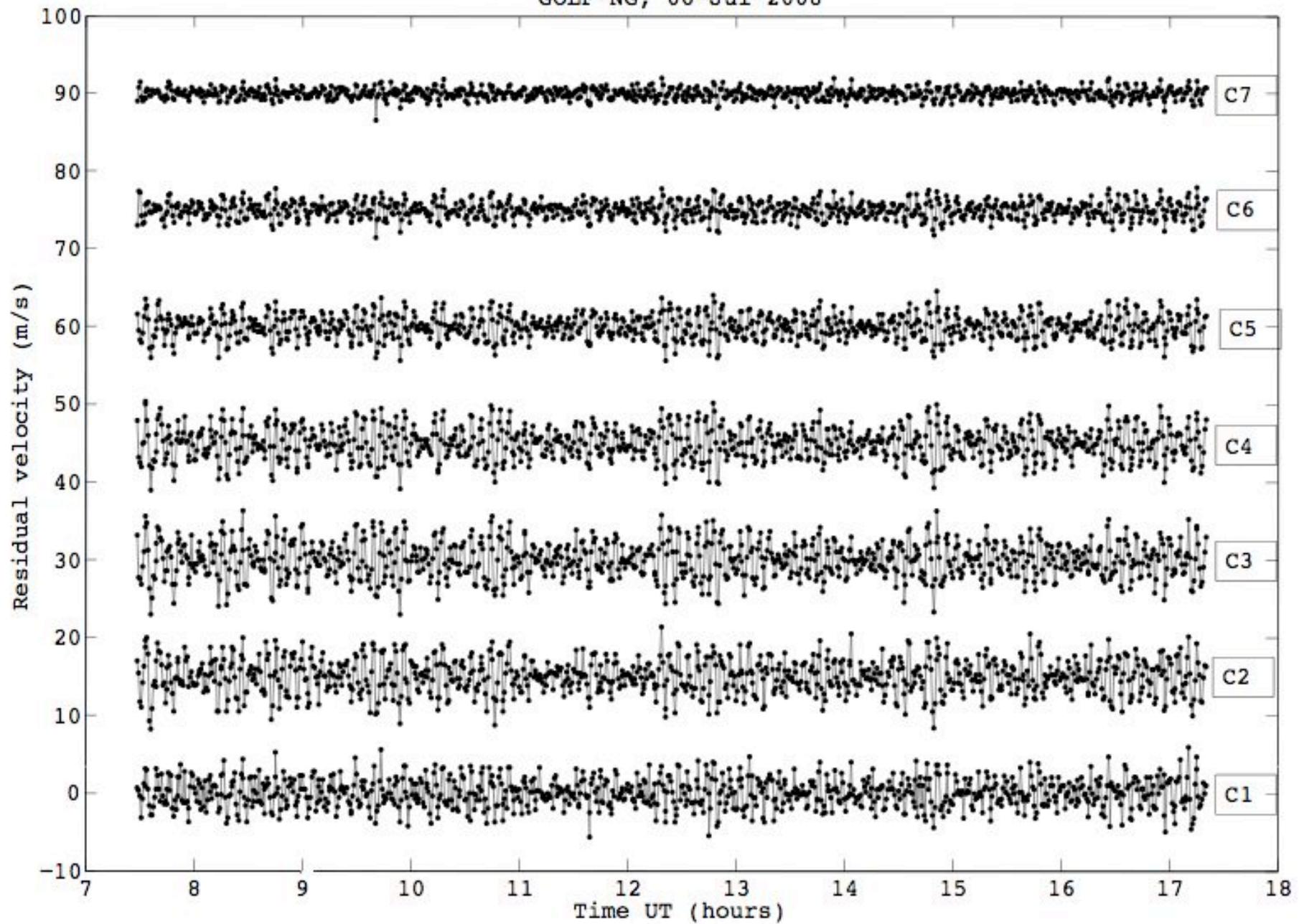
**Construction** IRFU/CEA + contribution IAC

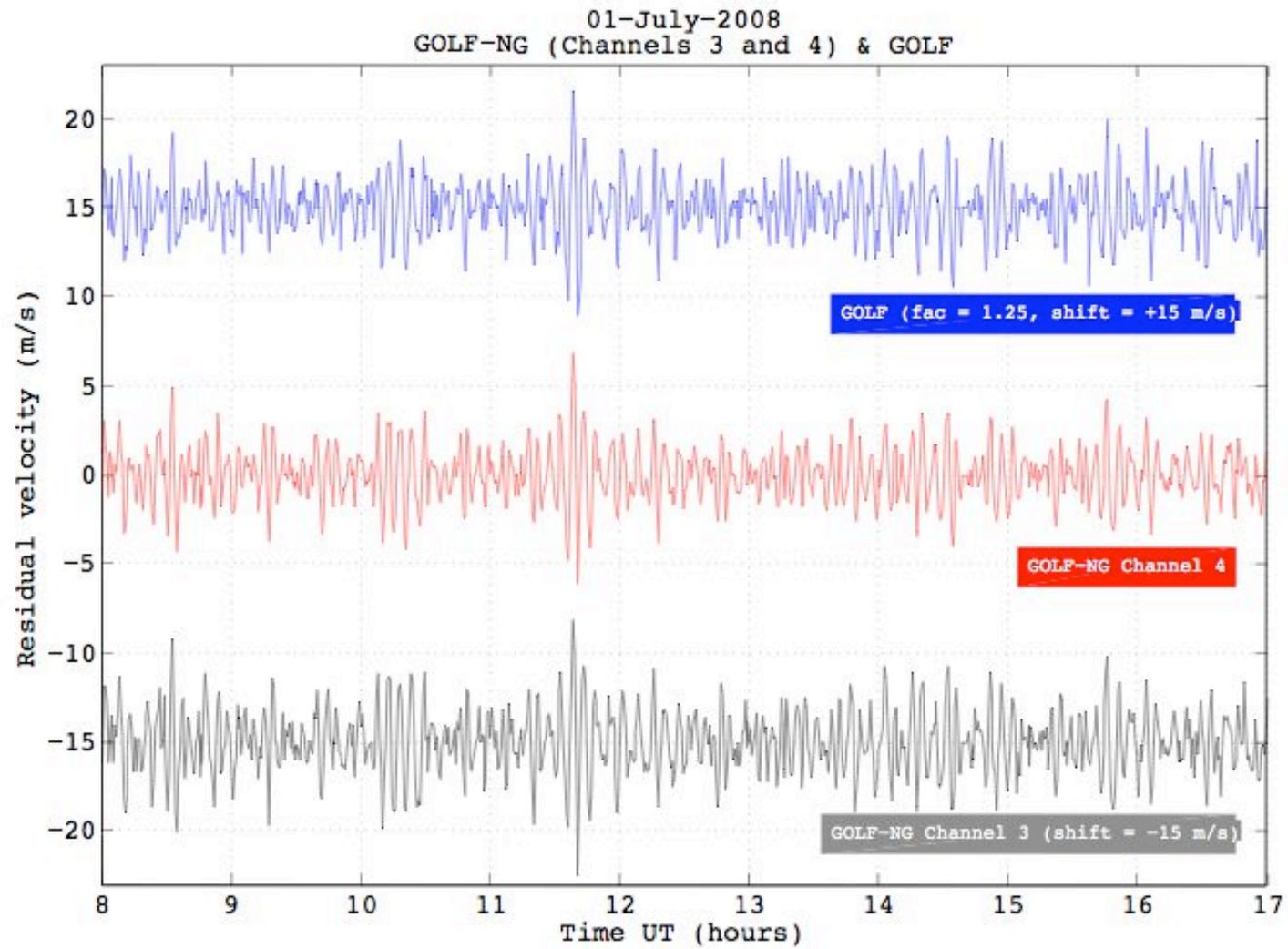
*Sylvaine Turck-Chièze, IRFU Septembre 2008*

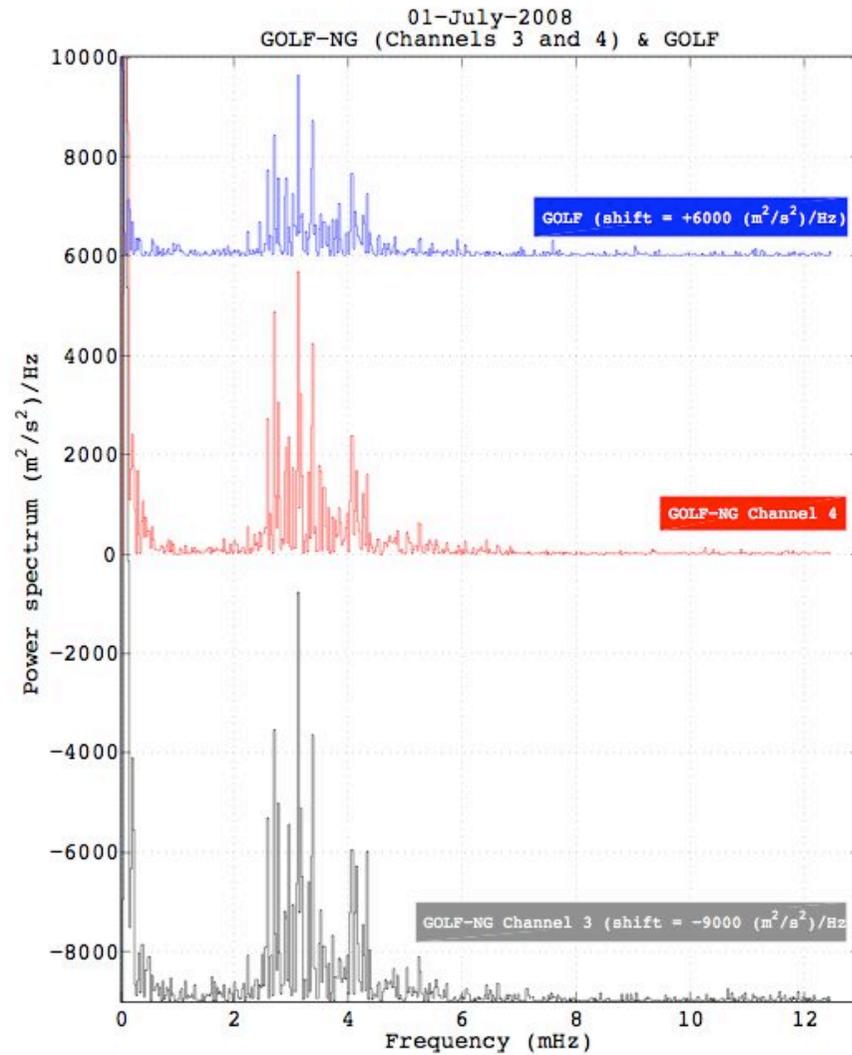


*Sylvaine Turck-Chièze, IRFU Septembre 2008*

GOLF-NG, 06-Jul-2008







# Bilan Phase I

- Objectif atteint: nous savons mesurer à différentes hauteurs dans l'atmosphère solaire !!!
- Stabilité raisonnable pendant 3 mois

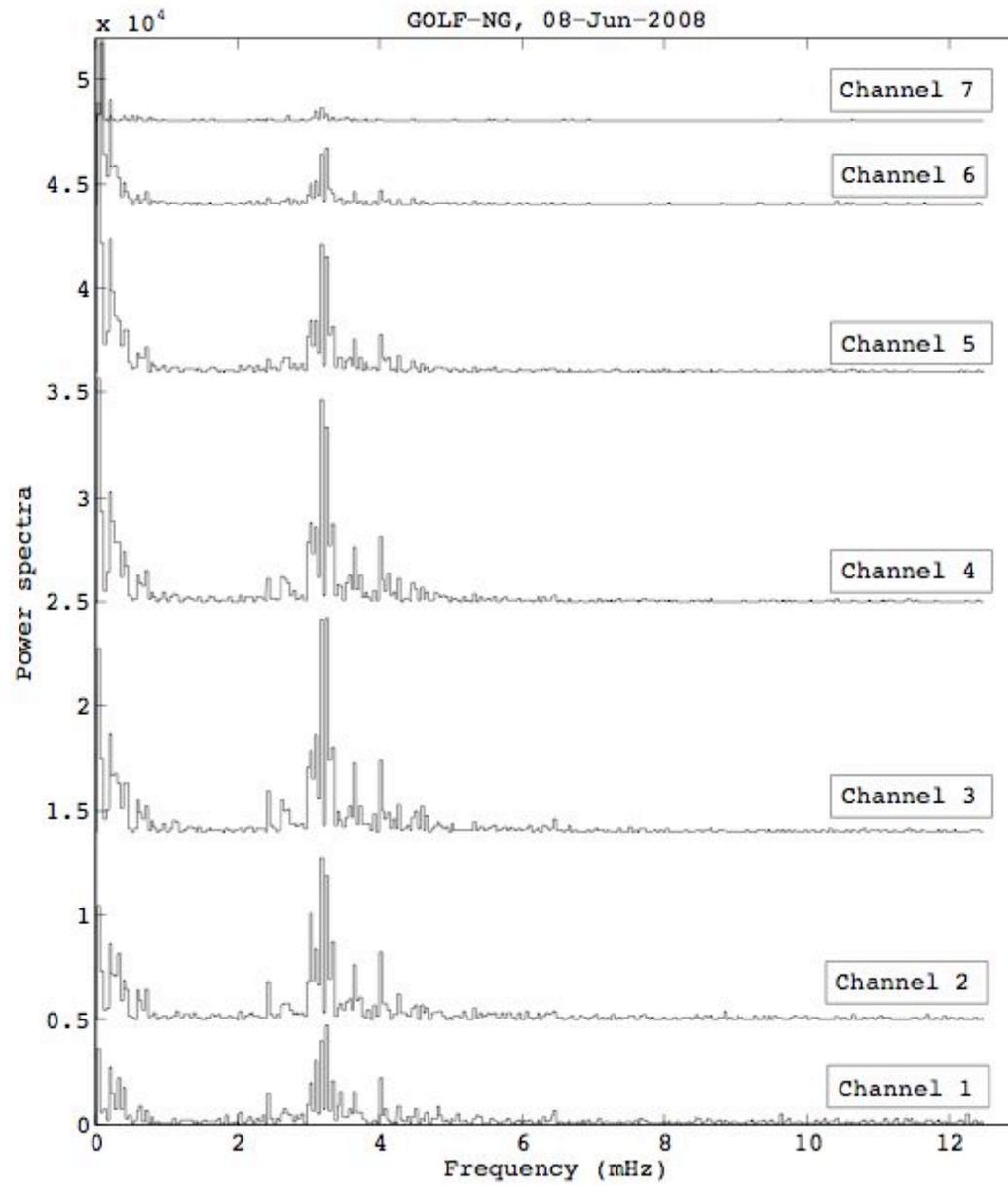
Mais chute du comptage d'un facteur 2 à 3 pendant la première semaine: dégazage (vérification fin du mois), attaque du sodium sur le pyrex

Réflexions sur les fenêtres entrée et sortie à réduire

Piège à lumière dans l'entrefer de l'aimant

Extension de la plage d'observation

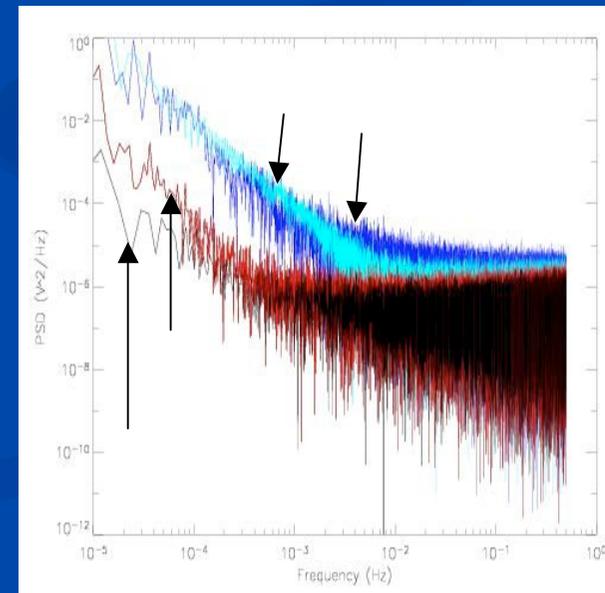
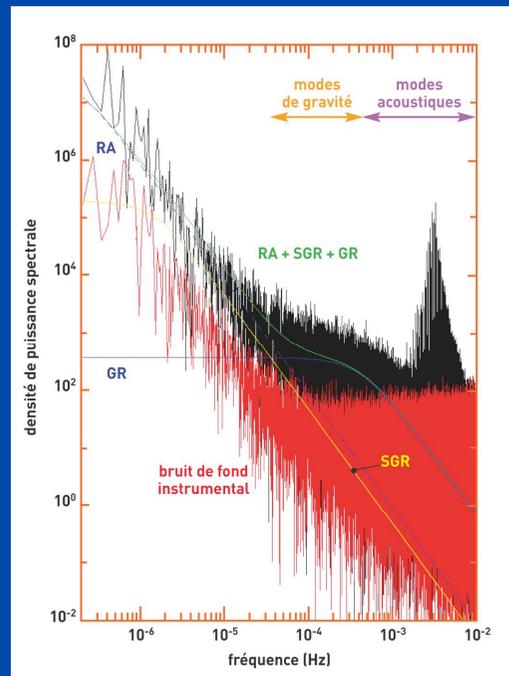
Progresser sur les performances du détecteur (hors spécifications)



# Phase II: instrument complet

- Détecteur doit être dominé par le bruit statistique

Entre quelques  $10^6$  et qq  $10^8$  ph/s avec une remontée à basse fréquence en dessous de  $10^{-4}$  Hz

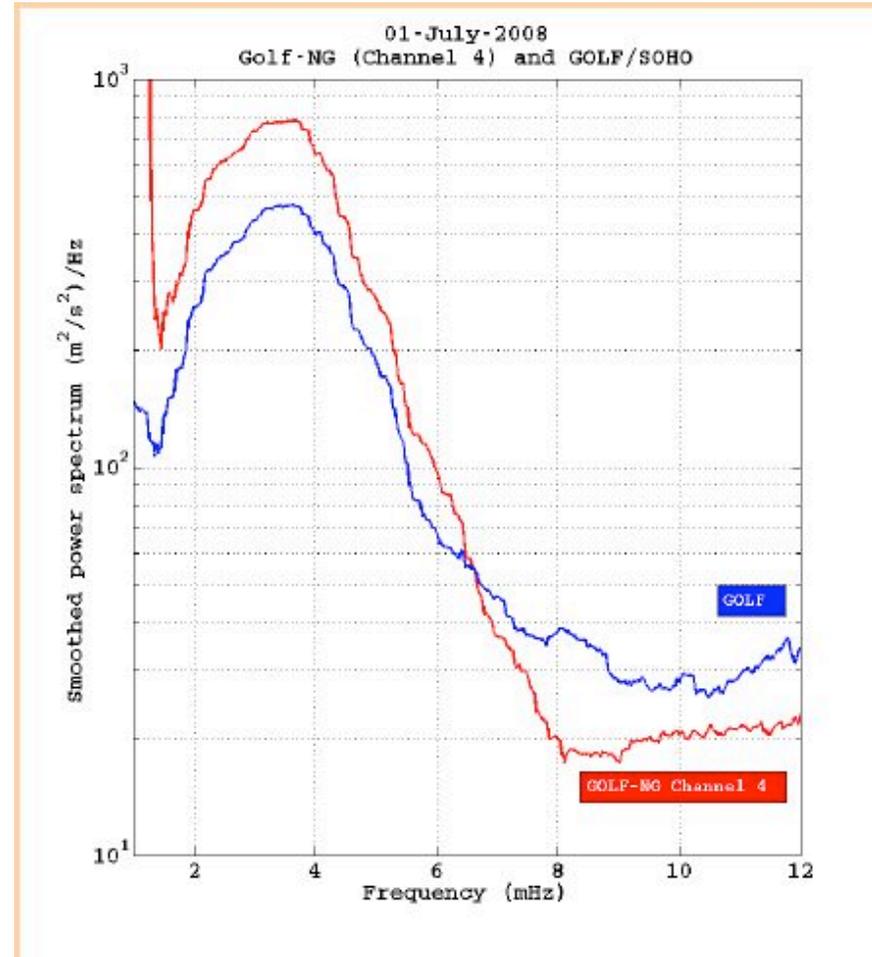


**Deuxième condition:** Nous devons observer continûment pour exploiter les basses fréquences région d'intérêt scientifique

Réseaux sol ont échoué jusqu'ici

Nuages, instabilités...

Turbulence



Beautiful place



Pleasant to stay

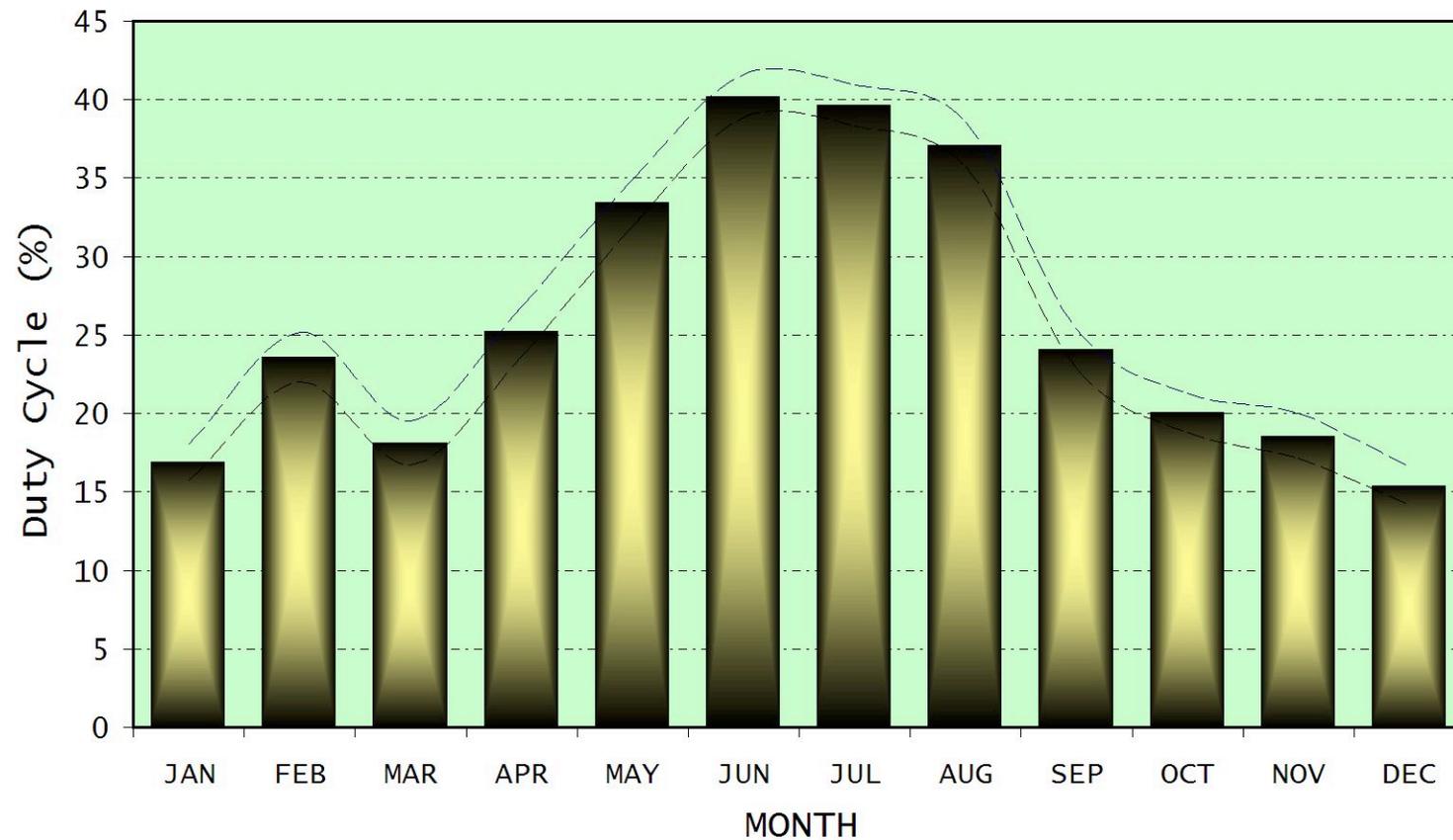


But, the weather is not always good



For the summer campaign, about 34% duty cycle, we need 95% duty cycle for several days to get the final performances and explore the physics of the low frequency range to qualify the method and quantify the solar « granulation at different heights »

**MONTHLY STATISTICS OF THE OBSERVATIONS GATHERED  
WITH "MARK-I" SOLAR SPECTROPHOTOMETER  
OBSERVATORIO DEL TEIDE. 1983-2003**



# Instrument au Dome C 2009-2010 avec 2 semaines de mesures continues : qualification des performances scientifiques

Tous les nouveaux instruments d'héliosismologie ont été qualifiés au Pôle Sud

Important d'obtenir des données scientifiques tant que GOLF est en fonctionnement



Conditions thermiques proches spatiales

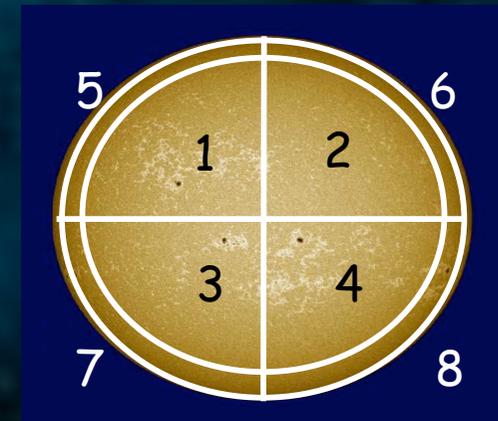
T entre  $-35-50^{\circ}\text{C}$

Effort SIS-SAp

# Troisième condition: enrichir l'instrument

- Masque d'entrée pour travailler sur la non cohérence de la granulation

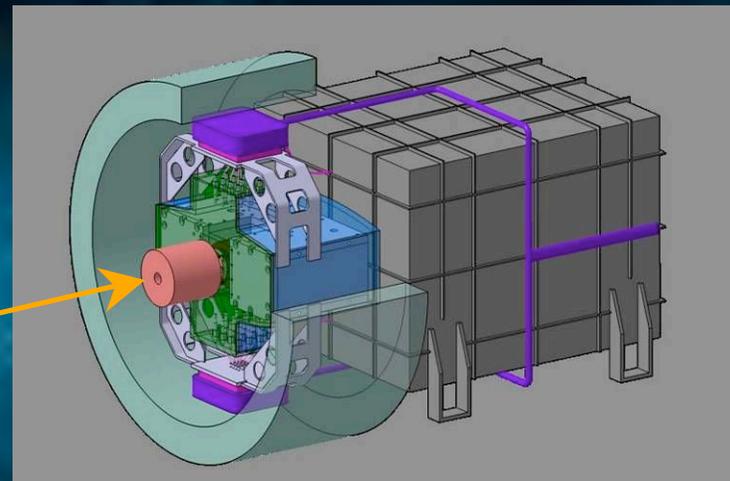
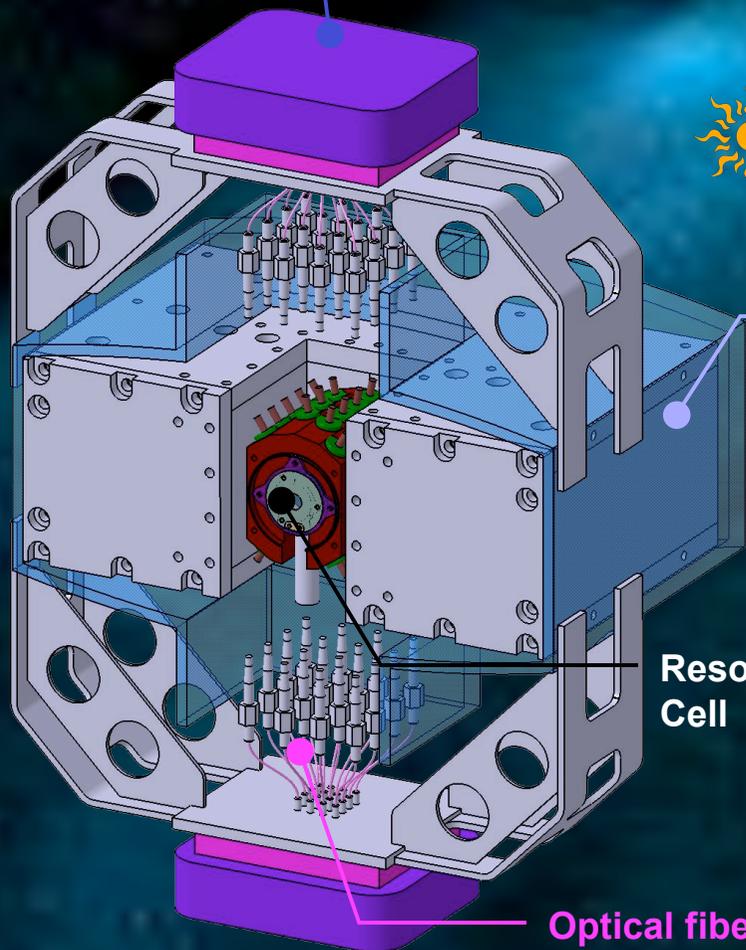
- Mesure Champ magnétique



- Filtre continuum pour suivi d'irradiance
- Le miniaturiser et optimiser pour le Dome C

## Possible Space design of GOLFNG

CCD & Coldplate



Permanent magnet

We will build a compact scientific instrument prepared for future space missions: a qualification model

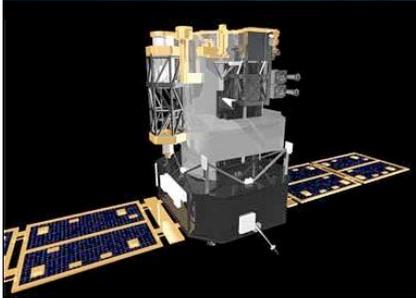
The instrument must be ready mean 2009

Resonant Cell

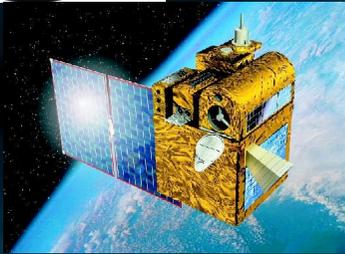
Optical fiber

# Les missions spatiales...

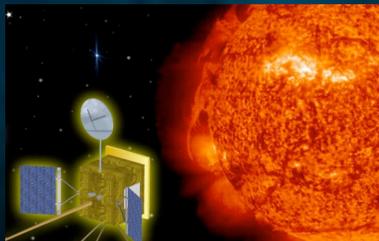
SOHO up to 2012 !!!!



**SDO** Solar Dynamics Observatory, HMI (local helioseismology) NASA launch: 2009 to understand variation of magnetic fields in the convective zone and its impact on Earth



**PICARD** CNES Launch: 2009 SODISM (low l and g modes) to study of the Earth climate and Sun variability relationship



**Solar Orbiter** sélectionnée en 1998 ESA

Launch: 2017 ? (local helioseismology at high latitude) to study, by approaching as close as 45 solar radii, the polar regions and the side of the Sun not visible from Earth

**DYNAMICCS/HIRISE** Dynamics and Magnetism from the Internal core to the Corona of the Sun, ESA Cosmic Vision + de 30 institutes

# DynaMICCS: A mission for a complete and continuous view of the Sun dedicated to magnetism, space weather and space climate



# Résumé

- SoHO a été un véritable succès
- GOLF a permis de démontrer qu'il est possible d'accéder aux modes de gravité
- L'activité plasma solaire et stellaire dynamique s'implante au SAp à travers des activités complémentaires
- Le prototype technologique a permis de démontrer la faisabilité du concept spectromètre à résonance multicanal
- Nous devons maintenant faire un instrument conforme au cahier des charges (détecteur, amélioration pts critiques, masque, optique d'entrée, aimant) et démarrer les activités scientifiques Ténérife et Dôme C
- Ne pas s'attarder sur le proto
- Observer en même temps que SoHo et SDO

• Merci à tous