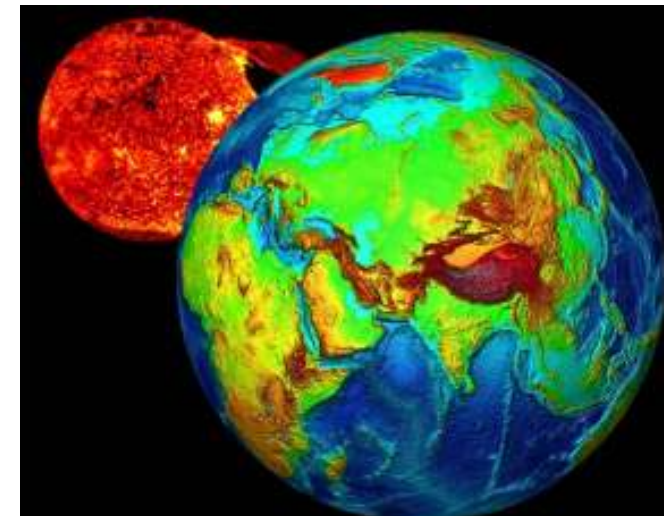


Fonctionnement du Soleil, origine des variabilités ?

Héliosismologie, Neutrinos, Magnétisme,
Développement des grands calculateurs

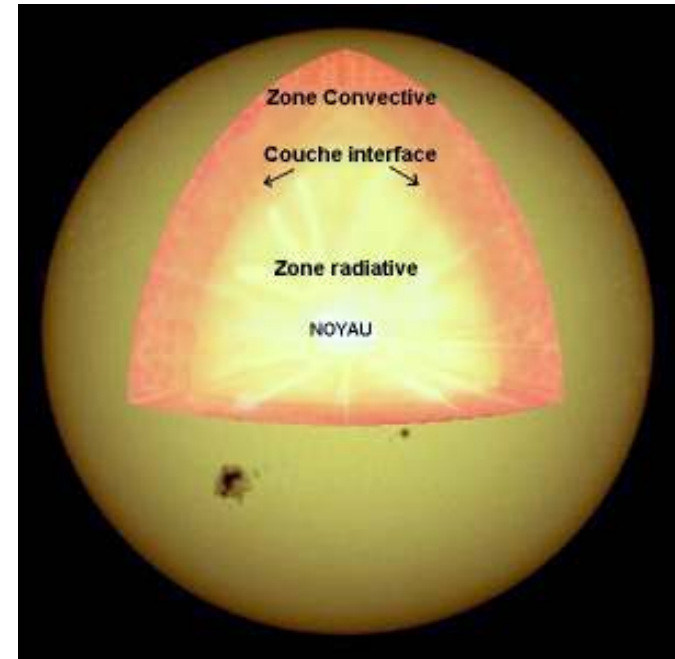


- Le modèle standard du Soleil
- Le Soleil est une étoile magnétique
- Les éléments essentiels à établir et comment y parvenir

Influence climatique du Soleil sur la Terre ? Compréhension - prédictions



Hans Bethe
1906-2005 Prix Nobel 1967



Equilibrage des forces

rôle des réactions nucléaires

les équations de structure de l'évolution stellaire

Equations de structure stellaire

Equations du modèle standard du Soleil

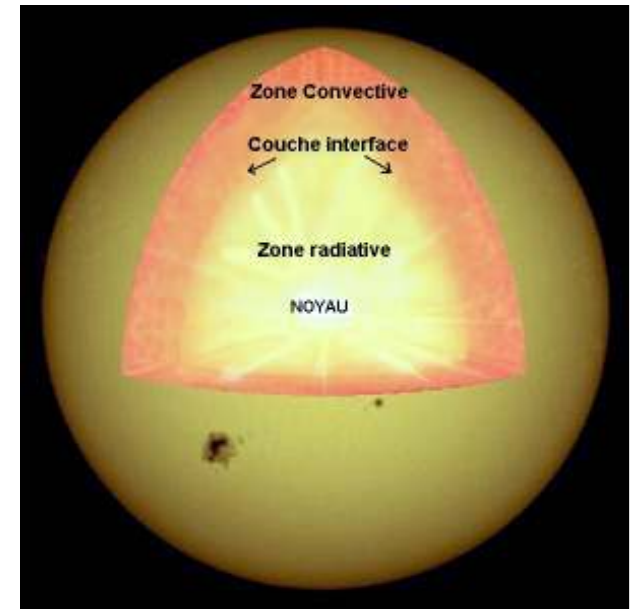
1) $dP/dr = - [M(r) G/r^2] r$ équilibre hydrostatique

2) $dL/dr = 4\pi r^2 r (\epsilon_{\text{nucl}} - T dS/dt)$ production énergie

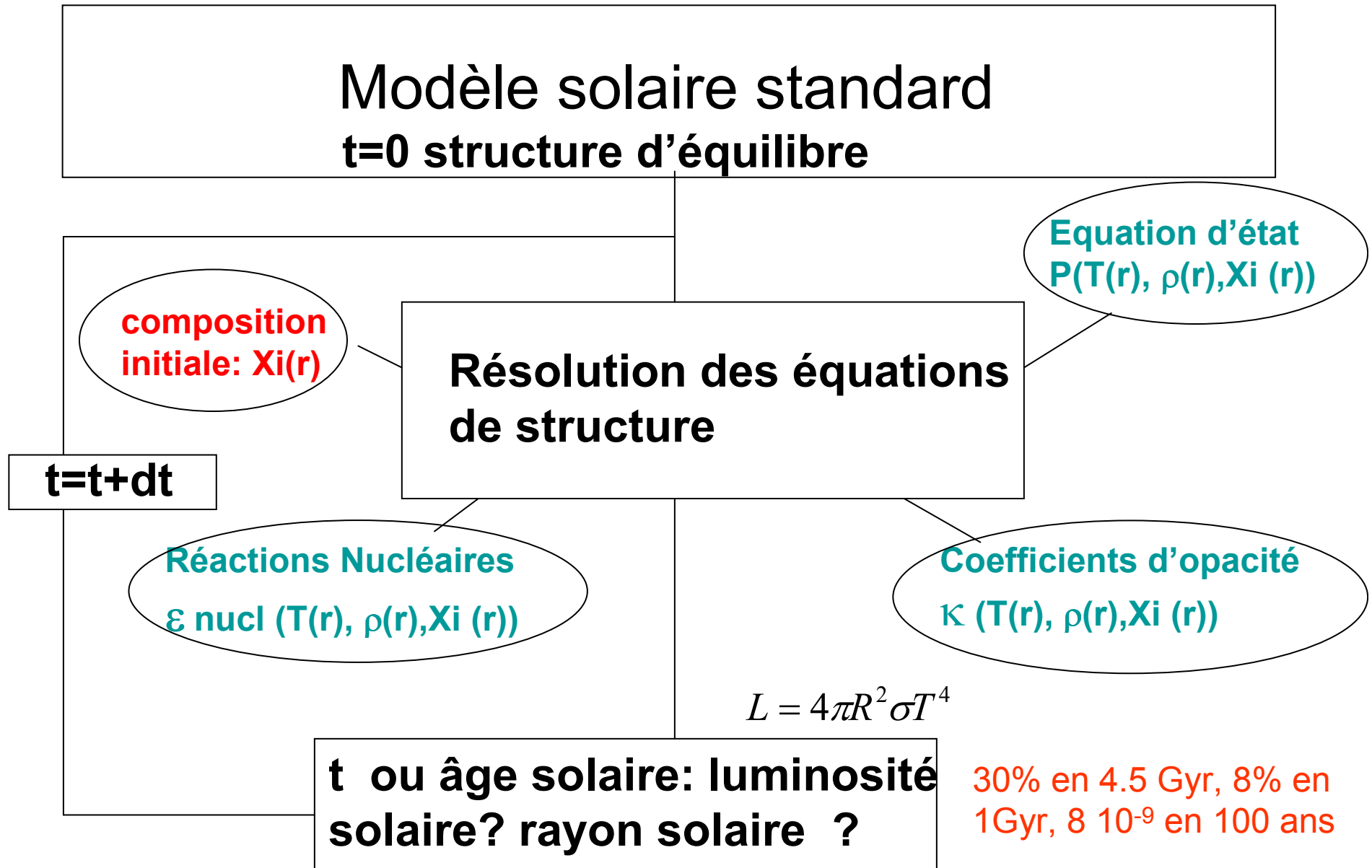
3) $dT/dr = - 3/4ac [\kappa\rho / T^3] [L(r)/ 4\pi r^2]$ zone radiative
 $dT/dr = [\Gamma_2 - 1/\Gamma_2] T/P dP/dr$ zone convective
 où Γ_2 est donné par $dP/P = \Gamma_2/(1-\Gamma_2) dT/T = 0$

4) $\partial X_i/\partial t = \text{nucl. terms} - \partial(4\pi\rho r^2 X_i V_i)/\partial m$
 $V_i = - 4\pi\rho r^2 (D_i + D_T) \partial \ln X_i/\partial m + v_i$

• $dM/dr = 4\pi r^2 \rho$ conservation de la masse



Pas de connection entre physique de l'intérieur et de l'extérieur

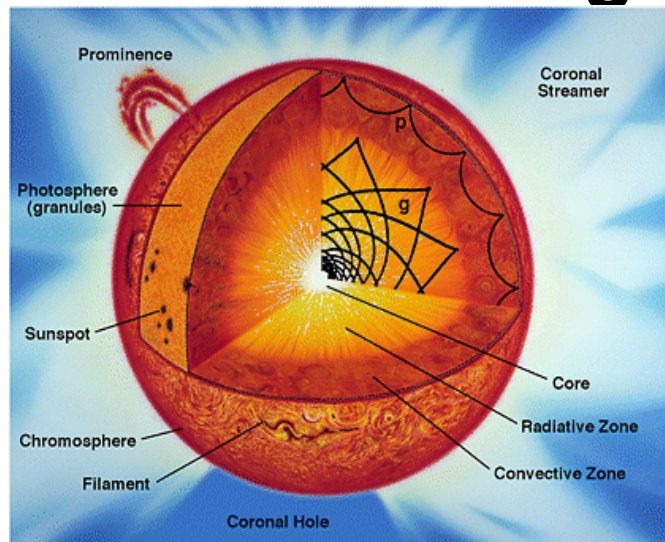


Le tournant des années 1970- 1990

Deux sondes sont bien maîtrisées et simultanément accessibles

Les neutrinos solaires

L'héliosismologie





Leighton 1919-1997

Mouvements périodiques de 5 mn dans les raies d'absorption du spectre photosphérique (1962)

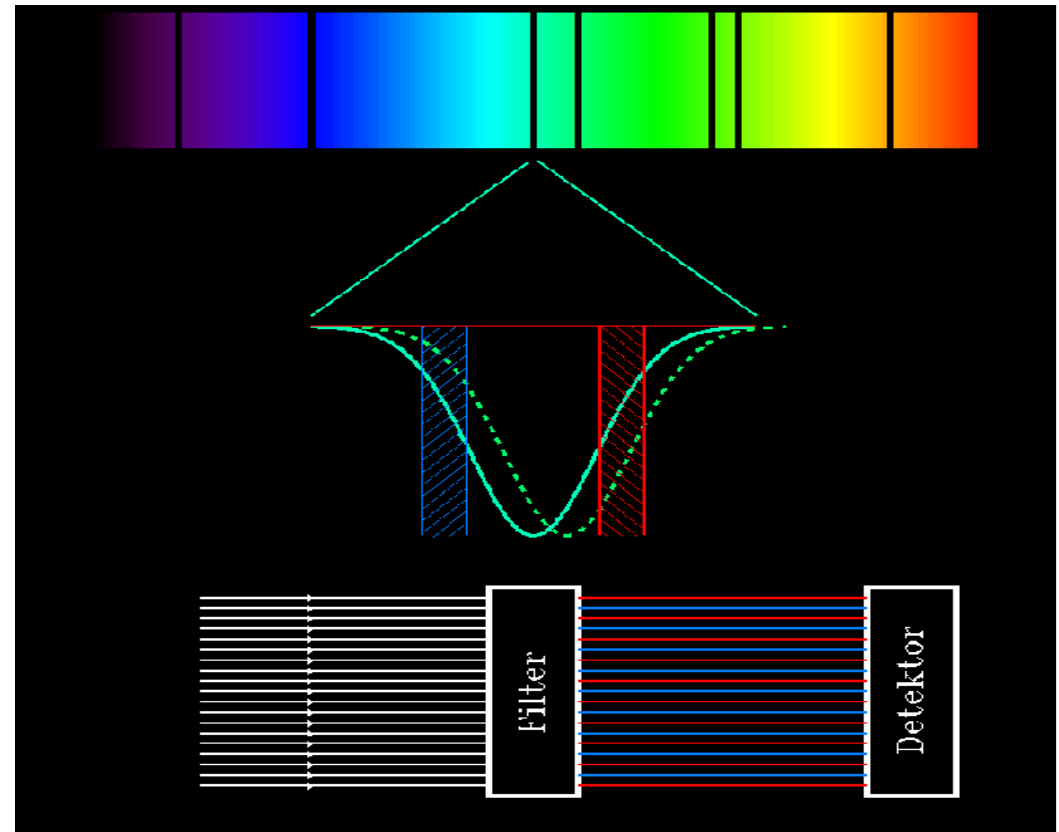
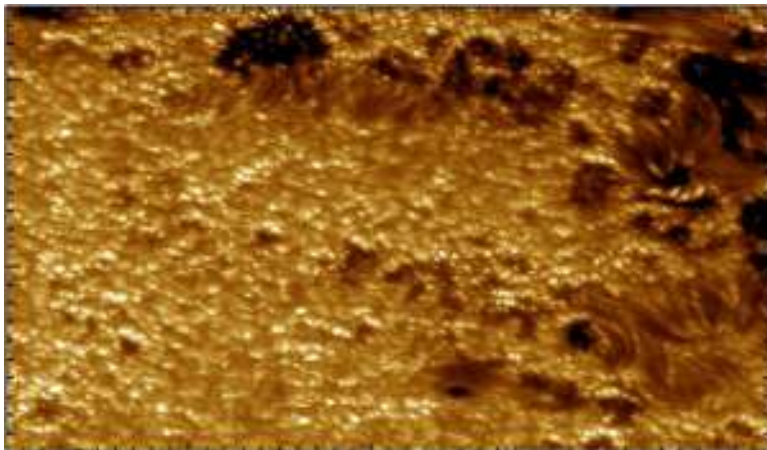
Unno et Ulrich 1972: interférence de modes qui se propagent dans la cavité solaire

$$\delta\lambda/\lambda \Rightarrow \delta v/v$$

Air = 343 m/s (20 C) Hélium = 965 m/s

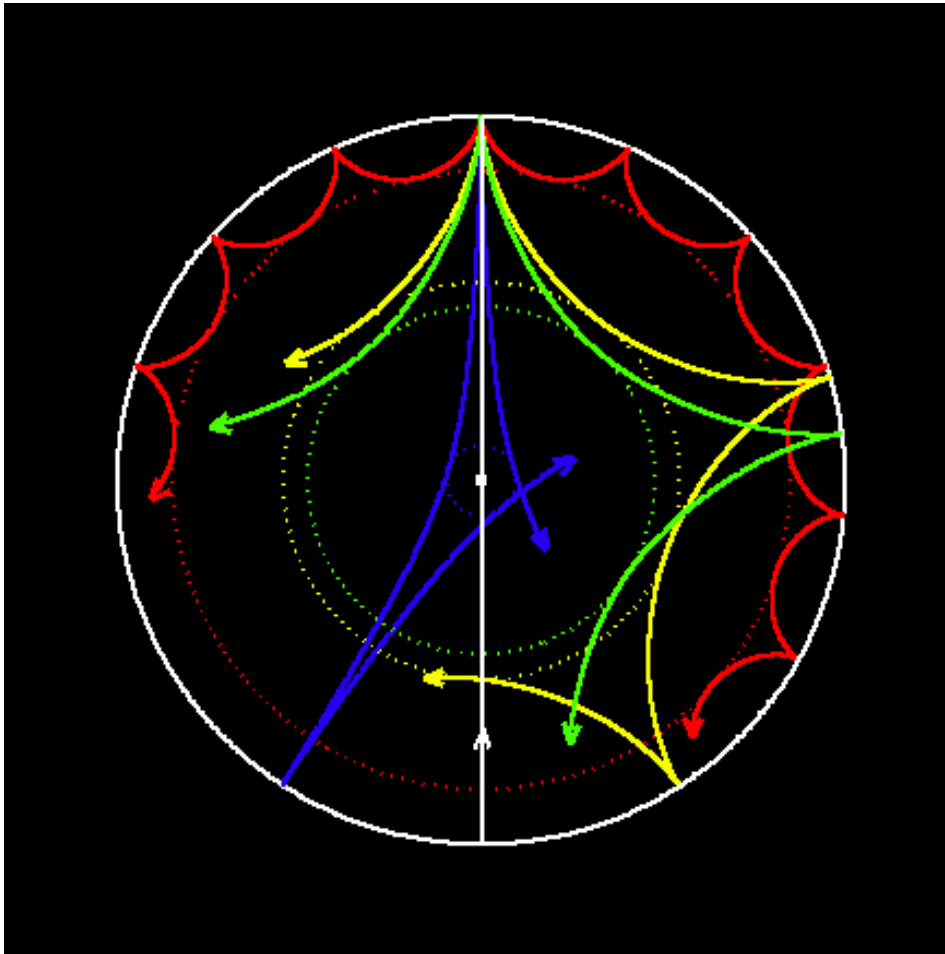
Hydrogène = 1284 m/s

Soleil entre 500 km/s et 7 km/s



La sismologie solaire et stellaire

l'identification des modes

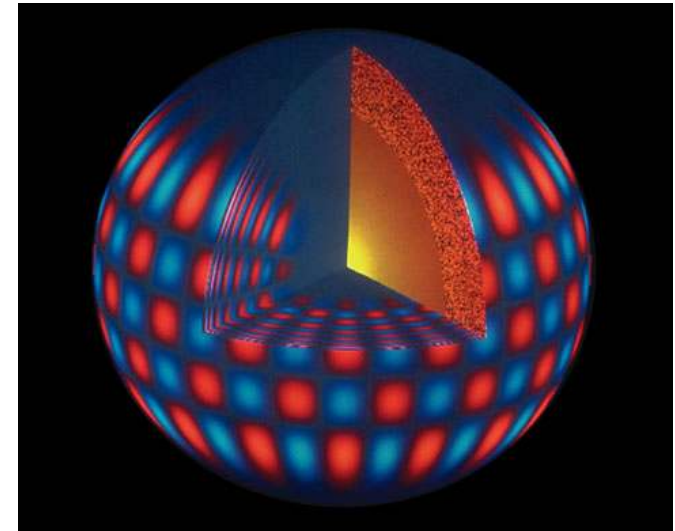


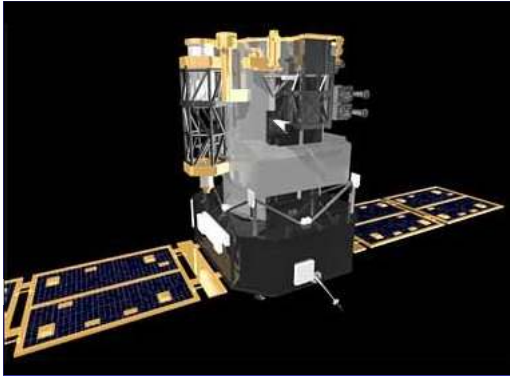
3 nombres: degré l

ordre n ,

$m = 2l + 1$ composantes

Des millions de modes
acoustiques détectés



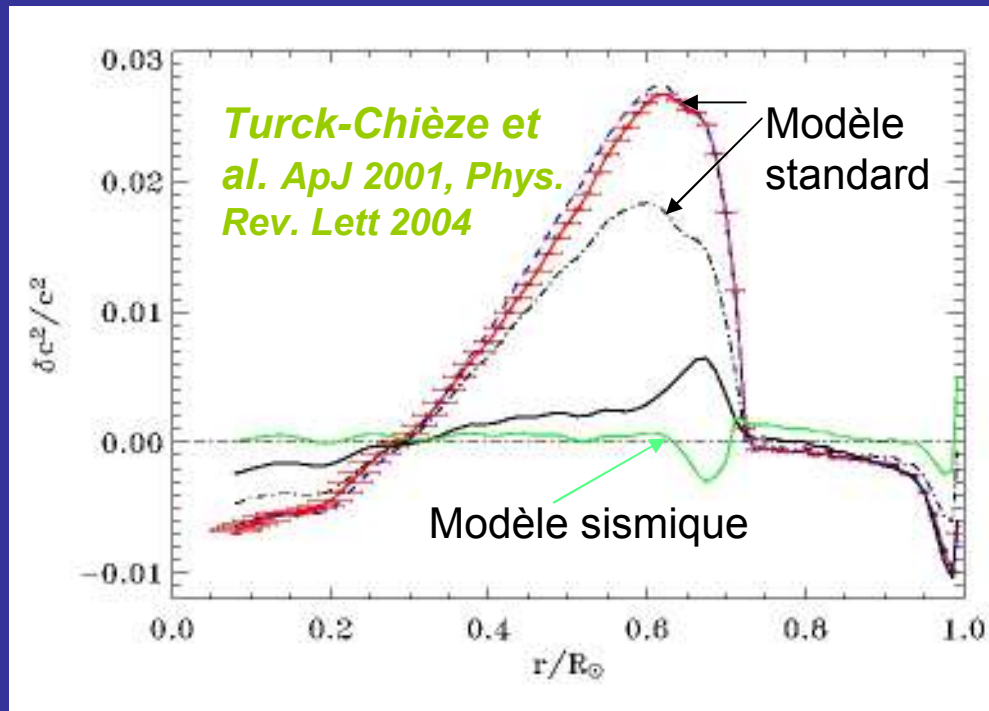


SoHO 1995- 2010

Détermination du profil de vitesse du son

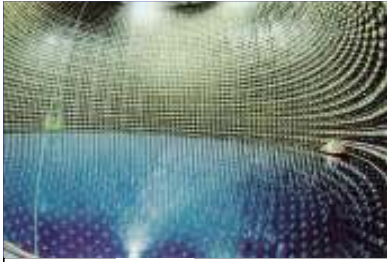


GOLF: collaboration France/Espagne



Dépendence de la composition, en particulier en CNO

+ détermination du profil de densité



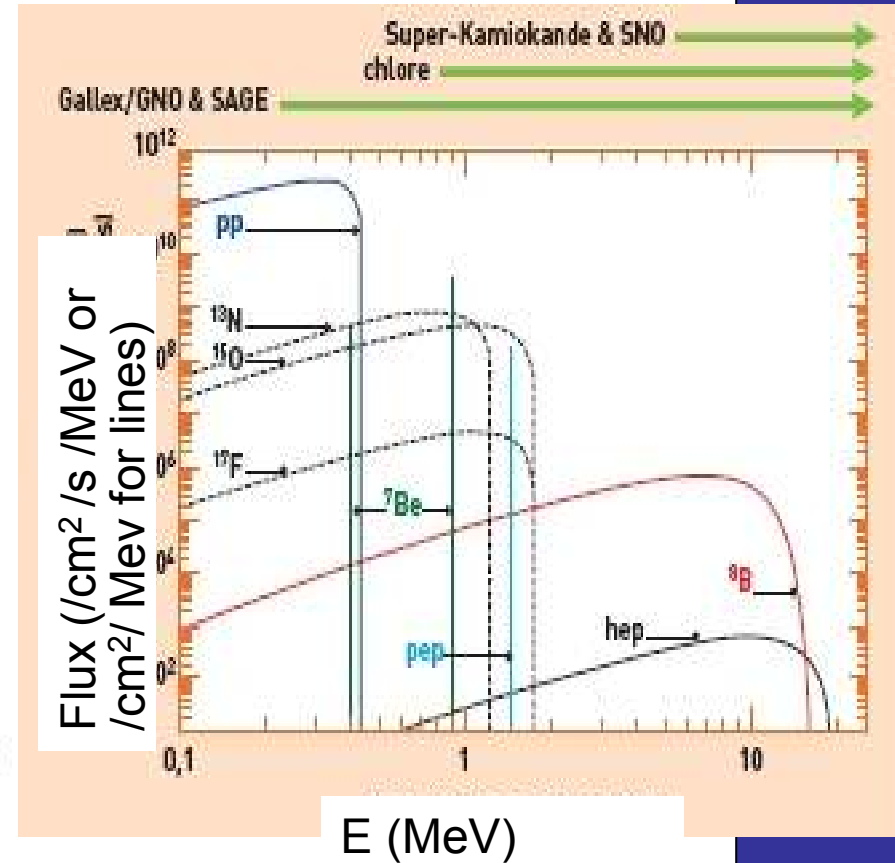
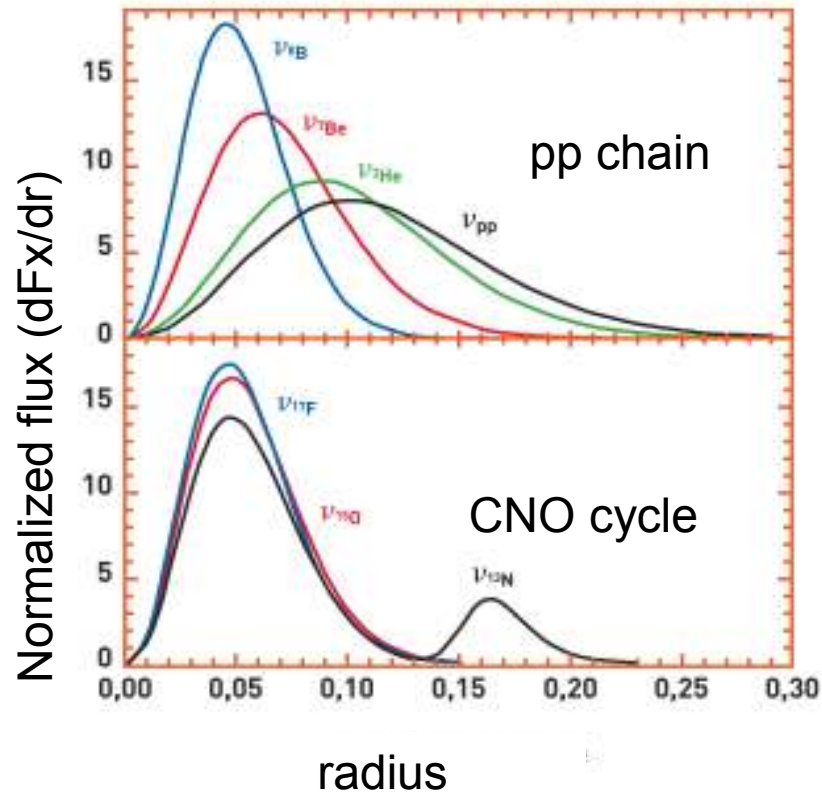
Les Neutrinos solaires



SuperKamiokande



SNO



Les neutrinos associés au ^8B

forte sensibilité à la température centrale (T^{20} T^{24})

	Flux solved	Tc		Y initial	Problème résolu
1988	3.8 ± 1.1	15.6	SM	0.276	CNO opacité, $^7\text{Be}(p,\gamma)$
1993	4.4 ± 1.1	15.43	SM	0.271	Opacité Fe, écrantage
	électron				
1998	4.82	15.67	SM	0.273	diffusion microscopique
1999	4.82	15.71	SM	0.272	Turbulence tachocline
2001	4.98 ± 0.73	15.74		0.276	Modèle sismique
2001	5.07 ± 0.76	15.75		0.277	modèle sismique + B
2003	3.98 ± 1.1	15.54	SM	0.262	- 30% sur composition CNO
2004	5.31 ± 0.6	15.75		0.277	modèle sismique + B+ RN

Neutrinos détectés à Sudbury

- 5.44 ± 0.99 (CC+ES 2001)
- $5.09 \pm 0.44 \pm 0.45$ (NC 2002) $5.27 \pm 0.27 \pm 0.38$ (2003)
- $4.94 \pm 0.06 \pm 0.34$ *Aharmim et al., 2005*

Prédiction du flux de neutrinos sans et avec oscillation des neutrinos

Chlore

	modèle sismique		Estimation de détection	
pep	0.228		0.13	
⁷ Be	1.155	57%	0.66	
⁸ B	5.676	31%	1.88	
¹³ N	0.096	57%	0.022	
¹⁵ O	0.328	57%	0.112	
total	7.44 SNU (1.1)		2.76 (0.4) SNU	
			Flux mesuré	2.56 (0.23) SNU

Gallium

	modèle sismique		Estimation de détection	
pp	69.4	57%	39.6	
pep	2.84	57%	1.62	
⁷ Be	34.79	57%	19.83	
⁸ B	11.95	31%	3.95	
¹³ N	3.48	57%	0.79	
¹⁵ O	5.648	57%	1.29	
total	128.2 SNU (8)		67.08 (4.4) SNU	
			Flux mesuré	68.1 SNU (3.75)

1SNU = 10^{-36} capture /atome /s

Ray Davis 1914-2006

Nobel Price 2002



Le modèle standard du Soleil est une base sérieuse pour suivre l'évolution séculaire des étoiles

**Deux types d'observables permettent de
sonder les succès et les limites de ce modèle**

Ce modèle n'explique pas toutes les observables

Pas de connection entre physique de l'intérieur et de l'extérieur

30% en 4.5 Gyr, 8% en 1Gyr, $8 \cdot 10^{-9}$ en 100 ans

OBSERVATIONS

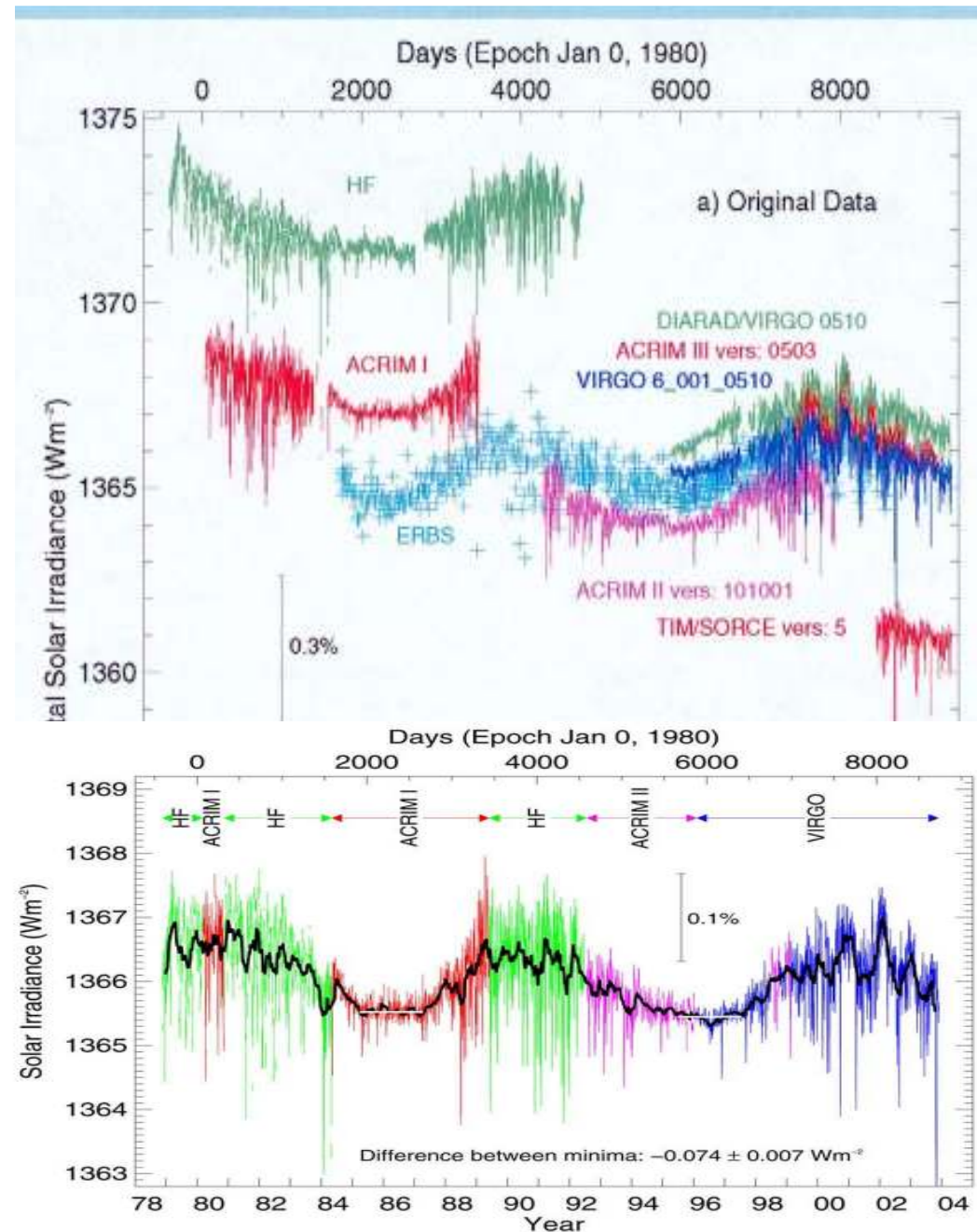
Fröhlich & Lean 2004

Variations de TSI : 0.1% => 1W

Au cours du cycle de 11 ans

Fluctuations de 0.3-0.4 %
autour des maxima
d'activité

Evolution à long terme mal
connue

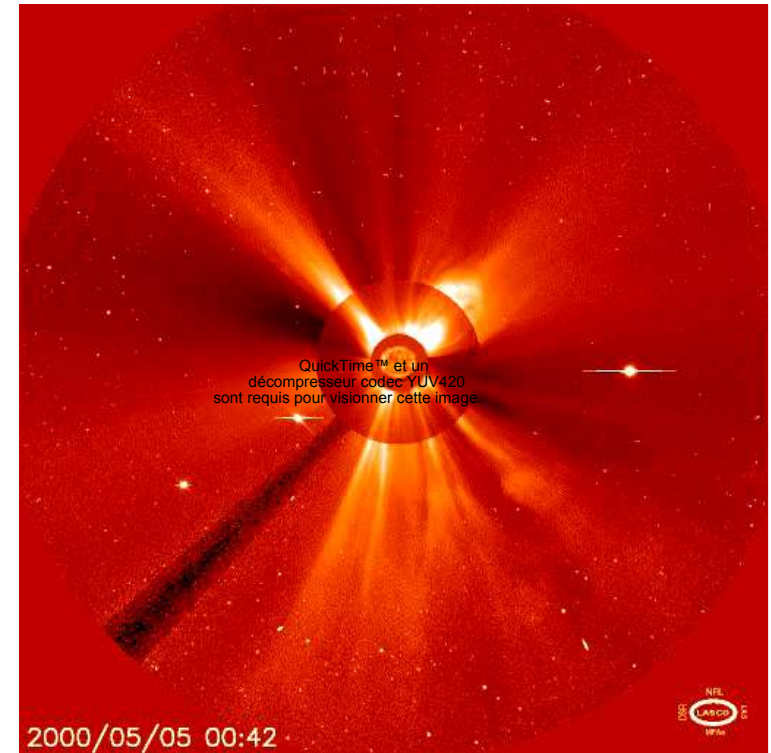
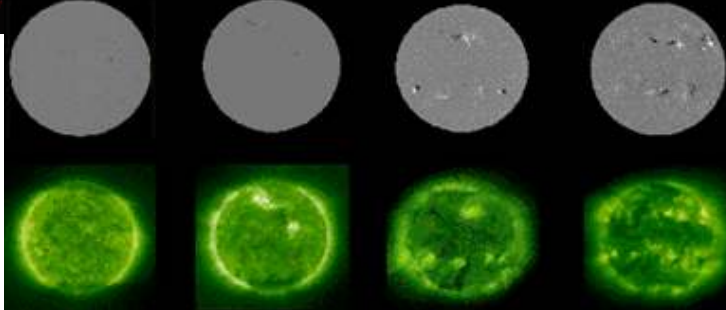
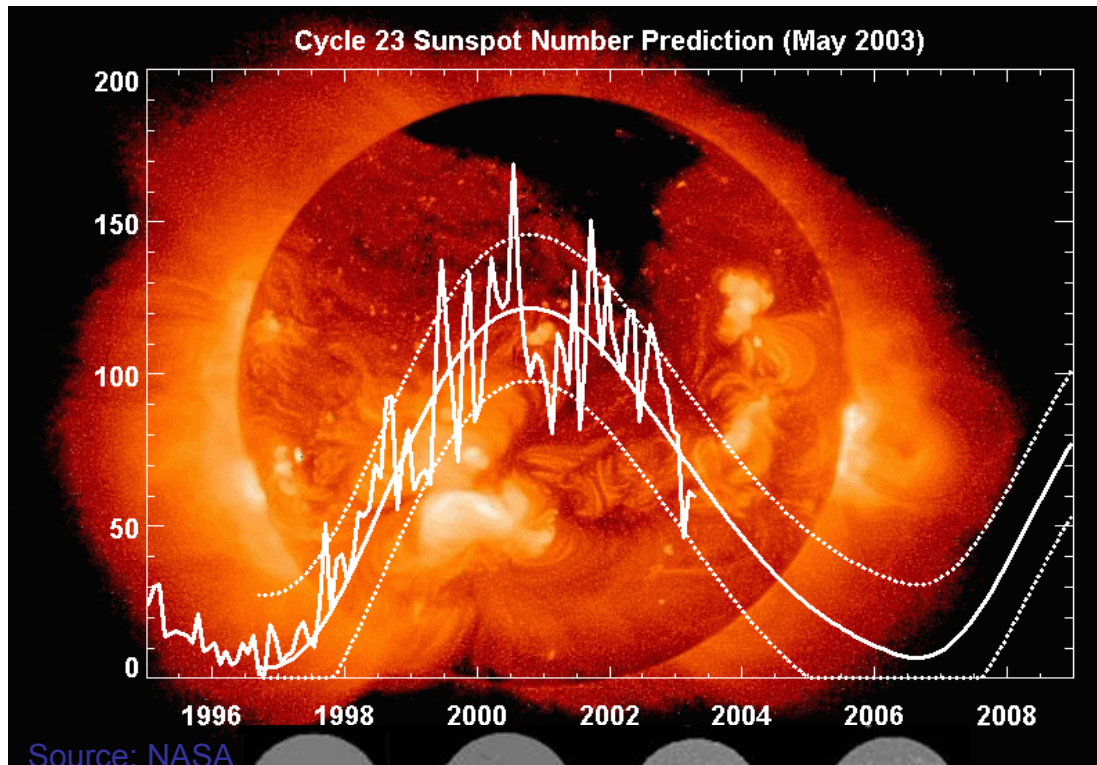


L'année 2001

Le grand tournant

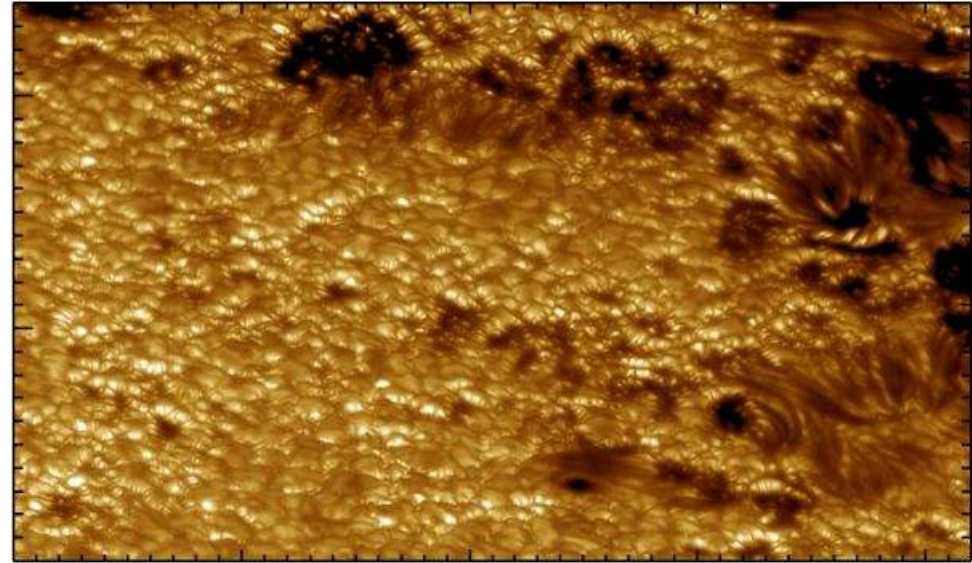
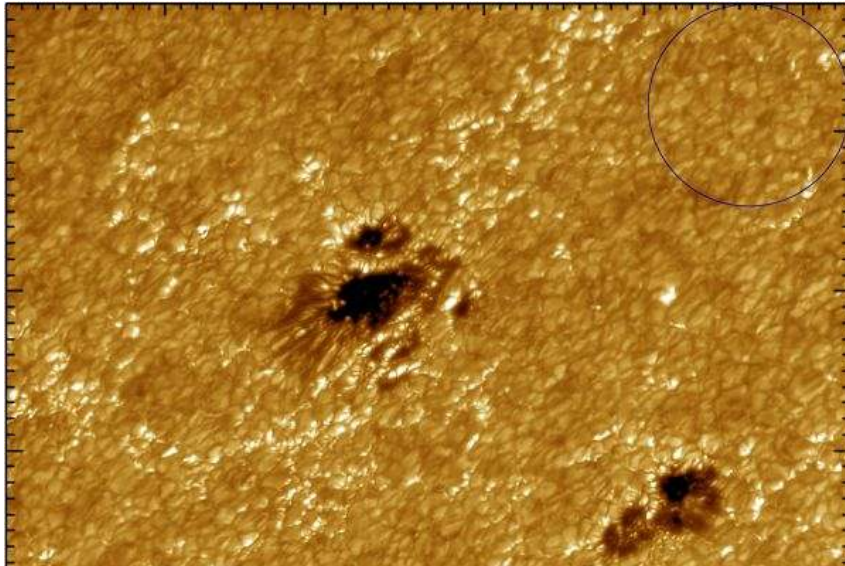
**Vers les échelles temporelles
plus courtes et la dynamique interne**

Le cycle solaire 23 vu par SoHO



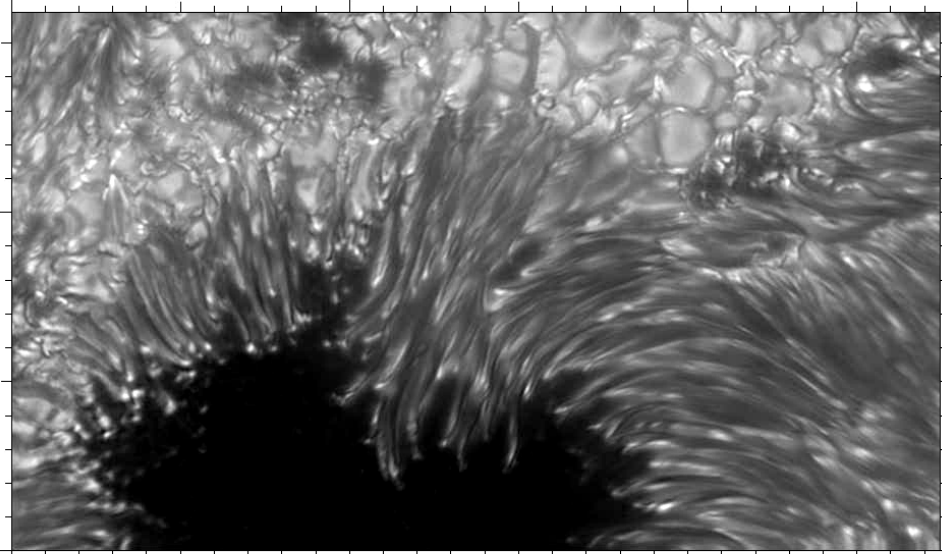
Réseau magnétique de surface

Télescope solaire suédois d'1m



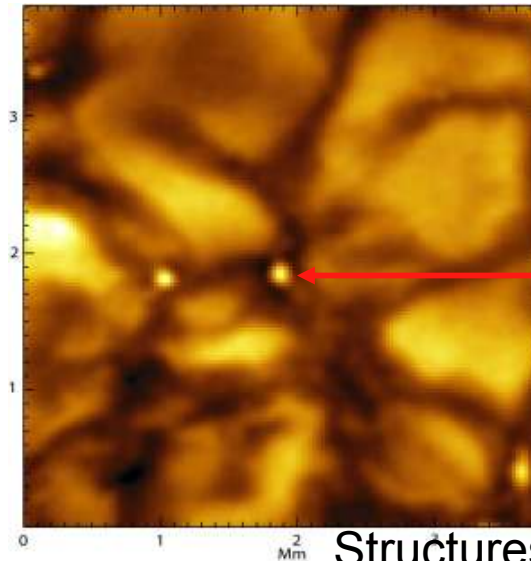
G-Band, 15 July 2002, Swedish 1-m Solar Telescope

00:00:00



5

distance in units of 1000 kilometers



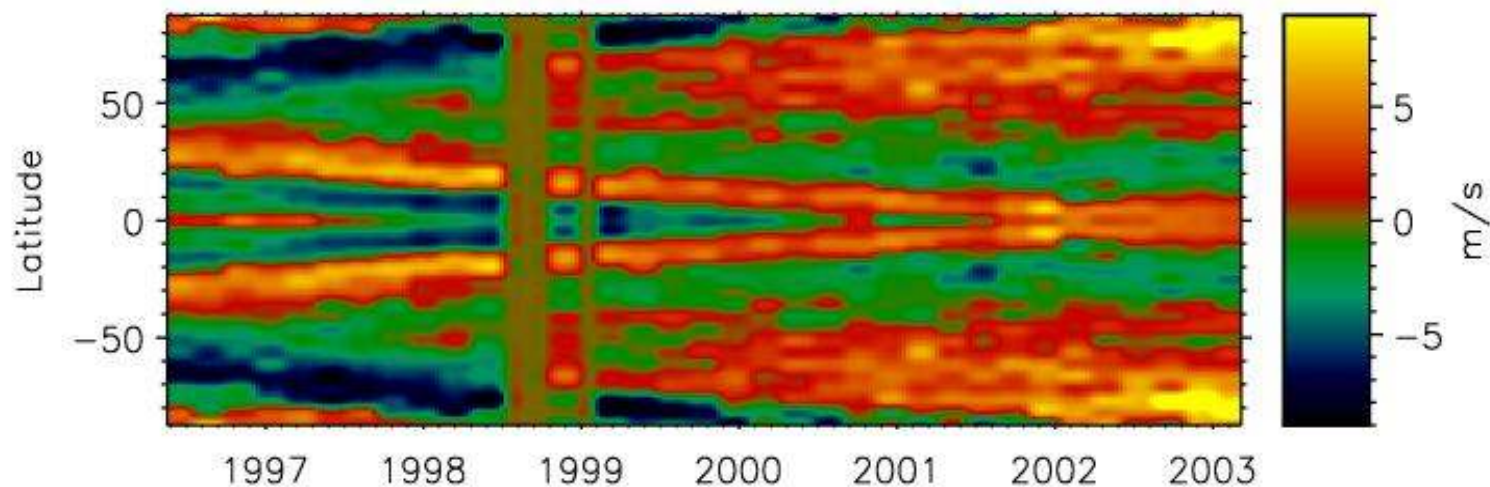
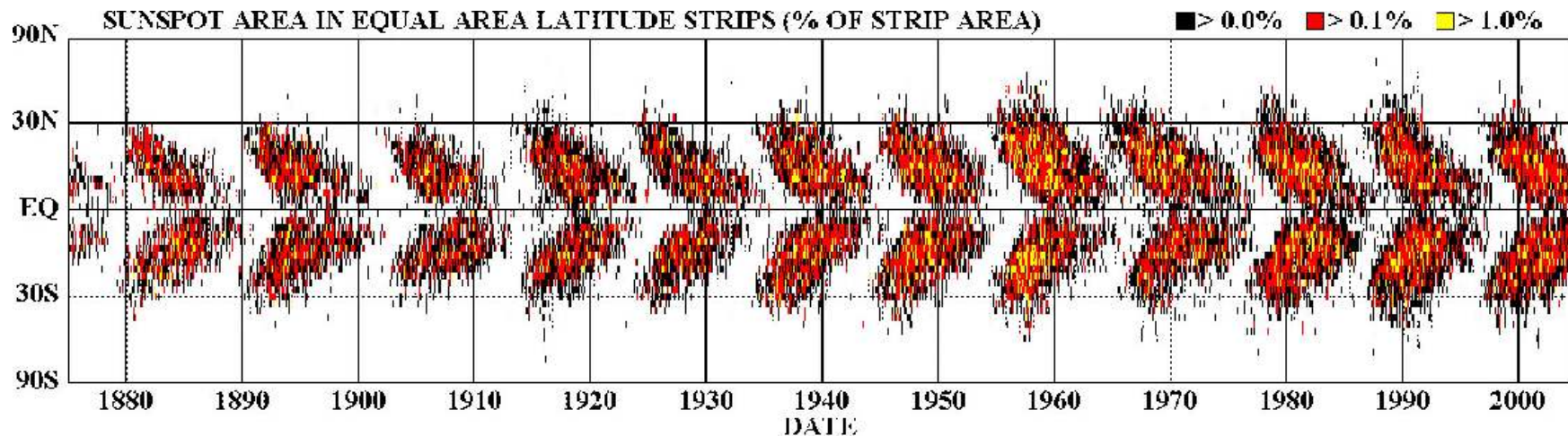
Tubes de flux
(< 98 km)

Structures magnétiques
de petites échelles

La sismologie commence aussi à
nous donner **une vision**
dynamique de l'intérieur du
Soleil
à travers l'étude des composantes
d'un même mode

Le diagramme papillon n'est pas un phénomène de surface

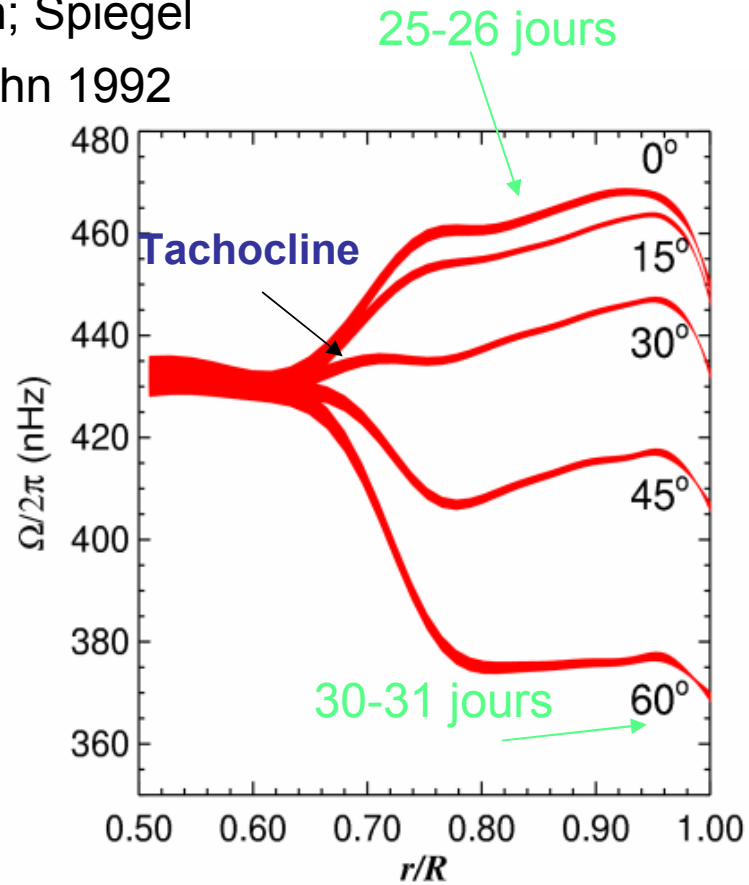
Hathaway



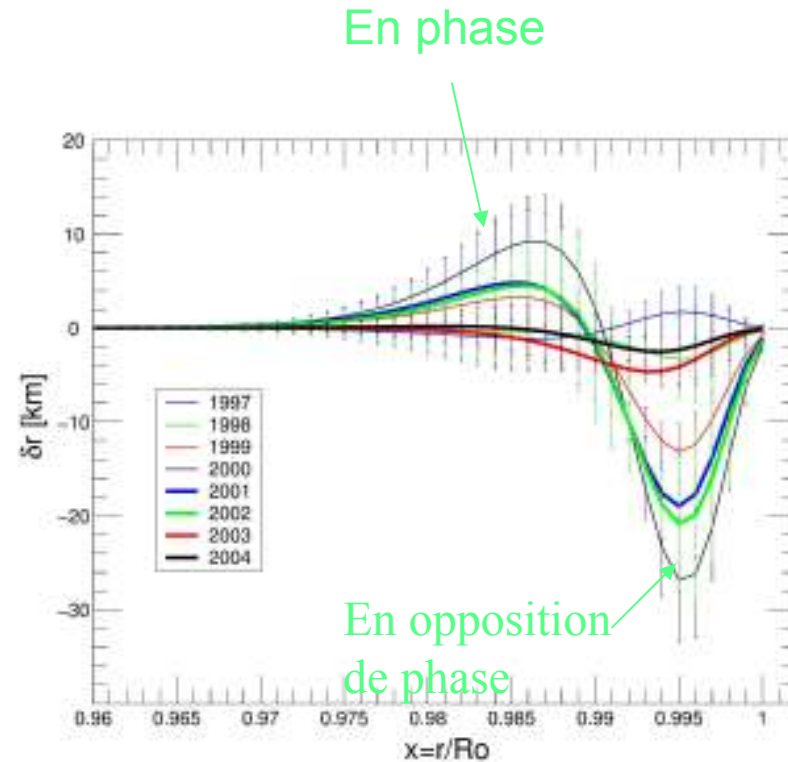
Soho
Vorontsov et al.

Résultats venant de l'instrument MDI

Zahn; Spiegel
& Zahn 1992



Kosovichev et al. 1998



Lefebvre et al. 2005

Equations MHD de l'évolution stellaire

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{conservation de la masse}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \\ - \nabla \cdot \mathbf{D} - (\nabla P - \rho \mathbf{g})$$

équation du moment

$$\rho T \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} + \rho T \mathbf{v} \cdot \nabla (\mathbf{S} + \mathbf{S}) = \nabla \cdot [\kappa_r \rho c_p \nabla (T + T) + \kappa \rho T \nabla (\mathbf{S} + \mathbf{S})] \\ + 4\pi \eta / c^2 j^2 + 2\rho \mathbf{v} [e_{ij} e_{ij} - 1/3 (\nabla \cdot \mathbf{v})^2] + \rho \varepsilon$$

équation d'énergie

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \quad \text{équation d'induction}$$

$$\mathbf{v} = (v_r, v_\theta, v_\phi) \quad \mathbf{B} = (B_r, B_\theta, B_\phi) \quad \mathbf{j} = c/4\pi (\nabla \times \mathbf{B}), \quad c_p, \kappa_r, \nu, \kappa, \eta, \mathbf{D}$$

Une nouvelle vision du Soleil et des étoiles

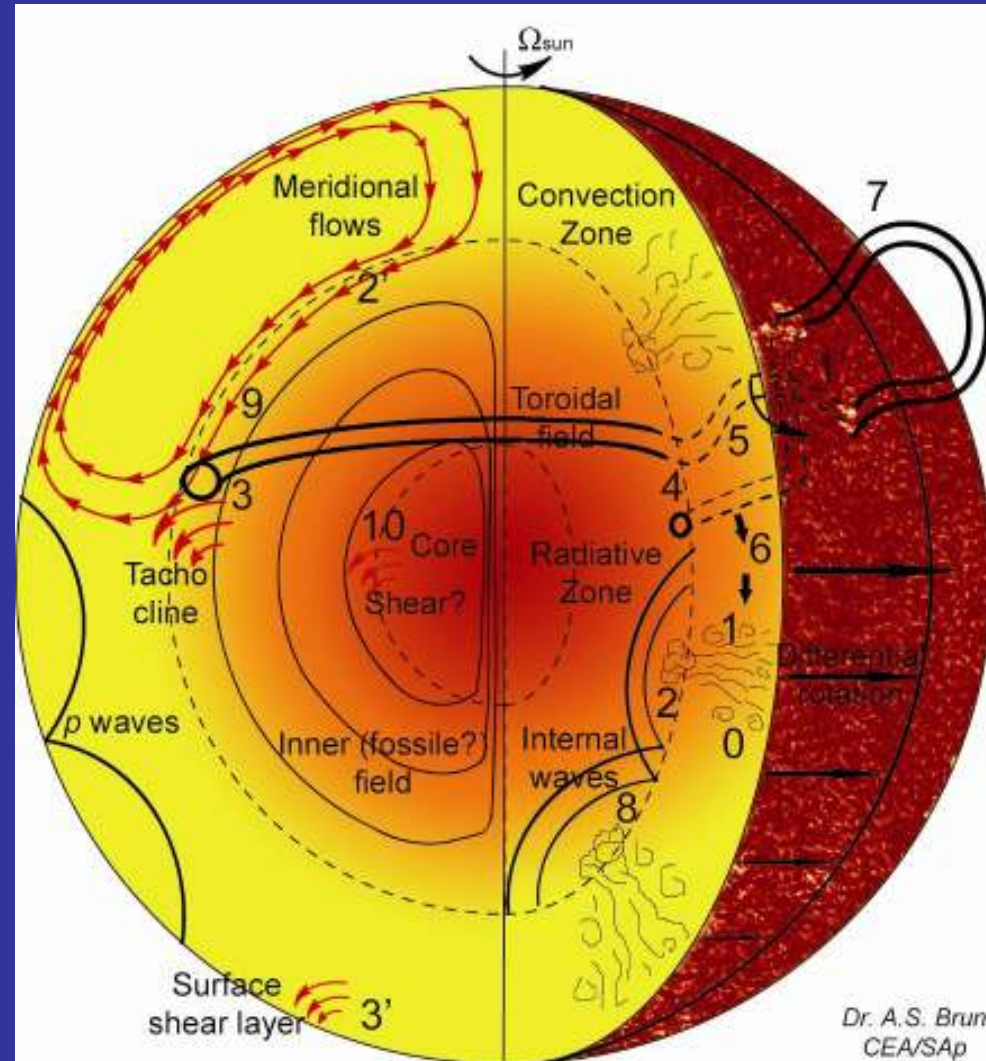
1D modèle

4 équations de structure se transforment en

16 équations

+

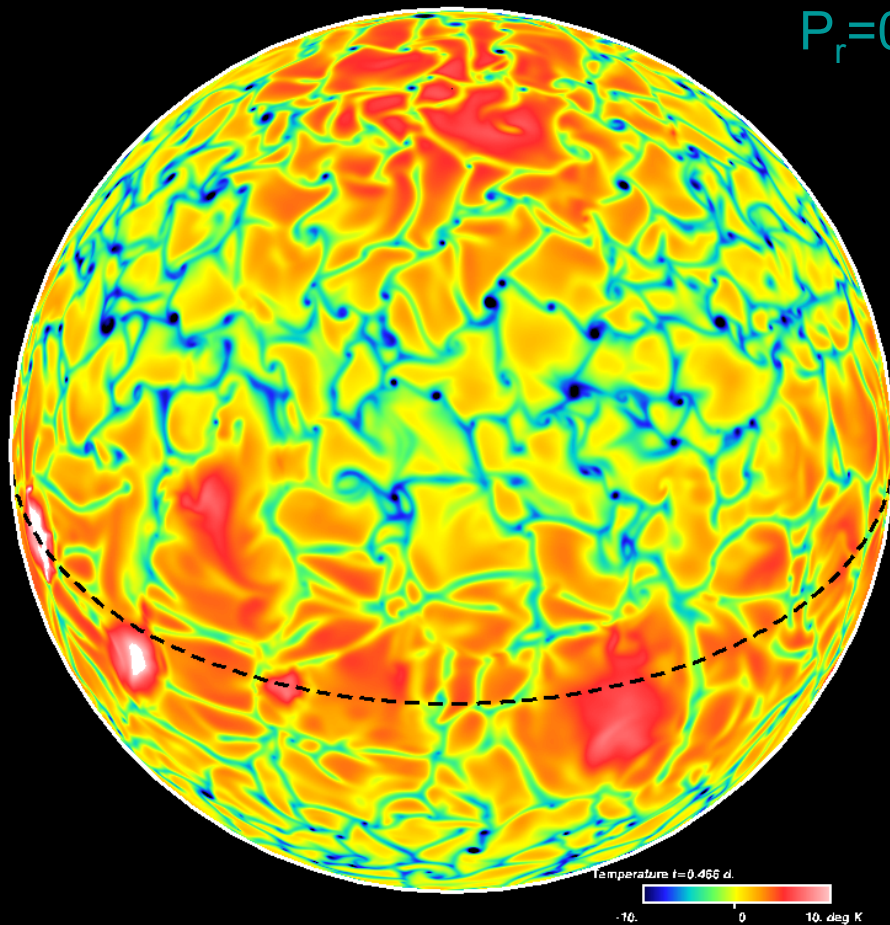
Développement de modèles 2D et 3D



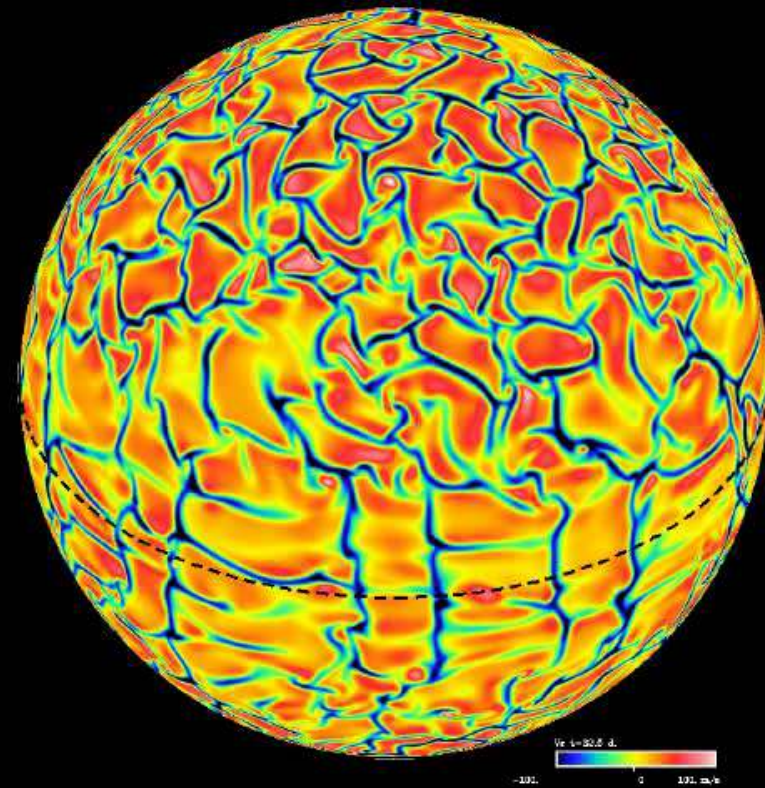
Température/Vitesse Radiale dans des flots convectifs turbulents

Résolution $\sim 1000^3$
 $Re = V_{\text{rms}} D/\nu \sim 800$
 $P_r = 0.25$

Profondeur
 $r = 0.96 R_{\text{sol}}$

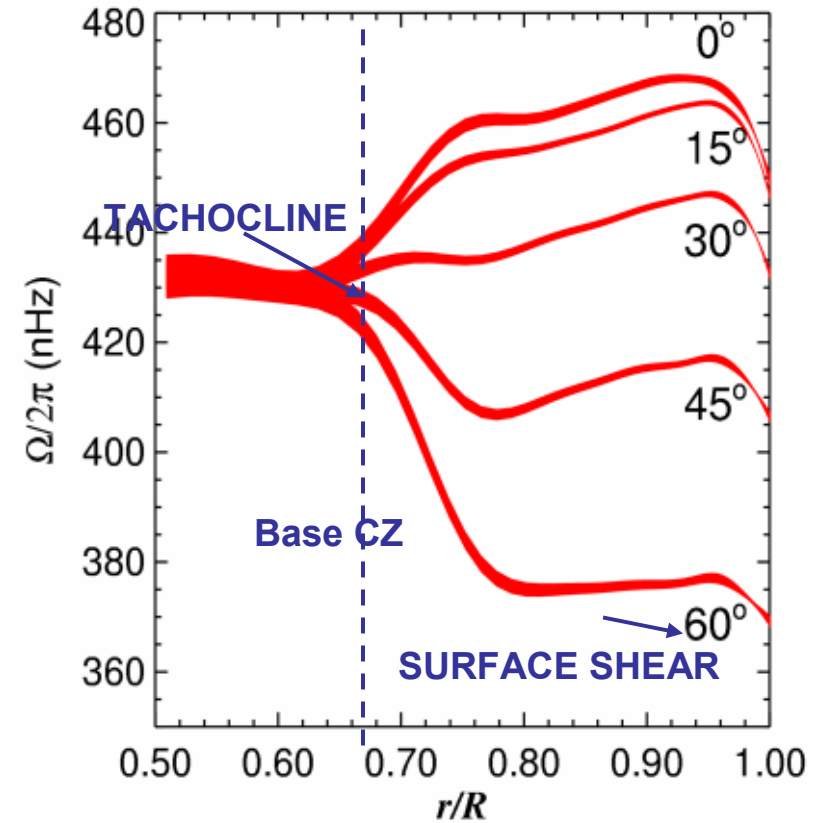
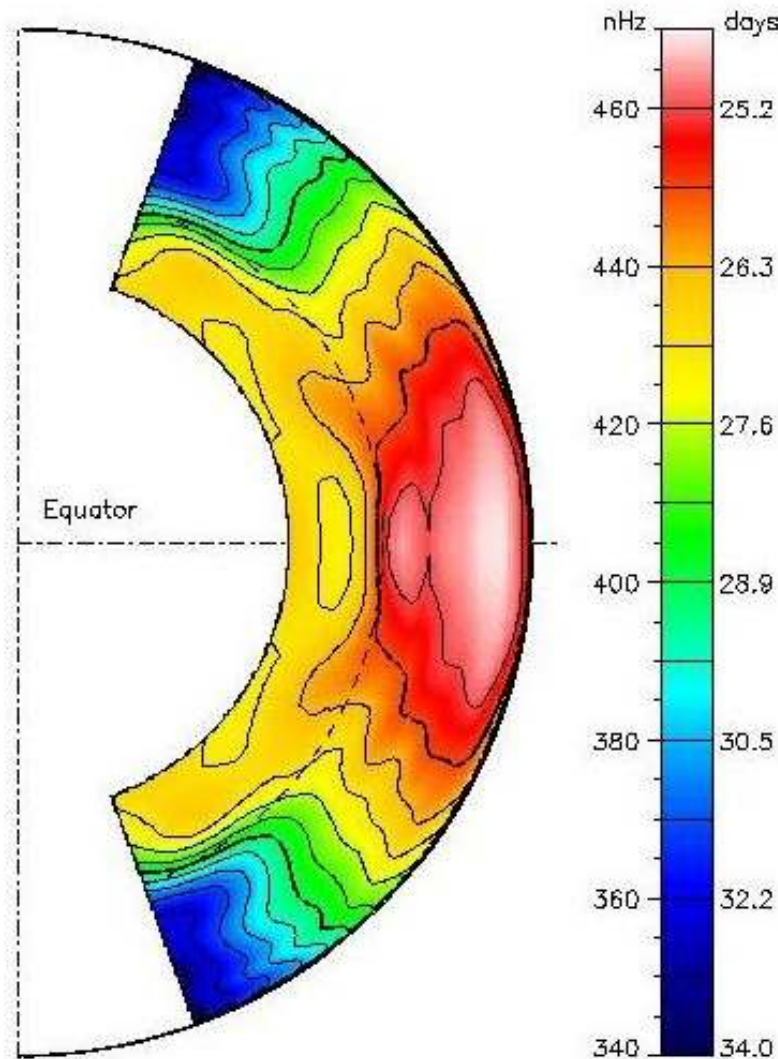


Code 3D ASH /CEA

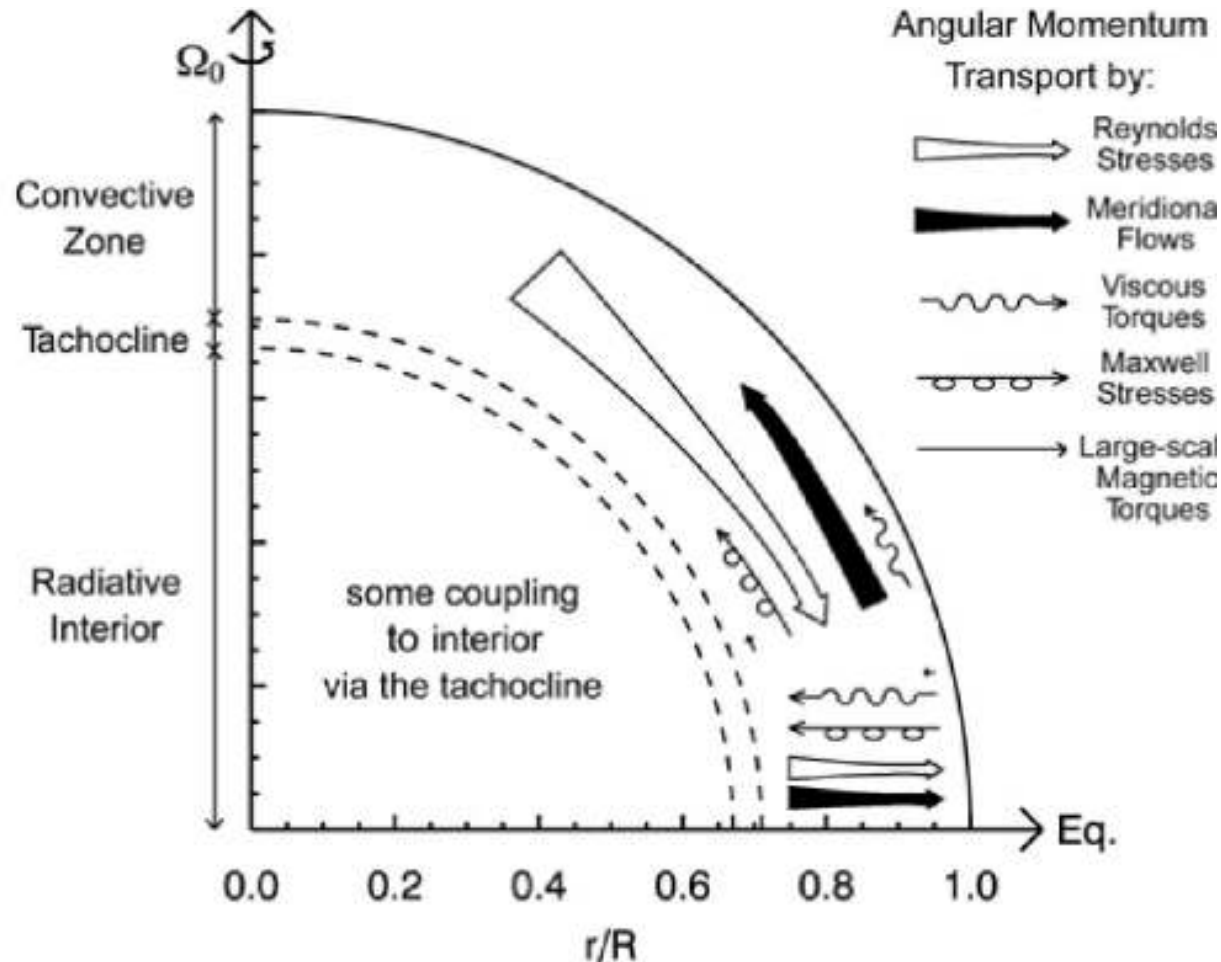


Brun & Toomre,
2002, ApJ, 570, 865

Simulation de la rotation différentielle en région convective



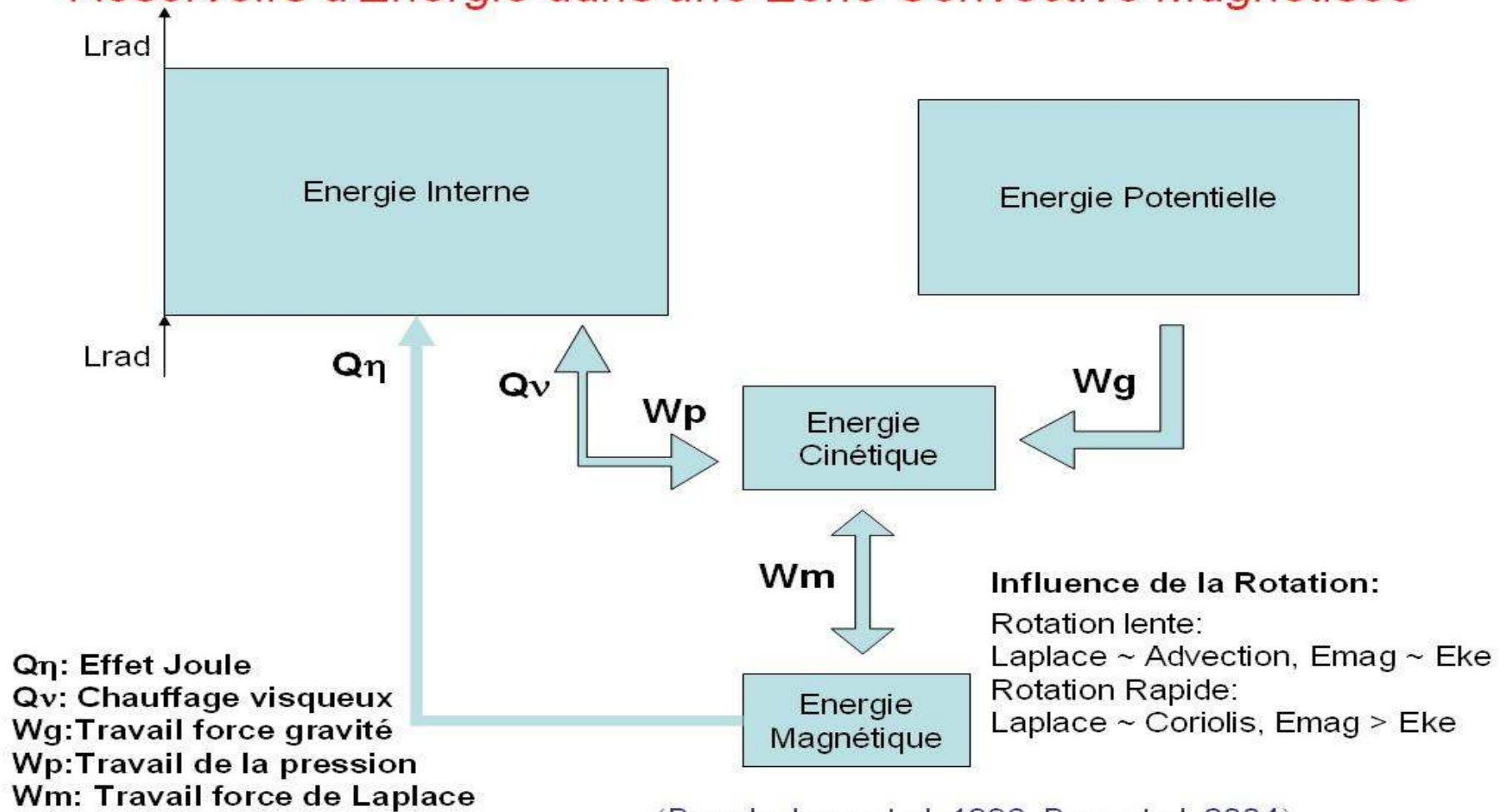
Balance du moment angulaire en présence de champ magnétique



Brun, 2004
Brun & Toomre 2002

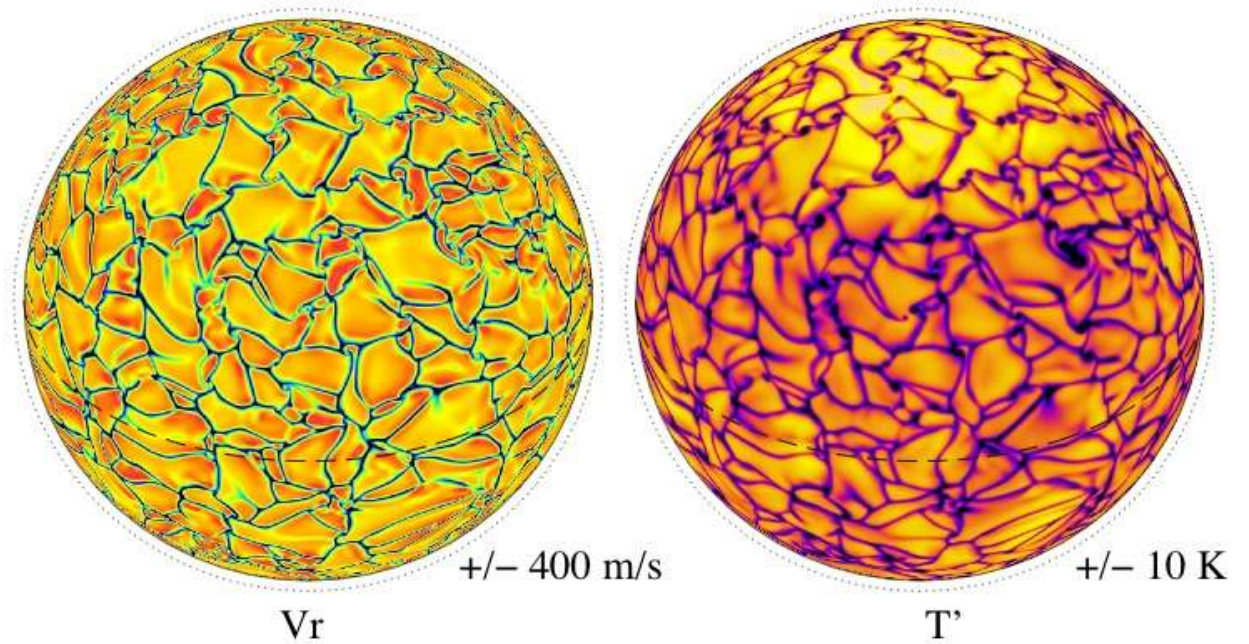
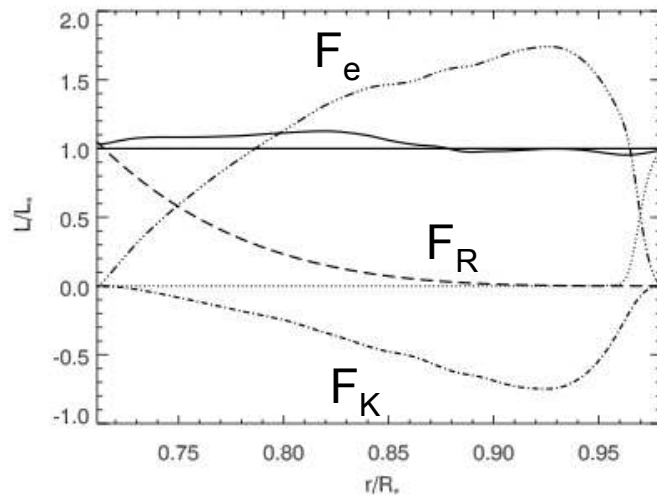
C'est la turbulence de la convection qui établit la rotation différentielle.
Le transport de moment angulaire par le tenseur de **Reynolds** est à l'**origine de l'accélération équatoriale**. Le **tenseur de Maxwell** cherche à accélérer les pôles.

Réservoirs d'Énergie dans une Zone Convective Magnétisée



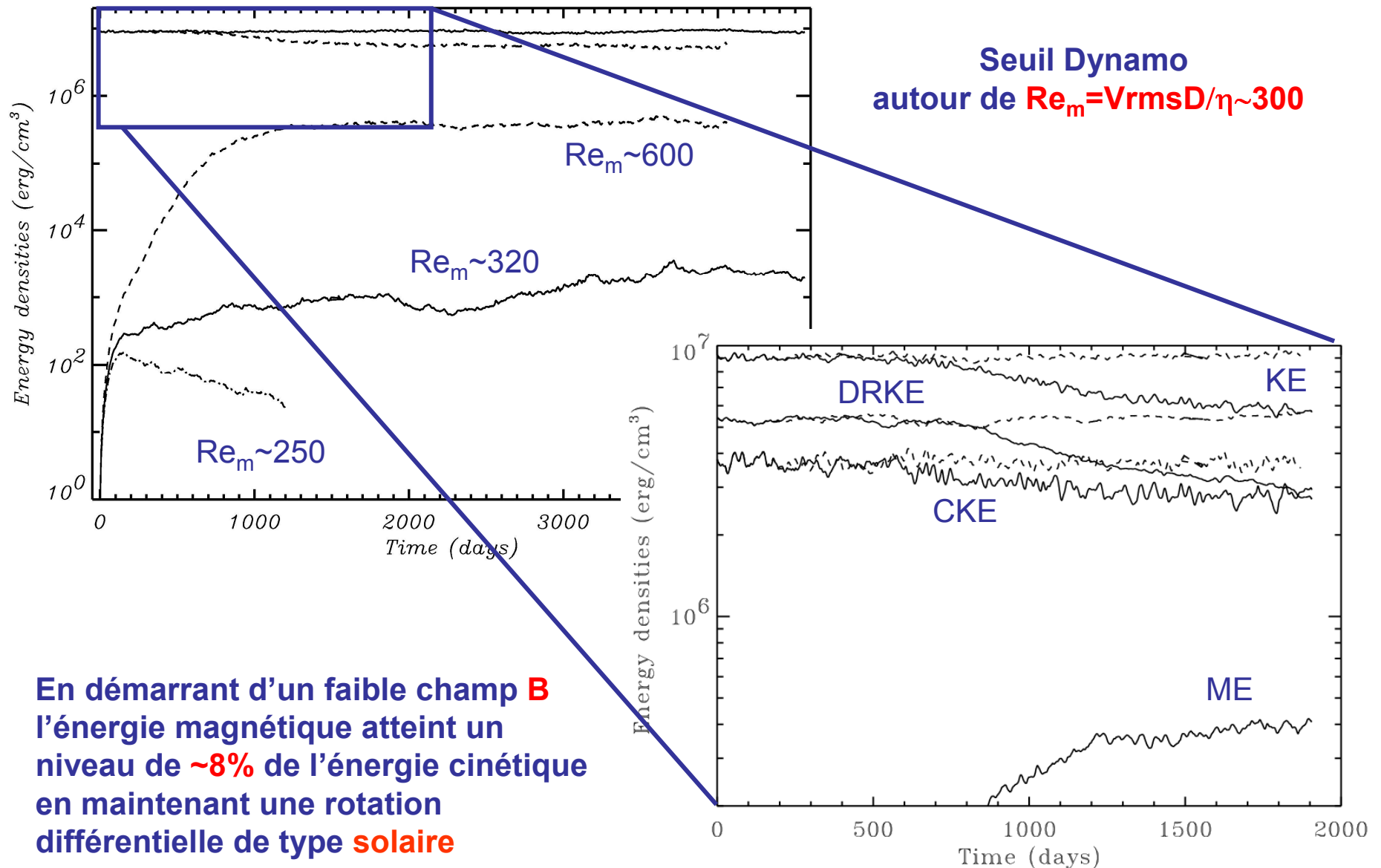
(Brandenburg et al. 1996, Brun et al. 2004)

Balance des flux dans la région convective



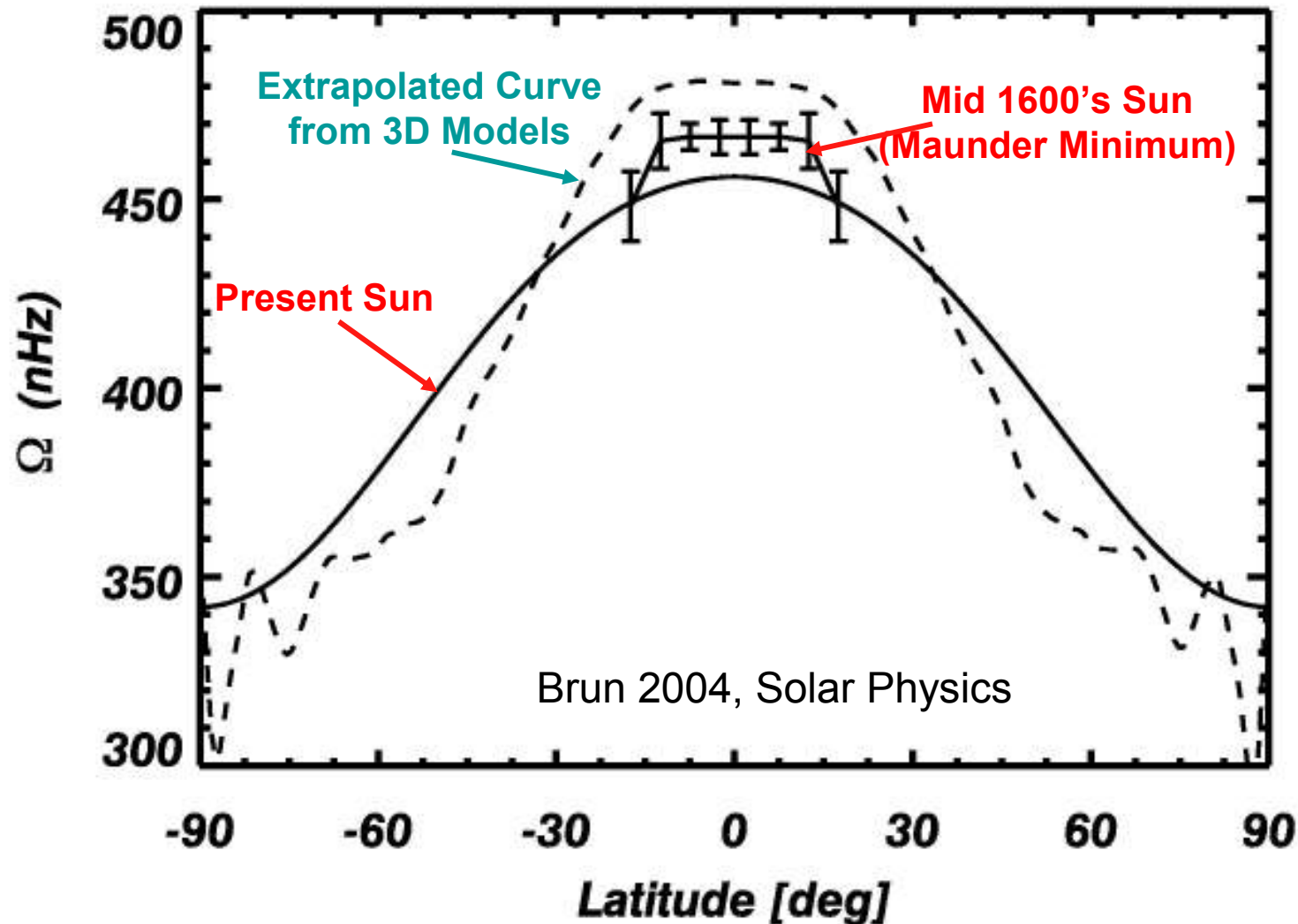
Miesch, Brun, de Rosa,
Toomre 2008

Energie magnétique- Effet Dynamo



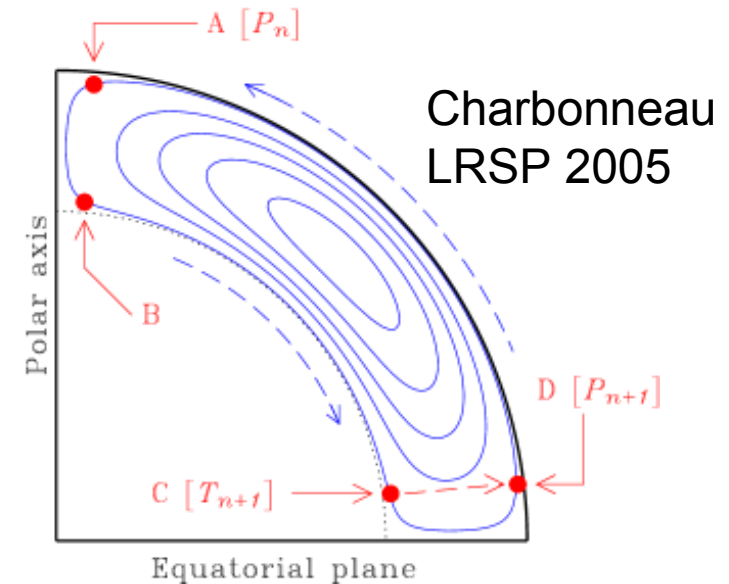
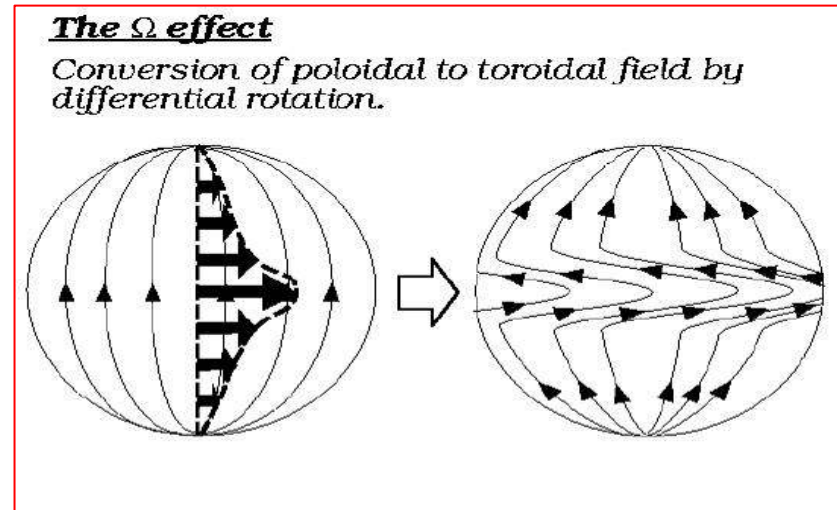
En démarrant d'un faible champ **B**
l'énergie magnétique atteint un
niveau de **~8%** de l'énergie cinétique
en maintenant une rotation
différentielle de type **solaire**

Vitesse de surface angulaire Ω



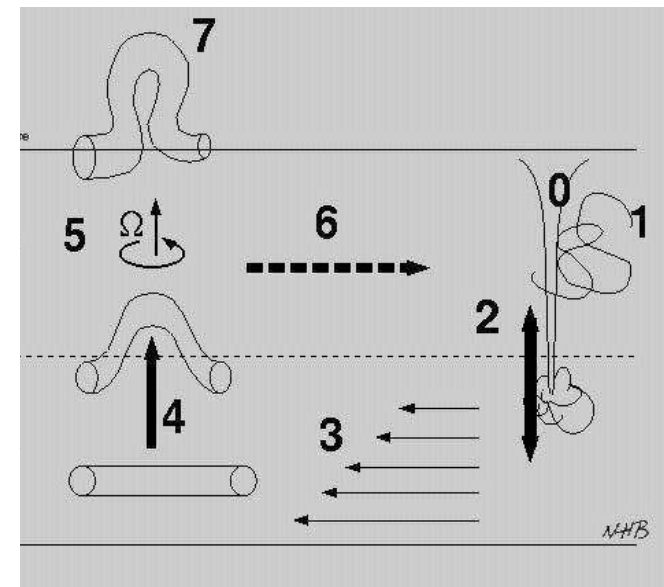
- Eddy et al. (1976) a montré que probablement au cours du **minimum** de **Maunder** le soleil tournait **4% plus vite** qu'aujourd'hui
- Une énergie magnétique d'environ **5-7%** de l'énergie cinétique conduirait à ce changement

Génération de l'effet dynamo solaire



Modèle de dynamo de Babcock-Leighton (1961-1969)

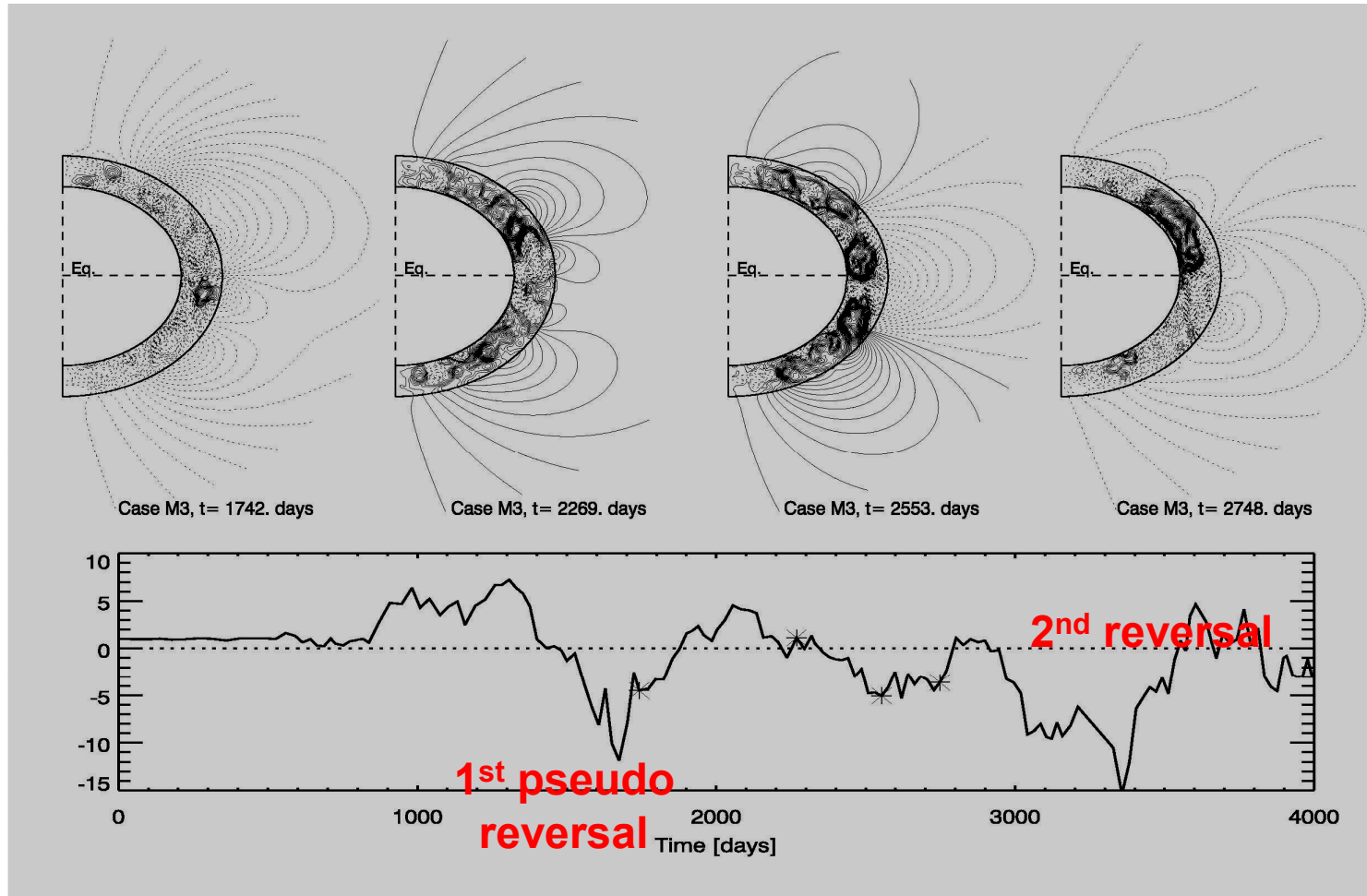
Le champ poloidal polaire est advecté par la circulation méridienne vers la tachocline qui joue un rôle important dans le **stockage et l'amplification du champ magnétique toroidal** dans le cycle de Schwabe de 22 ans



Champ magnétique axisymétrique

Simulation à partir d'un champ initial **dipolaire** B_{pol}

Evolution de ce champ B_{pol}



$P_{cyc} \sim 400$ d

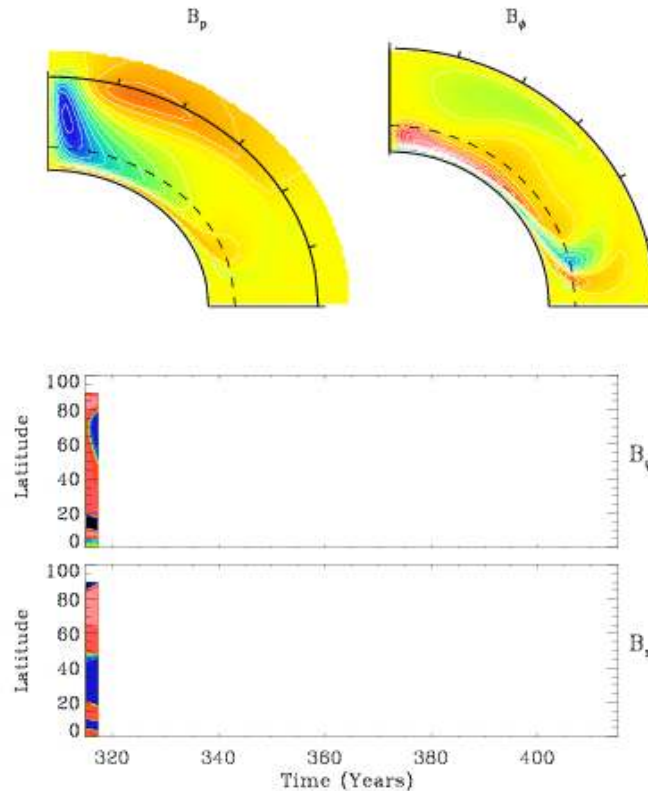
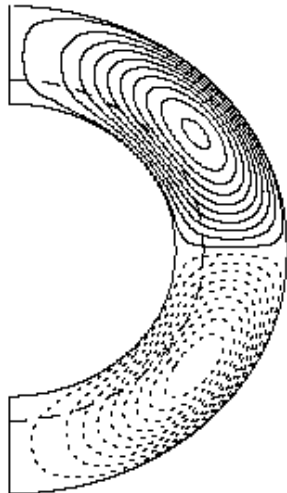
STELM/CEA: modèle 2D de champ moyen: modèle BL « standard » de transport de flux

Jouve & Brun 2007, A&A

Résolution de l'équation d'induction

1 cellule par hémisphère

Fonction de courant



Cycle 22-yr

Paramètres initiaux:

$$v_0 = 6.4 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\eta_t = 5^{10} \text{ cm.s}^{-1}$$

$$s_0 = 20 \text{ cm.s}^{-1}$$

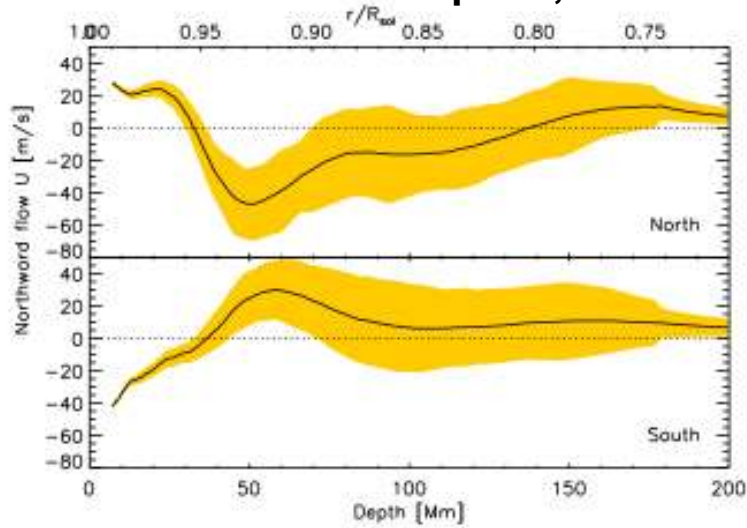
$$\Omega_{\text{eq}} = 460 \text{ nHz}$$

Durée du cycle

$$T \propto v_0^{-0.63}$$

Observation Multicellulaire du flot méridien

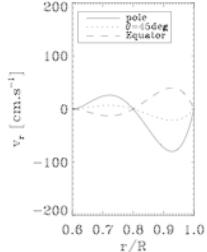
Mitra-Kraev & Thompson, 2007



2 radial cells

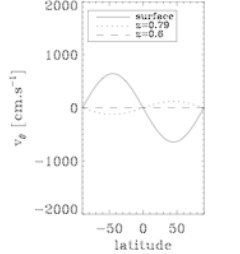


Radial velocity

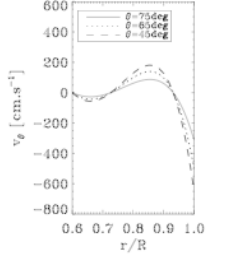


Avec une plus forte vitesse et diffusivité, on obtient un cycle de 22 ans

Latitudinal velocity

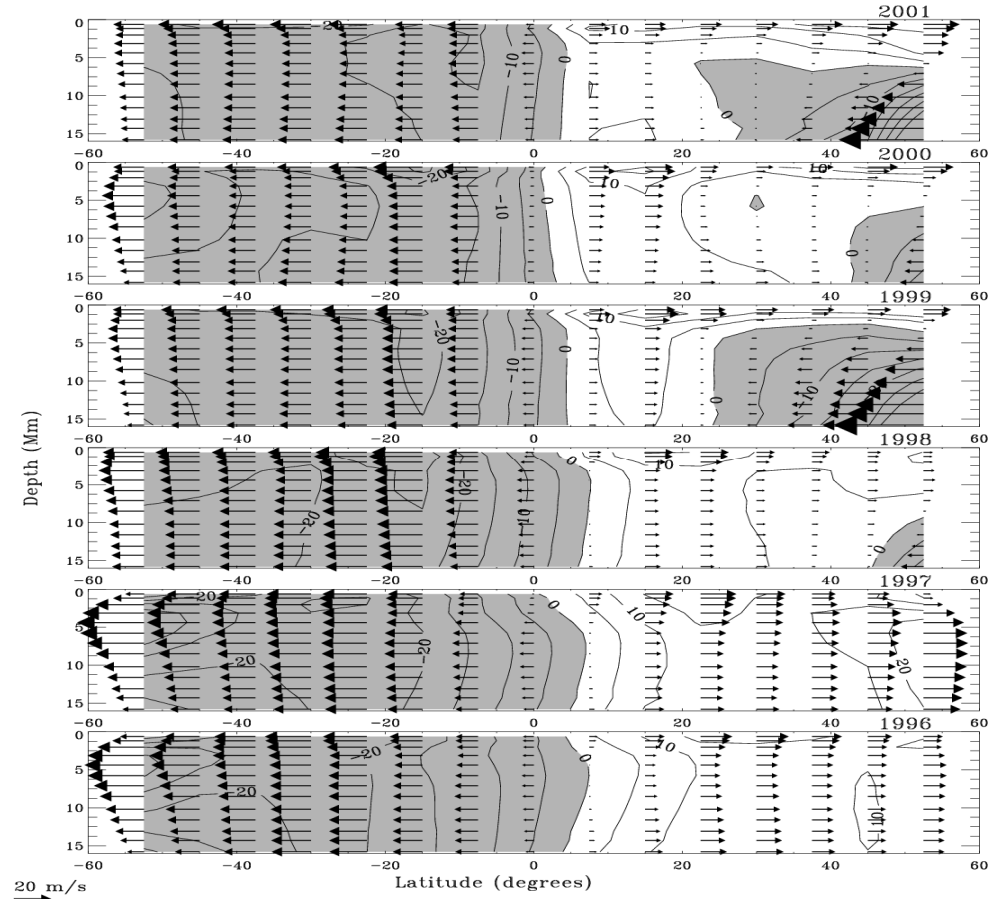


Latitudinal velocity



Mais le diagramme papillon est très perturbé

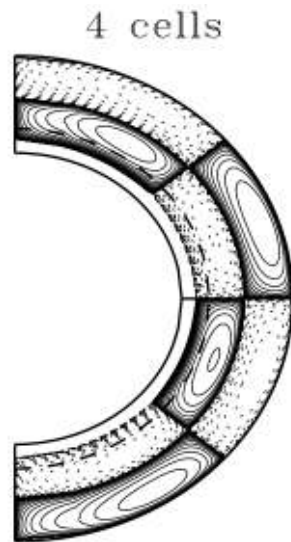
Apparition d'une cellule à contre courant dans l'hémisphère nord



MDI data (Haber et al. 2002)

STELM/CEA: modèle 2D de champ moyen: modèle BL « standard » de transport de flux à 4 cellules

4 cellules par hémisphère.



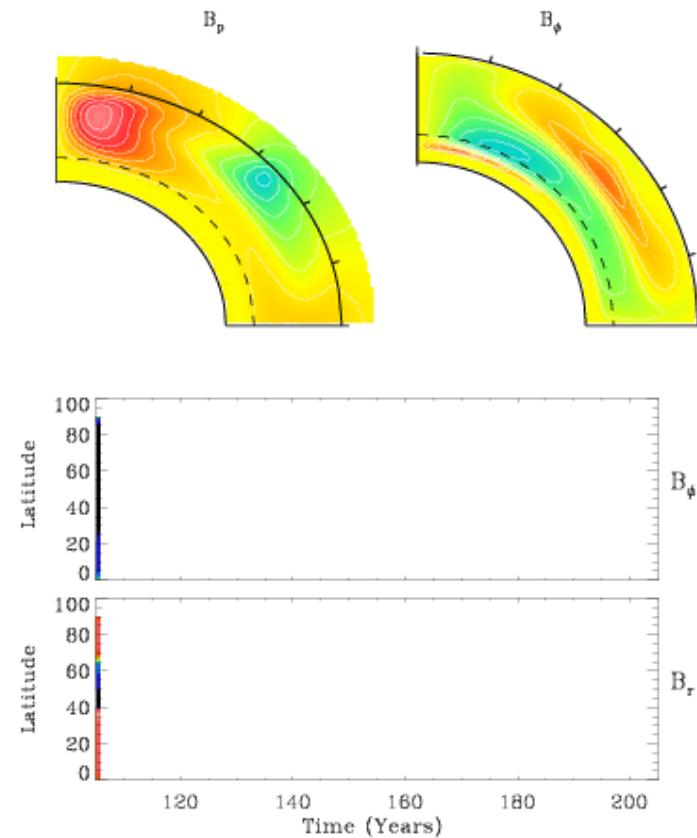
La période monte à 45 years avec les paramètres du modèle monocellule

Avec une plus forte vitesse et diffusivité, on obtient un cycle de 22 ans pour:

$$v_0 = 10.7 \text{ m.s}^{-1}$$

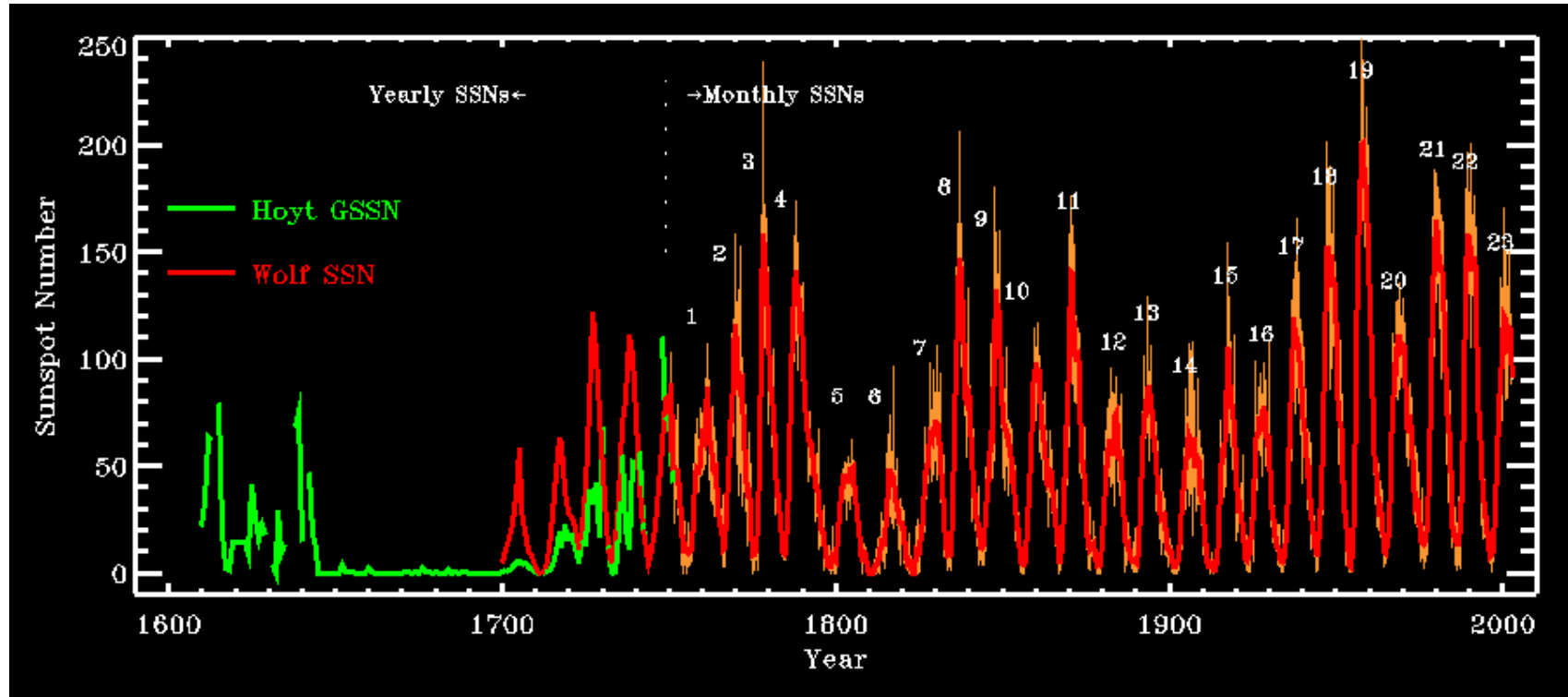
$$\eta_t = 1.5e11 \text{ cm.s}^{-1}$$

Mais le diagramme papillon est très perturbé



$$T \propto s_0^{0.05} v_0^{-0.35} \eta_t^{-0.4}$$

Etude de l'origine interne de l'activité solaire

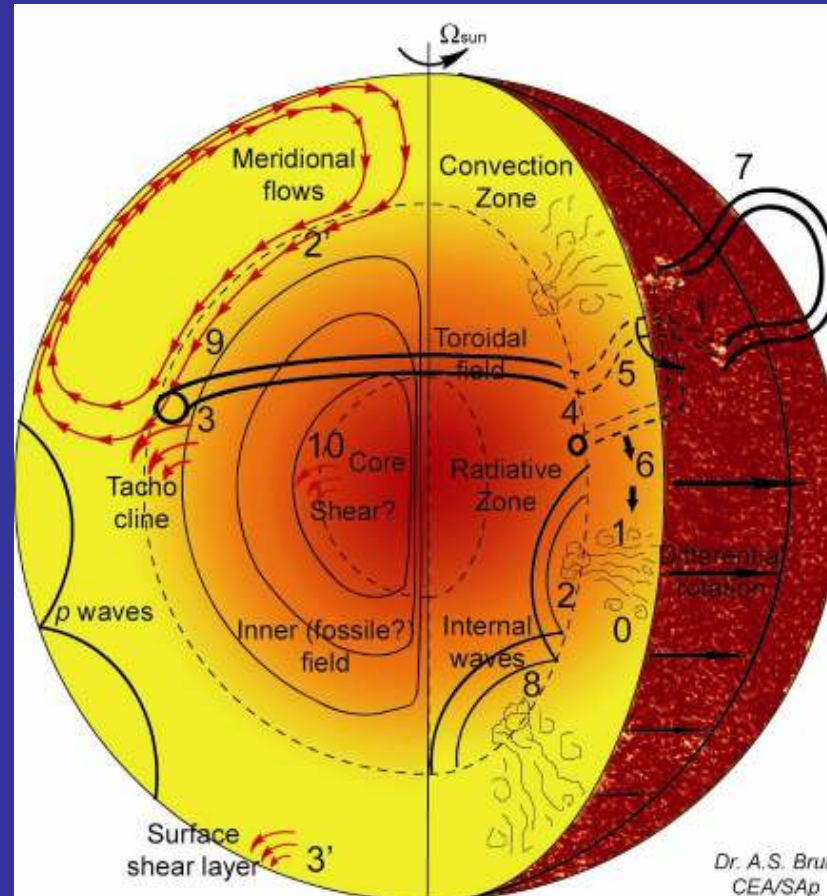


Un seul type de cycle ou plusieurs ??

Réponse stochastique du cycle de 11 (22)ans

Plusieurs cycles: Gleissberg ou Suess d'origine différente ?

Une vision dynamique de la région radiative



Elle représente
98% de la
masse du Soleil

Mesures sismiques de la rotation en région radiative

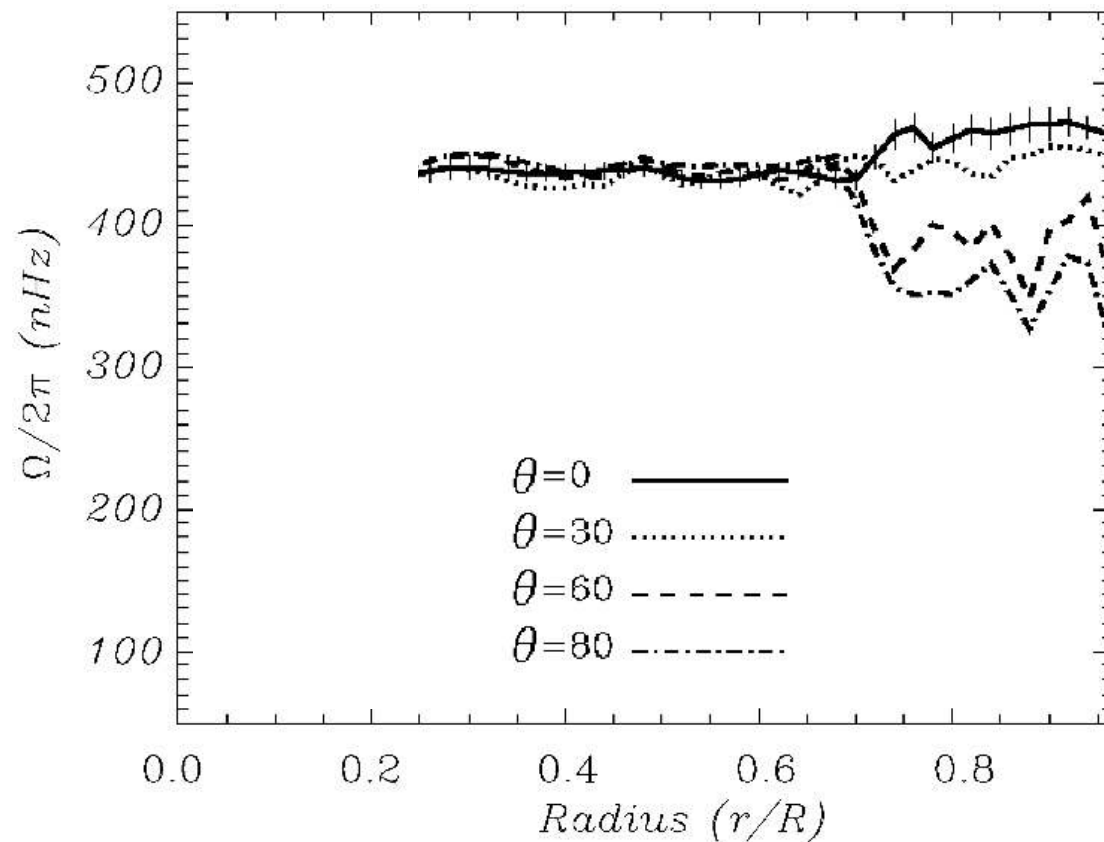
par les instruments GOLF/MDI et GONG

Couvidat, T-C, Garcia, Corbard 2003

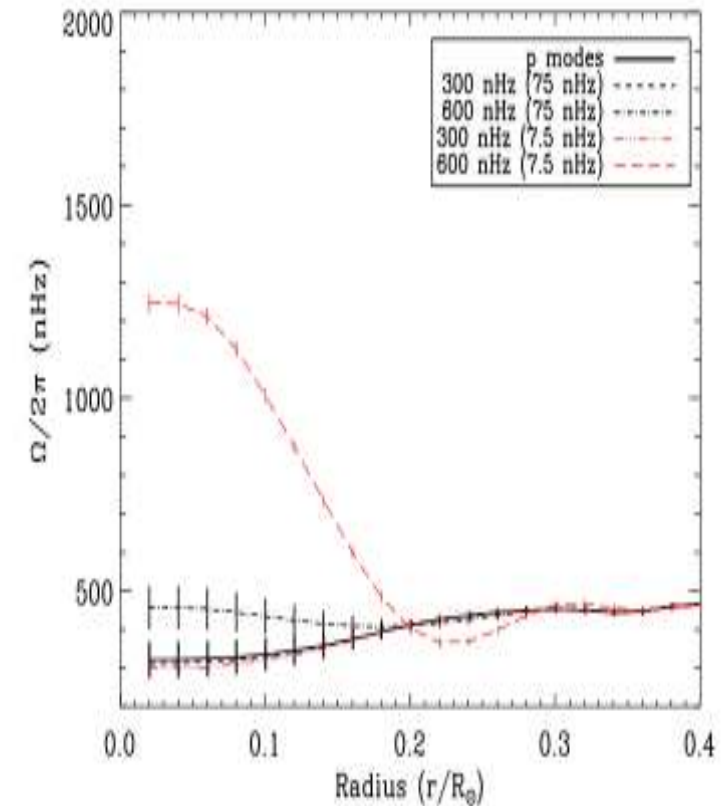
Eff Darwich et al. 2008

T-C et al. 2004; Garcia, T-C et al. Science

2007; Mathur, Eff Darwich, Garcia & T-C 2008



Modes acoustiques

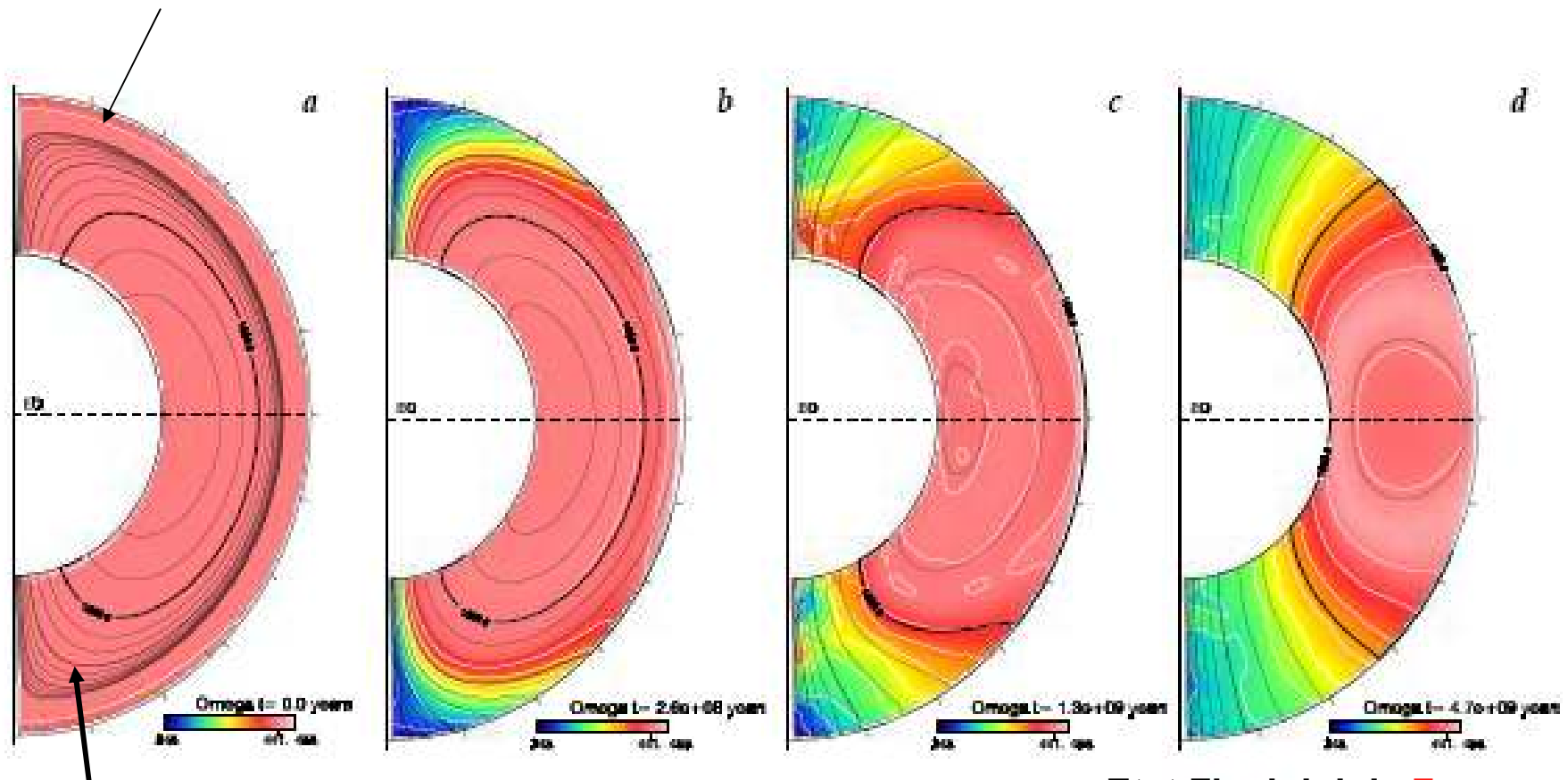


Modes de gravité

Modèle 3D de la région radiative entre 0.3 et 0.7 R_{sol}

Brun & Zahn 2006, A&A

Sommet de la région radiative cisillée par la rotation différentielle



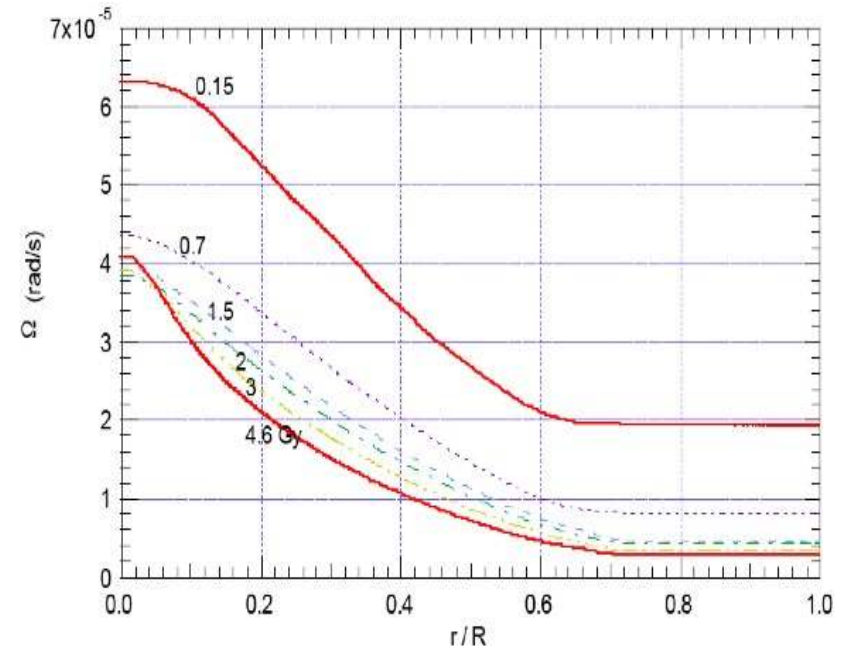
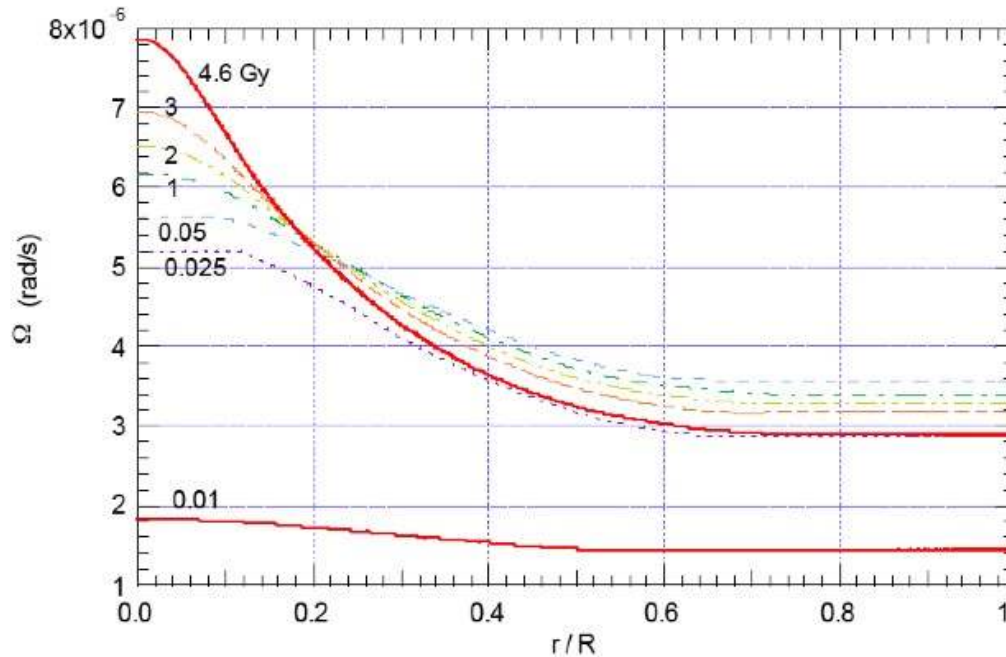
Champ fossile

Etat Final: loi de **Ferraro**
d'isorotation à l'âge solaire

Interaction entre le champ fossile et la propagation de la rotation différentielle vers l'intérieur

Modèle 1D CESAM du Soleil

avec inclusion des phénomènes de transport du moment angulaire et des espèces chimiques Mathis & Zahn 2004



Palacios, Nghiem, T-C 2008

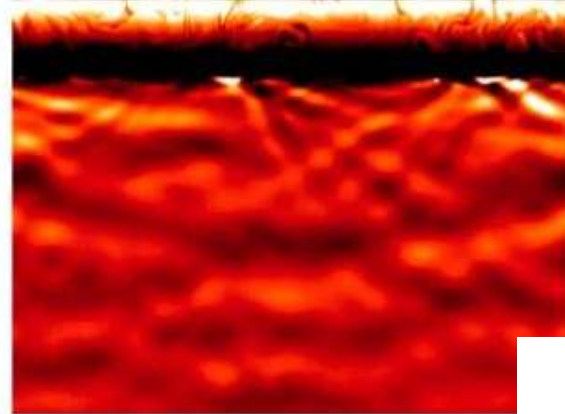
Les processus engendrés par la rotation ne suffisent à interpréter ma courbe de rotation observée

Ondes de gravité

Small Subadiabaticity
"Soft" boundary



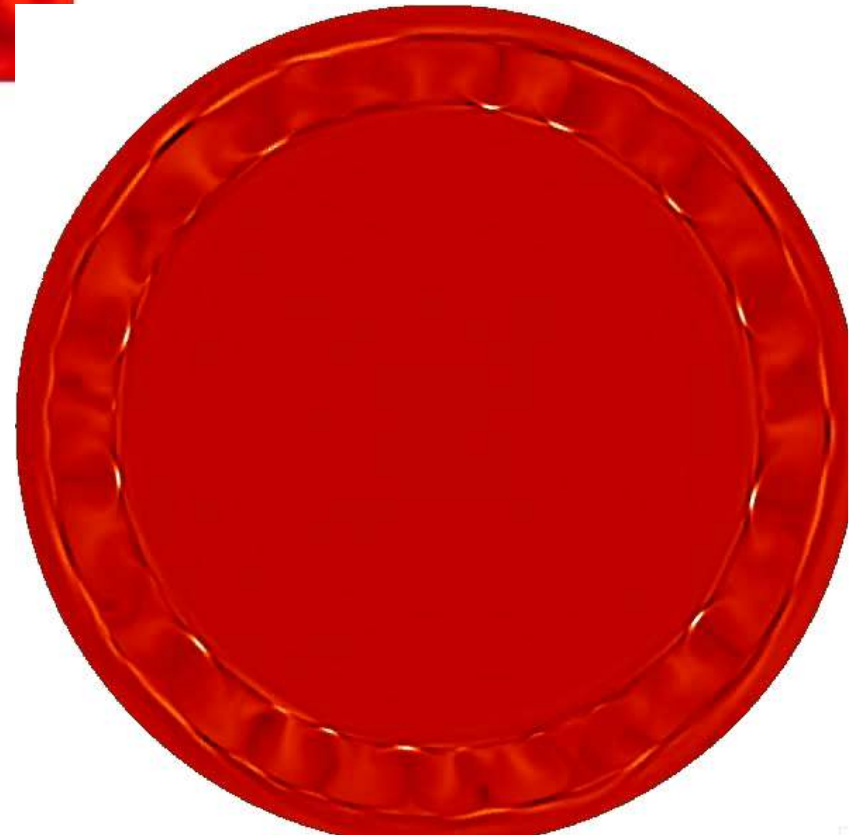
Large Subadiabaticity
"Stiff" boundary



T Rogers, Glatzmaier
2004, 2005

La différence de propagation des ondes progressives rétrogrades et progrades pourrait générer des périodicités non encore exploitées

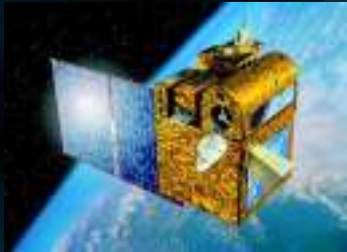
Talon & Zahn 1997, Talon 2006,
Mathis 2008



Les missions spatiales à venir...



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



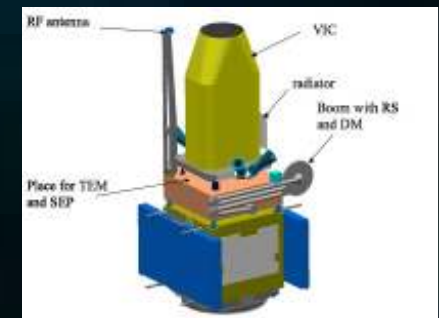
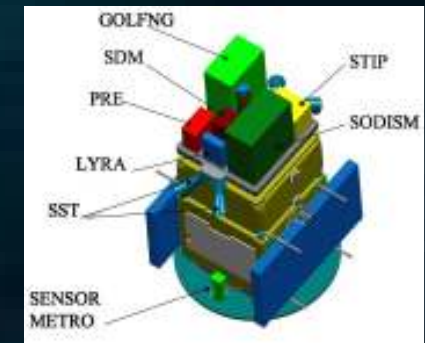
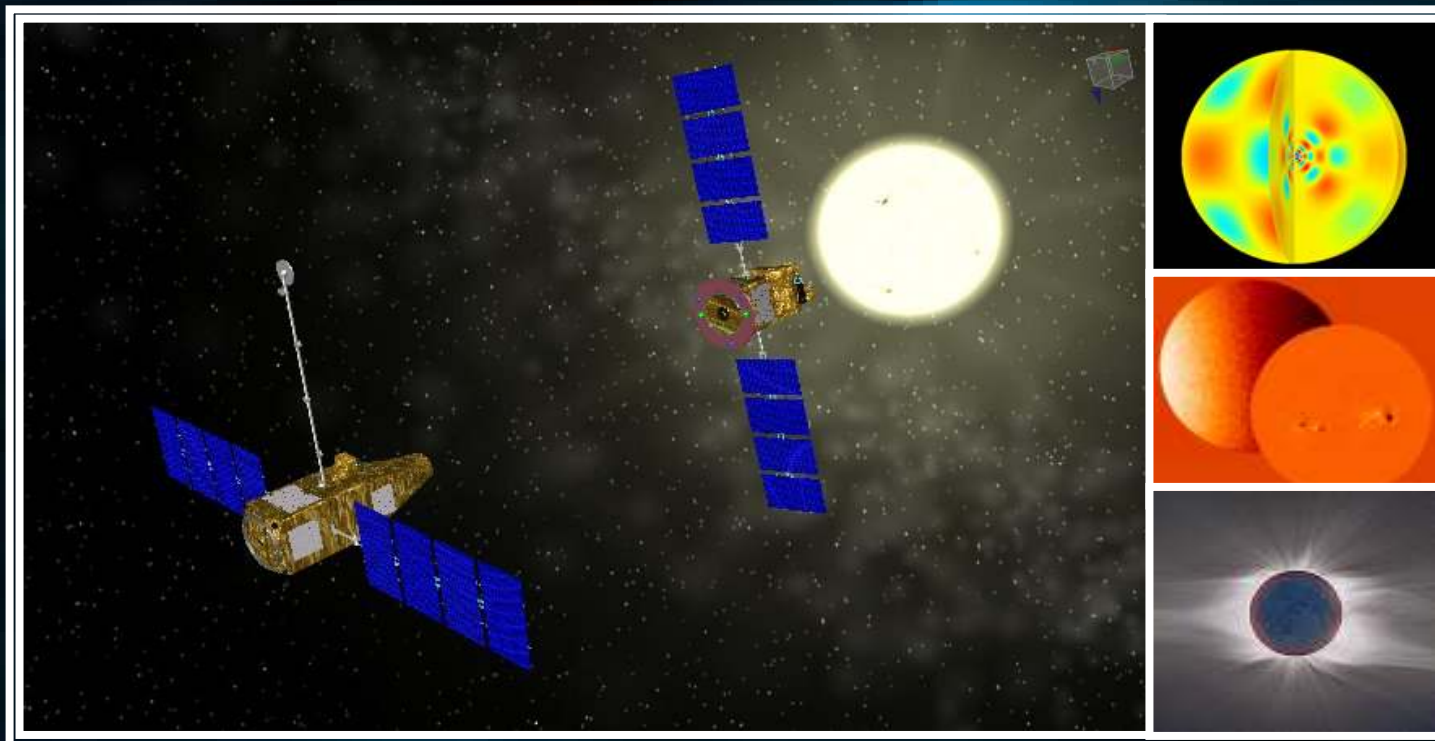
PICARD CNES Launch: 2009 SODISM (low l and g
modes) to study of the Earth climate and Sun
variability relationship



Solar Orbiter ESA Launch: 2015 (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

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



DYNAMICCS/HIRISE ESA Cosmic Vision + de 30 institutes

Les questions ouvertes sur le Soleil interne

Définir sans ambiguïté la rotation du cœur solaire et l'ordre de grandeur du champ magnétique central

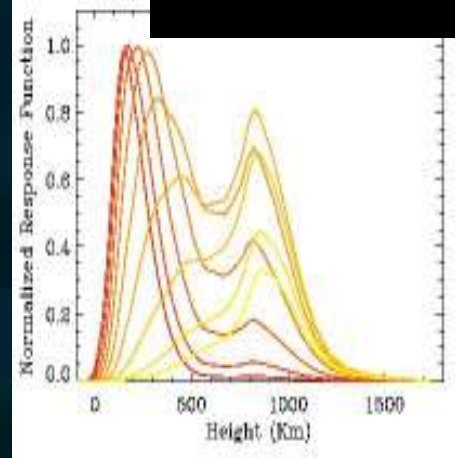
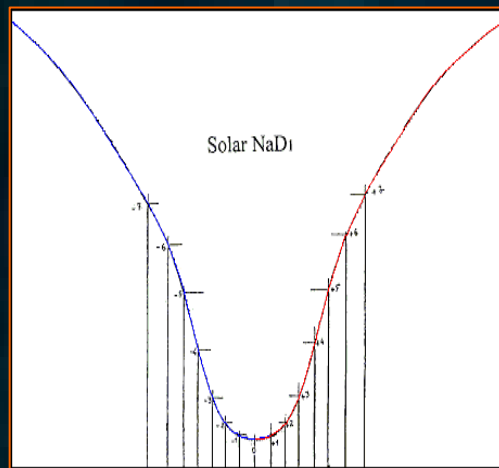
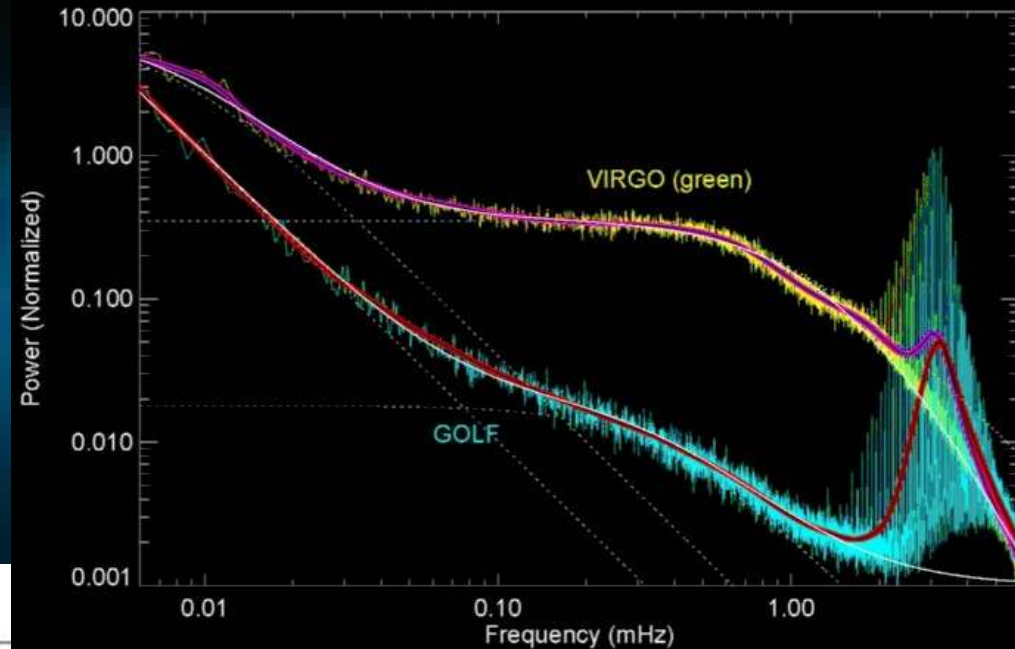
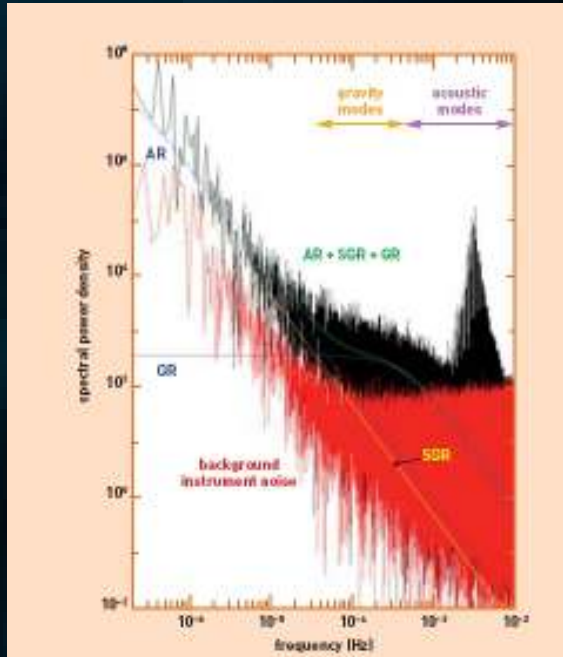
Définir l'interaction entre champ magnétique de la région radiative et celle de la région convective

Comprendre sans ambiguïté les grands minima: un seul type de dynamo, ou une autre dynamo dans le cœur ou des pulsations liées aux ondes internes

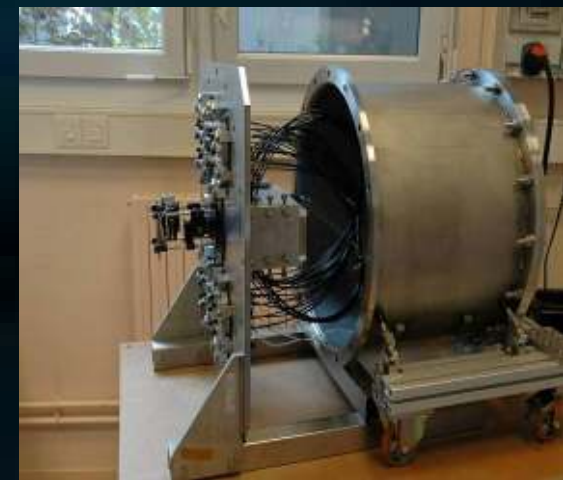
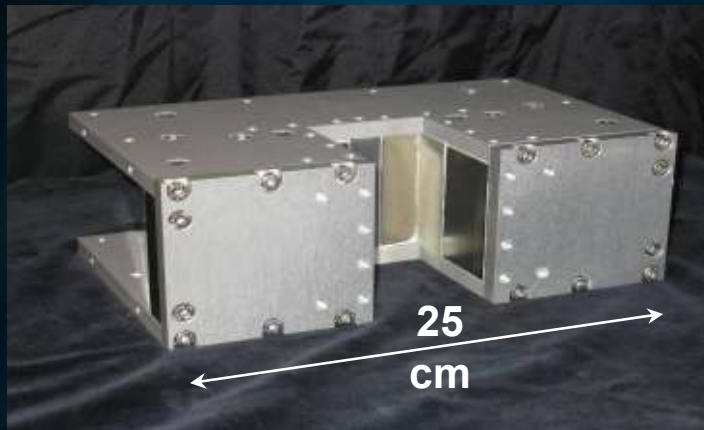
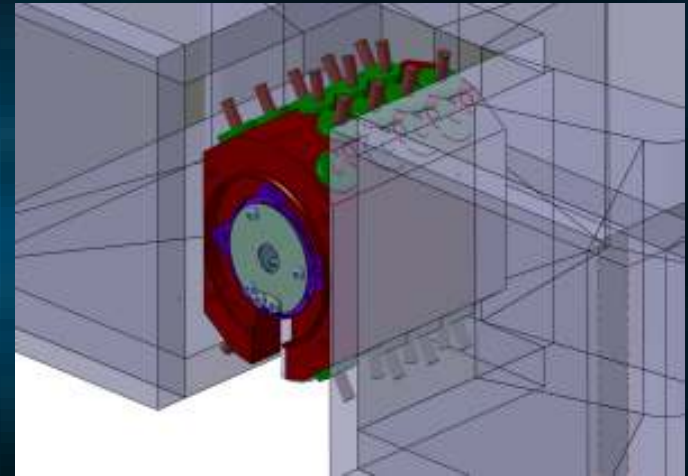
Prédire l'activité du prochain siècle et quantifier réellement l'impact du Soleil sur le climat de la Terre

L'instrument GOLFNG/CEA

progrès sur le cœur solaire et atmosphère

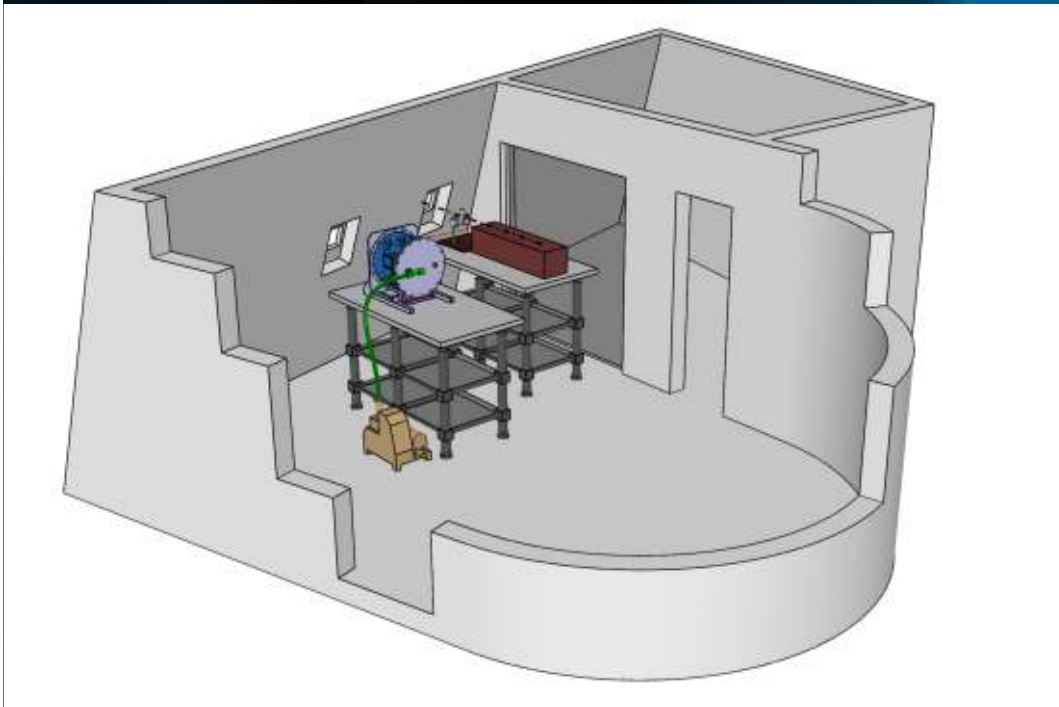


L'instrument prototype GOLF-NG pour préparer les futures observations spatiales



Etude du principe de mesures à Ténérife, puis Dôme C

Mai 2008



Sylvaine Turck-Chièze Collège de France 30 Mai 2008

Objectives Scientifiques de DynaMICCS

Etude de toutes les quantités globales venant du Soleil

- ① **Etudier les processus dynamiques internes: rotation, champ magnétique, circulations: modes de gravité et acoustiques**
- ① **Etude de la photosphère à la chromosphère: irradiance à différentes longueurs d'onde, caractéristiques de la granulation, rôle du champ magnétique**
- ② **Etude de la basse couronne, du vent solaire**
- ③ **Imageurs pour voir les CME dans l'héliosphère**

Objectives Scientifiques de KuaFu-B

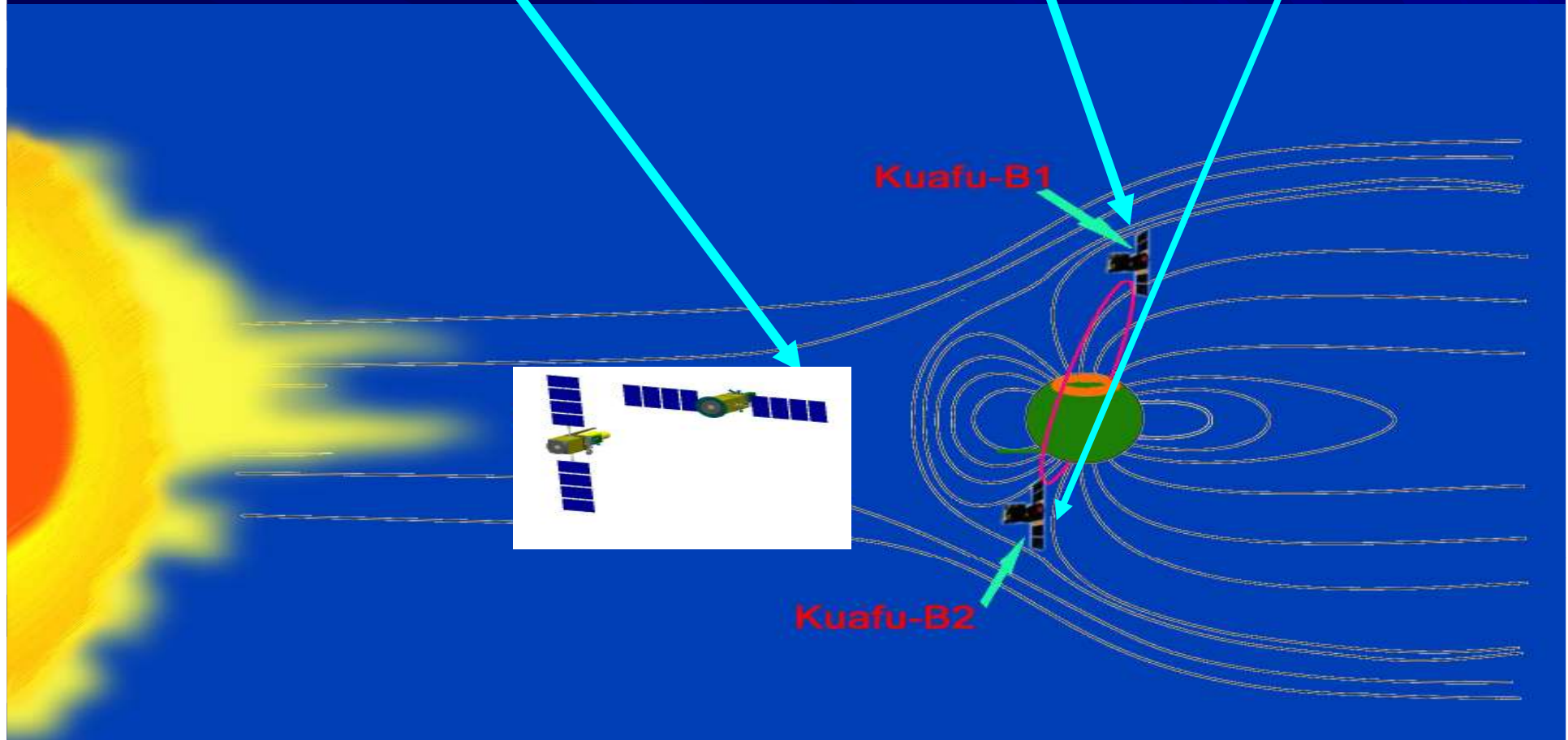
Etude de l' environnement terrestre et sa réponse au vent solaire

- ① **Etudier les processus dominant créant les orages et les sous orages magnétiques**
- ① **Etude des changements temporels d'état du courant global**
- ② **Comprendre comment la magnétosphère, l'ionosphère et la thermosphère forment un système couplé, complexe et multi-échelle à travers les field-aligned currents (FACs)**
- ③ **Comprendre les processus dynamiques de la géosphère**

La mission idéale

DynaMICCS: située comme SoHO au point Lagrange **L1** (150 million km de la Terre)

KuaFuB1+B2: en orbite polaire (1.8—7Re)



夸父计划— Synthèse de KuaFu et DynaMICCS

Conclusion

L'idée qui consiste à considérer la variation de 0.1% de l'irradiance totale comme unique contribution solaire à l'évolution climatique de la Terre est une vision à minima

Il faut comprendre les mécanismes internes qui provoquent les variabilités solaires pour interpréter le passé et comprendre l'évolution future

Comprendre le rôle du Soleil sur le climat de la terre suppose la maîtrise:

- de l'évolution de son insolation
- de l'impact de ses différentes composantes sur la magnétosphère et l'atmosphère terrestre

Estimer **quantitativement** le rôle du Soleil sur la Terre demande **une activité dédiée** et **des observations continues et simultanées** du Soleil (interne-externe), de la Magnétosphère et de l'Atmosphère terrestre: **Projet DynaMICCS + Kua Fu B**

Ce travail est nécessaire et urgent pour générer des modèles climatiques incontestables et convaincre les politiques **des grands pays industriels** de la nécessité des mesures à effectuer sur le rôle anthropique

Sommes nous prêts ?

- Progrès considérables au cours de la dernière décennie: instrumental et numérique
- Modèles 2D et 3D: front de la vague, bourse ERC, CCRT (montée en puissance des calculateurs)
- Projets spatiaux lancés en 2009: SDO et PICARD (microsatellite CNES) pour faire avancer ce thème
- Encore des incertitudes importantes sur 3 régions solaires clefs: cœur, chromosphère, basse couronne et sur le couplage magnétosphère, ionosphère, thermosphère terrestre.
- Soutenir un projet tel que DynaMICCS + KuaFu B en Europe et dans le monde permettra de converger vers une estimation argumentée du rôle du Soleil sur le climat de la Terre

Historique au CEA

- 1985: développement d'un modèle standard du Soleil avec prédiction des neutrinos: *Turck-Chièze et al., 1988, ApJ et suivants*
- 1988: Développement de la sismologie théorique implantée en France depuis 1980
- 1990: Participation à la réalisation de l'instrument GOLF /SoHO
- 1995: LANCEMENT du satellite SOHO
- 2001: 1^{ER} modèle sismique: *Turck-Chièze et al., 2001, ApJ*
- 2003: implantation de modèles 3D MHD de portions de Soleil: *Brun, 2003, ApJ et suivants*
- 2004-2007: Mise en évidence de modes de gravité: Turck-Chièze, Garcia et al. 2004 ApJ, Garcia, T-C et al Science 2007
- Prototype GOLFNG pour une meilleure détection des modes de gravité *Turck-Chièze et al., 2006, Adv. Space Res.*
- 2005-2007: Projet DynaMICCS proposé à l'ESA, *Turck-Chièze et al. Exp. Astron. 2008*
- 2007: Résolution d'un code de dynamo 2D: *Jouve & Brun A&A 2007*
- Développement du formalisme pour introduction du champ magnétique et ondes internes: *Mathis, Duez et al. 2008*

Généralisation à d'autres étoiles

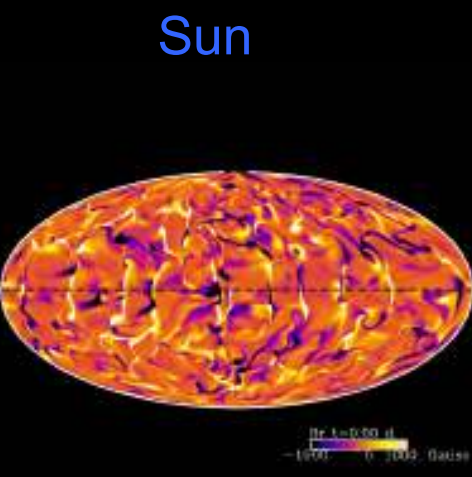
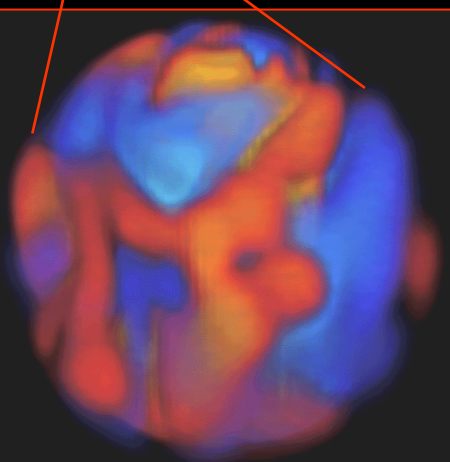


Massive Stars

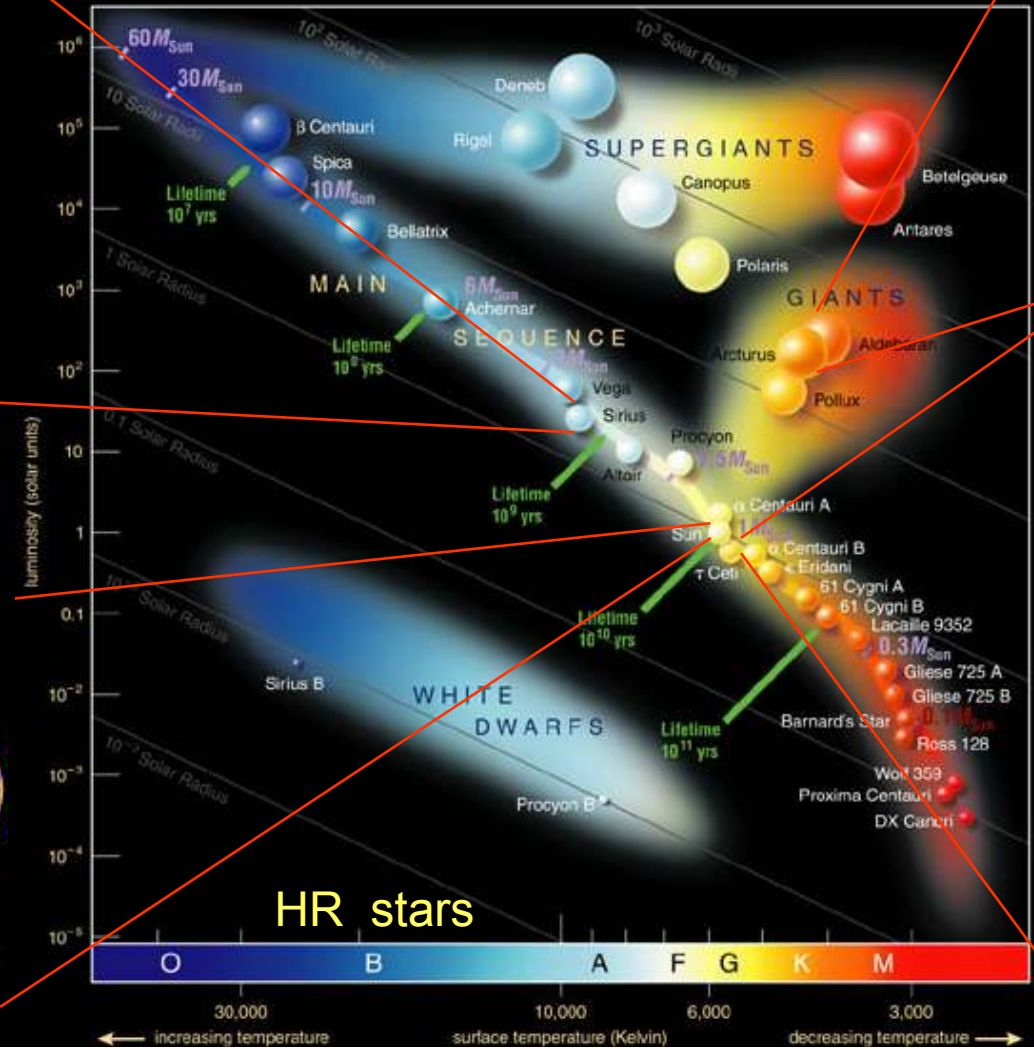
Développement de l'astérosismologie + Magnétisme externe (RGB)

Corot/Espadon/XMM

(Ballot et al. 2004, Brun et al. 2004, 2005, 2006)

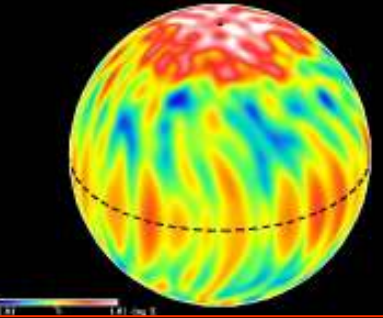
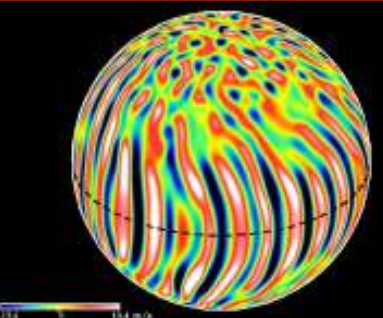
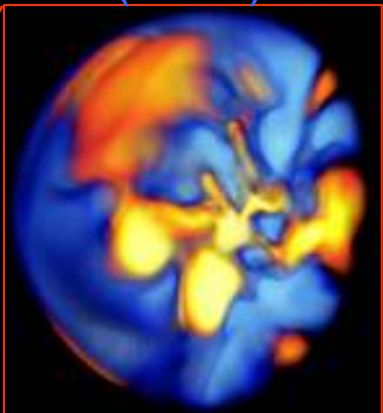


Sun



HR stars

Evolved Stars



Young stars