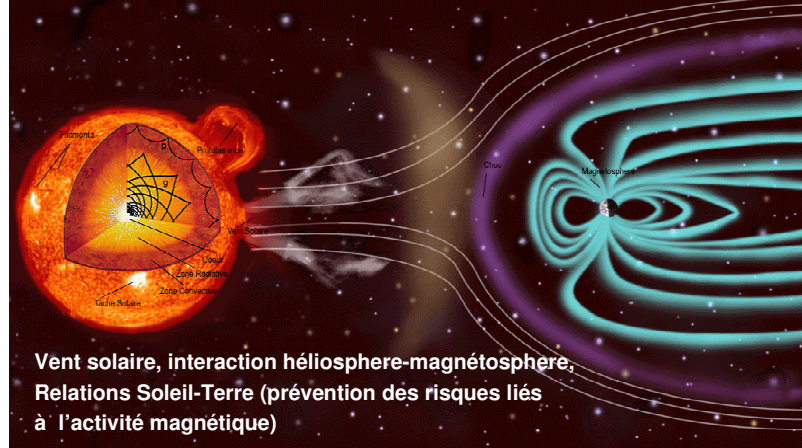


# Dynamo Solaire: Observations & Modèles



Vent solaire, interaction héliosphère-magnétosphère,  
Relations Soleil-Terre (prévention des risques liés  
à l'activité magnétique)

Allan Sacha Brun  
Service d'Astrophysique, CEA-Saclay

GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

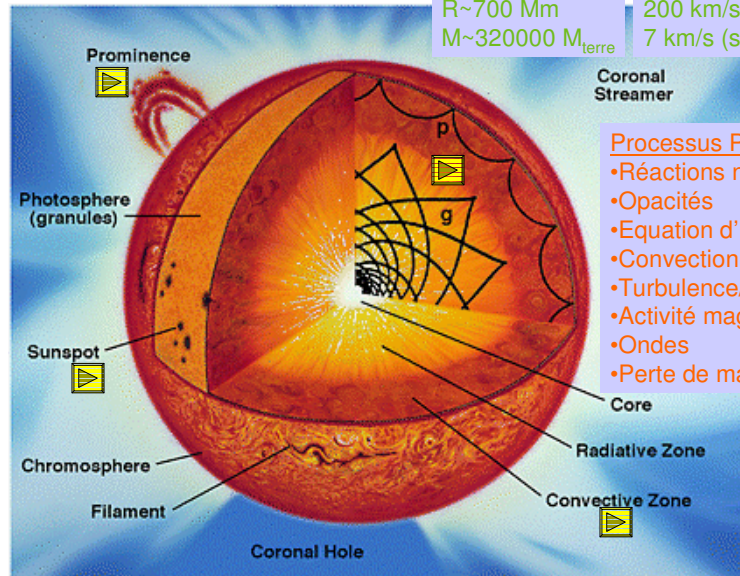
03/06/03

1

## Le Soleil: Vue Schématique

$T_c \sim 15 \times 10^6 \text{ K}$   
 $\rho_c \sim 155 \text{ g/cm}^3$   
 $R \sim 700 \text{ Mm}$   
 $M \sim 320000 M_{\text{terre}}$

Vitesse du Son:  
500 km/s (coeur)  
200 km/s (base zc)  
7 km/s (surface)



### Processus Physiques:

- Réactions nucléaires
- Opacités
- Equation d'état
- Convection
- Turbulence/mélange
- Activité magnétique
- Ondes
- Perte de masse

GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

2

## Échelles Spatio-Temporelles dans la Zone Convective Solaire

**L'Ordre dans le Chaos!**

**Really big stuff:**  
Flares,  
Coronal holes,  
CMEs

**Giant cells?:**  
200+ Mm  
10-20 days

**Supergranulation:**  
30-50 Mm  
20 hours

**Mesogranulation?:**  
7-10 Mm  
2 hours

**Granulation:**  
1-2 Mm  
5 mins

**Smaller stuff:**  
Intergranular lanes,  
magnetic bright  
points, diffusion

GDR-Dynamo      Allan Sacha Brun      03/06/03      3

## Cycle Solaire Magnétique 23

(Données EIT, LASCO & MD (satellite SoHO))

**Cycle 23 Sunspot Number Prediction (May 2003)**

200  
150  
100  
50  
0

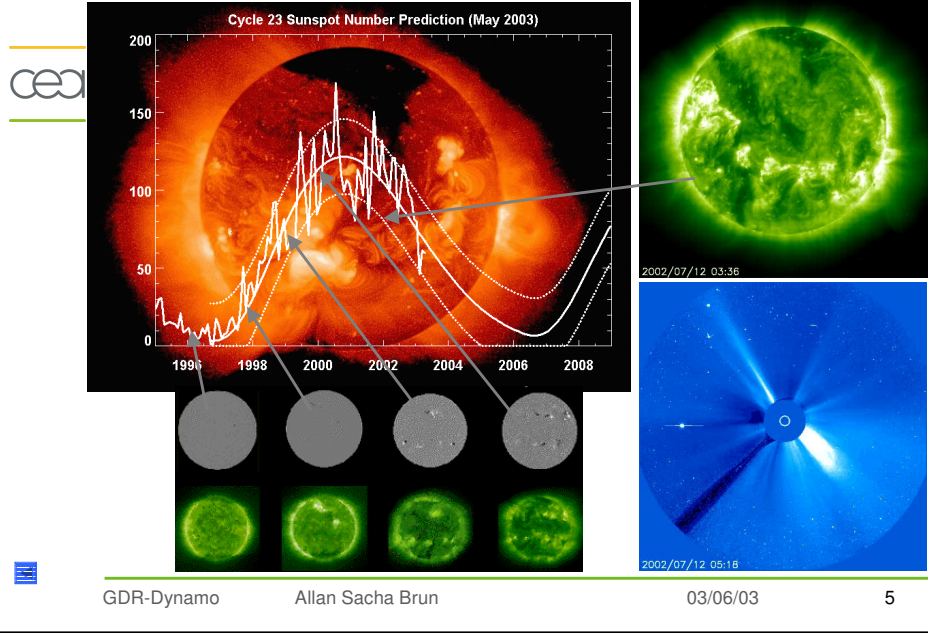
1996    1998    2000    2002    2004    2006    2008

2002/07/12 03:36

GDR-Dynamo      Allan Sacha Brun      03/06/03      4

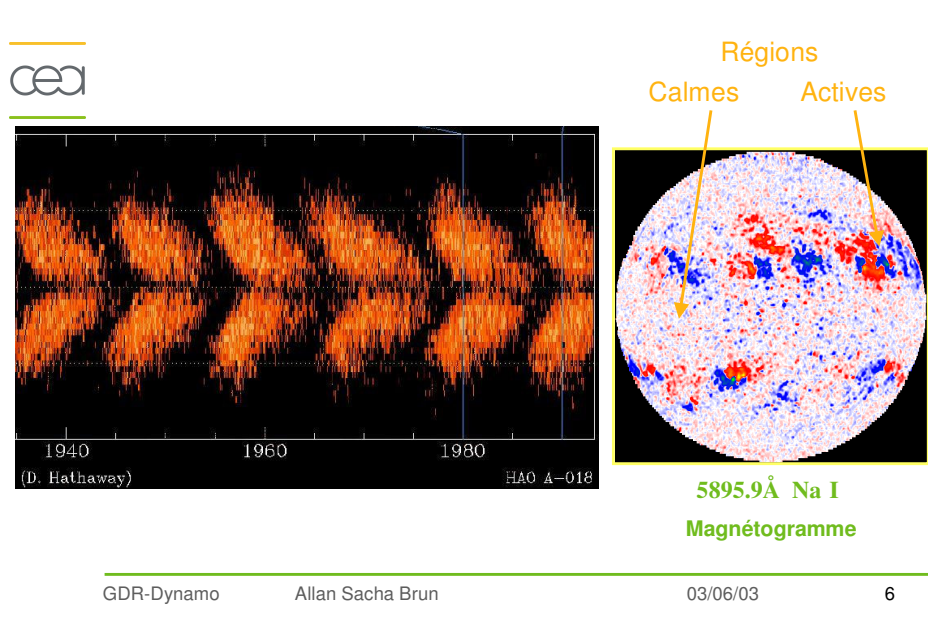
## Cycle Solaire Magnétique 23

(Données EIT, LASCO & MD (satellite SoHO))



## Diagramme Papillon et Aspect Poivre-Sel

(Données HAO/SMM, Mont Wilson)



## Principales Caractéristiques de la Dynamo Solaire

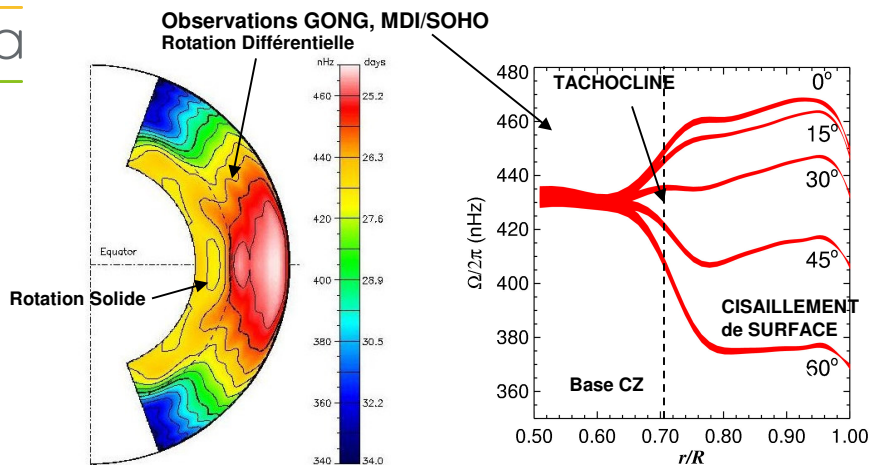


1. Un cycle total de **22 ans**
2. Dynamo **petites et grandes** échelles
3. **Diagramme papillon** (Hale law) du champ toroidal restreint dans une bande équatoriale +/- 30 deg
4. **Tilt** de 10 deg des régions bipolaires (Joy's law), **polarité inversée** entre hémisphère nord et sud pour le "leading spot"
5. Un champ poloidal **migrant** des moyennes latitudes aux **poles**
6. Un **déphasage de 90 deg** entre le champ de surface aux poles avec le champ toroidal en profondeur, de sorte que le champ polaire se renverse (- -> +) quand Btor est maximal (+)
7. Btor ~ **10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> G** dans la tachocline
8. Bpol ~ **10 G** aux poles en surface



## Profil de Rotation du Soleil

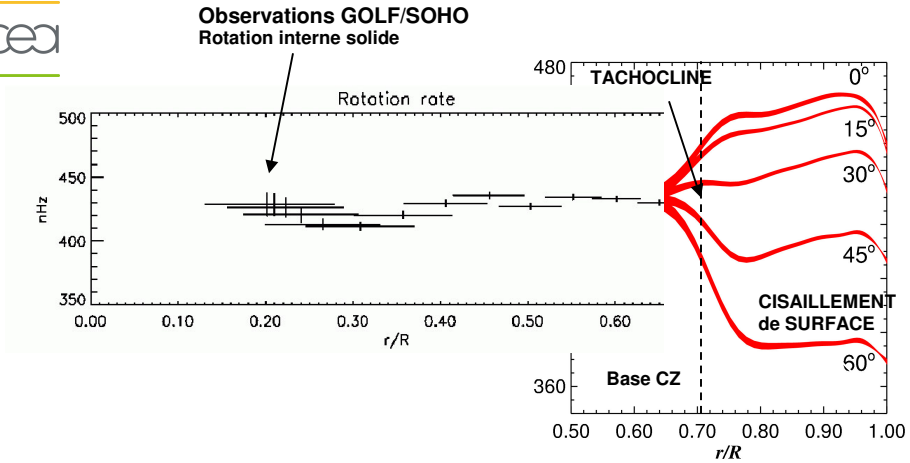
(Données GONG, MDI)



(Thompson et al. 1996, Schou et al. 1998, Garcia et al. 2003)

## Profil de Rotation du Soleil

(Données MDI et GOLF)



(Thompson et al. 1996, Schou et al. 1998, Garcia et al. 2003)

GDR-Dynamo

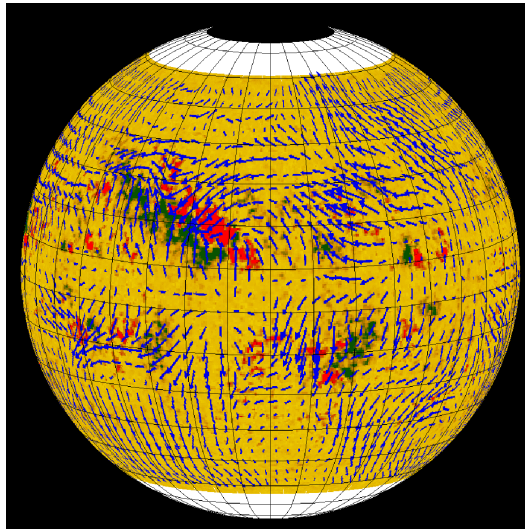
Allan Sacha Brun

03/06/03

9

## Flots a la surface du Soleil

(Données MDI)



(Haber et al. 2002)

GDR-Dynamo

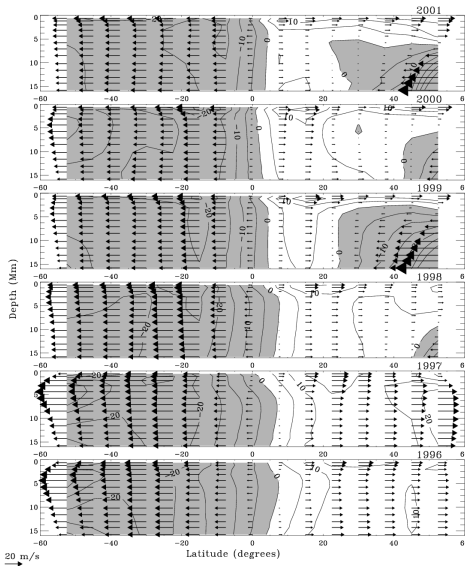
Allan Sacha Brun

03/06/03

10

## Circulation Méridienne du Soleil

(Données MDI)



(Haber et al. 2002)

GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

11

## Modèles Numériques de Dynamo Solaire



Principalement 2 approches:

1. Modèles type champs moyens
2. Modèles 2-D, 3-D non-linéaires

Principalement 2 Modèles:

1. Modèles de type alpha-dynamo (interface, Parker 1993)
2. Modèles de type "Babcock-Leighton" ou Flux transport (Babcock 1961, Leighton 1969)

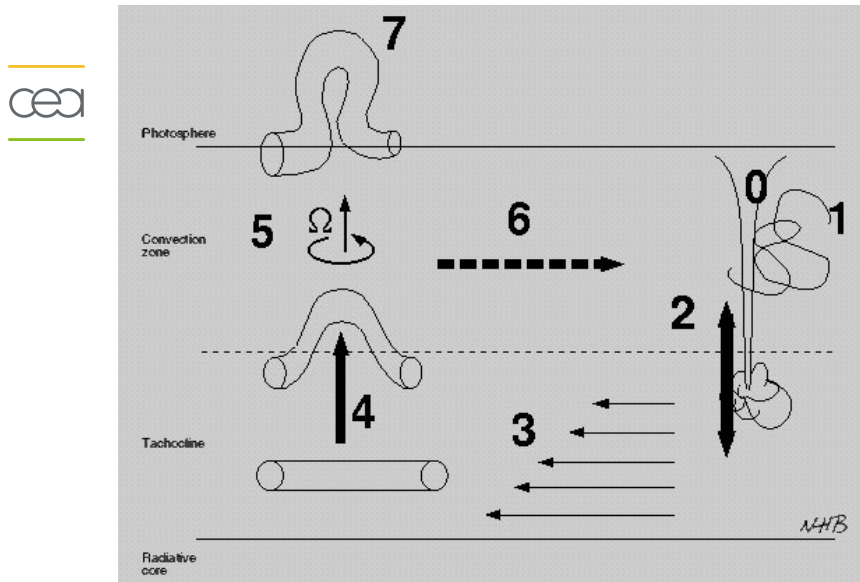
GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

12

## Cycle Solaire Théorique (interface)



GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

13

## Modèles Dynamo Champs Moyens:

- Résolvent équation d'induction en axisymétrique (donc introduction d'un terme pour satisfaire Cowling anti-dynamo théoreme)
- C'est l'effet **alpha**, toroidal  $\rightarrow$  poloidal
- Ou un terme **source de surface S**, toroidal  $\rightarrow$  poloidal
- Assument un profil de rotation  $\Rightarrow$  effet **Omega** (pol $\rightarrow$ tor)
- Régime **cinématique** (pas de retour sur champ de vitesse)
- Certains modèles prescrivent aussi une **circulation méridienne**

**Plus:** rapide donc large étude d'espace de paramètres  
paramétrisation de alpha permet un réglage fin,  
résultats comparable aux observations

**Moins:** cinématique, prescrit alpha, Omega  
(éventuellement déduit de l'héliosismologie), MC (si présente) et mag diffusivité de manière non consistante

GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

14

## Champs magnétiques moyens

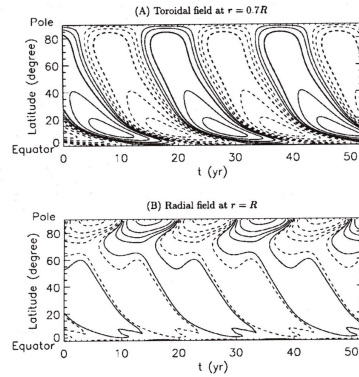


FIG. 7.—Butterfly diagrams for a solar-like solution. The format and contour level spacing is identical to Fig. 3. This solution is produced using parameter values  $u_0 = 1500 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $s_0 = 20 \text{ cm s}^{-1}$ , and  $\eta_F = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , corresponding to  $C_{\alpha} = 4.7 \times 10^3$ ,  $C_{\beta} = 4.64$ , and  $R_m = 348$ . It is characterized by a cycle period  $T = 19.8 \text{ yr}$ , maximum toroidal field strength below the interface  $B_{\text{max}} = 10 \text{ kG}$ , and maximum surface polar field  $B_{\text{max}} = 140 \text{ G}$ . Note how the surface polar field (b) changes sign as the low-latitude toroidal field on (a) is maximal in amplitude.

(Charbonneau et Dikpati 2001)

(Parker 1955  
Babcock 1961  
Leighton 1969,  
Wang et al. 1971,  
Roberts & Stix 1972  
Parker 1993  
Chouduri et al. 1995  
Durney 1995,...  
Rudiger & Brandenburg 1995  
Charbonneau & Mc Gregor 1996  
Tobias 1996  
Kuker et al. 2001  
Charbonneau et Dikpati 2001  
et bien d'autres....)

## Champs magnétiques moyens

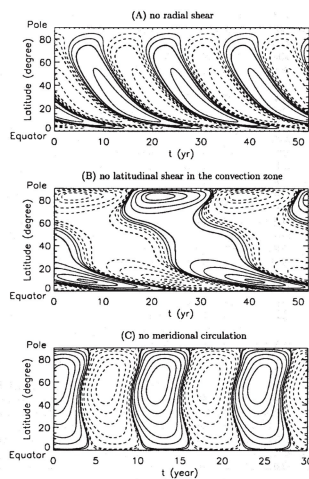


FIG. 4.—Three toroidal field butterfly diagrams resulting from various numerical “surgical” experiments. The format is the same as in Fig. 3a. (a) Solution where the radial shear was artificially shut off, with only the latitudinal shear left to contribute to the generation of toroidal fields. (b) Opposite experiment, i.e., the latitudinal shear has been artificially shut off. For these two solutions all parameter values are otherwise identical to the reference solution of Figs. 2 and 3. (c) Solution where the meridional circulation has been turned off. The resulting butterfly diagram bears a striking resemblance to that produced by mean field interface dynamics (see text).

Diagramme papillon

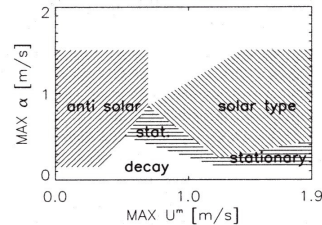


Fig. 11. The different types of solution found for varying strengths of the  $\alpha$ -effect and the flow speed. The terms *solar type* and *anti solar* refer to equatorward and poleward drifting field belts, respectively, while *stationary* refers to a stationary field. The magnetic diffusivity always has a value of  $10^{11} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

(Charbonneau et Dikpati 2001,  
Kuker et al. 2002)



## Modèles Dynamo Non-linéaires:

- Résolvent les équations de la Magnétohydrodynamiques (donc pas de terme extra)
- Régime dynamique (retour sur champ de vitesse par Lorentz)
- Modèles avec ou sans convection
- Certains modèles prescrivent le cisaillement dans la tachocline

**Moins:** lent donc petite étude d'espace de paramètres, Building blocks pas de modèle complet, donc difficile de comparer avec observations

**Plus:** dynamique, effet alpha, Omega et MC de manière non consistante, 3D (variations longitudes)

## Equations MHD

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{D}}{\rho} - g \hat{r} + 2\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega} + \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

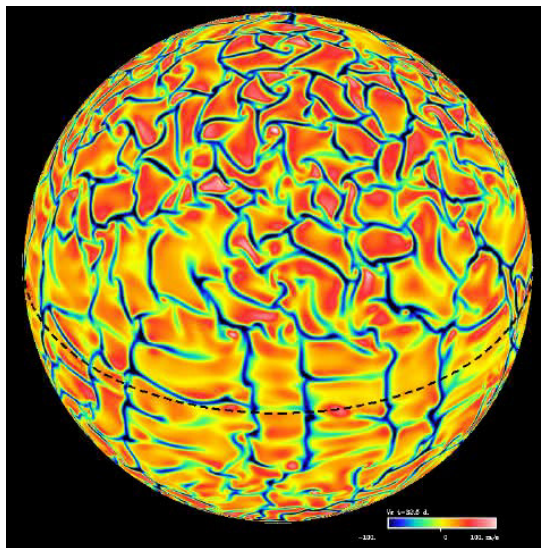
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla S = \frac{1}{\rho T} \nabla \cdot (\kappa \rho T \nabla S + \kappa_r \rho c_p \mathbf{v} T) + \frac{2\nu}{T} [\mathbf{e}_{ij} \mathbf{e}_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v})^2] + Q_{\text{ohm}}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B})$$

**Cas d'un fluide compressible stratifié sous l'influence de la rotation et du champ magnétique**

## Mouvements Convectifs (vitesse radiale $V_r$ )

Simulations 3D sur ordinateurs massivement parallèles



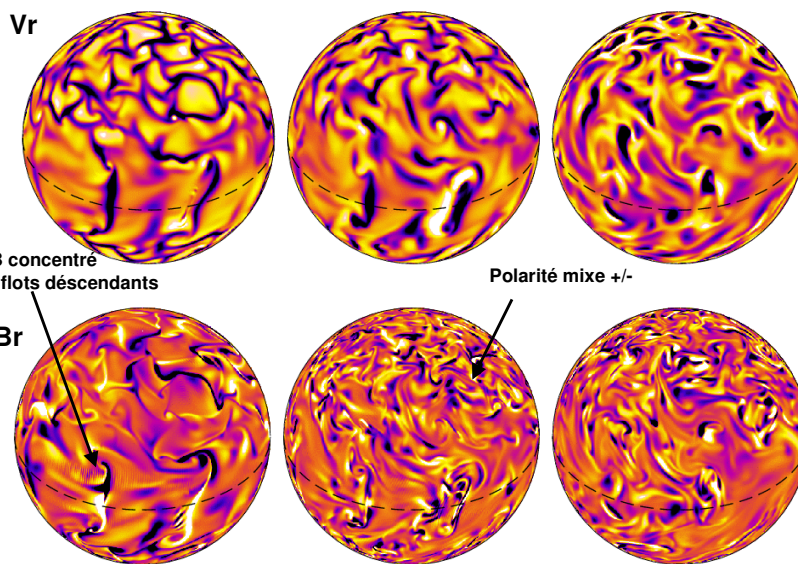
GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

03/06/03

19

## Convection Magnétique



GDR-Dynamo

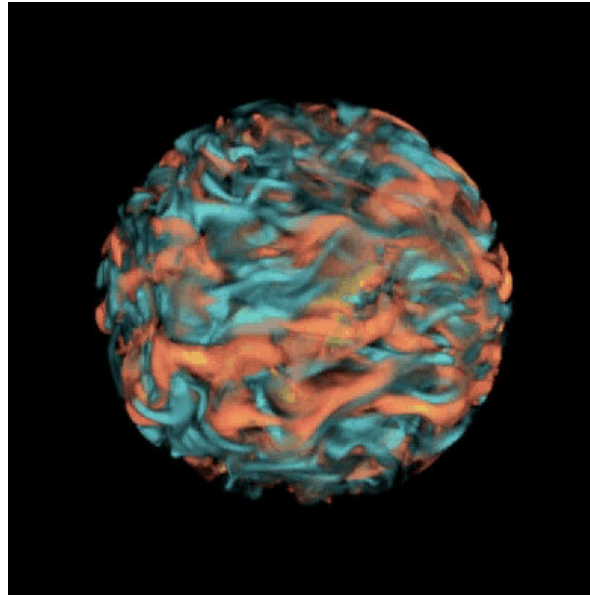
Allan Sacha Brun

03/06/03

20

## Convection Magnétique (champ longitudinal)

cea



GDR-Dynamo

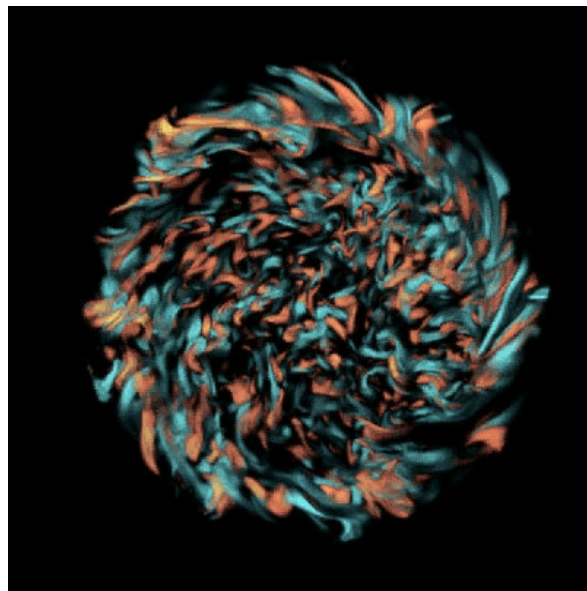
Allan Sacha Brun

03/06/03

21

## Convection Magnétique (champ longitudinal)

cea



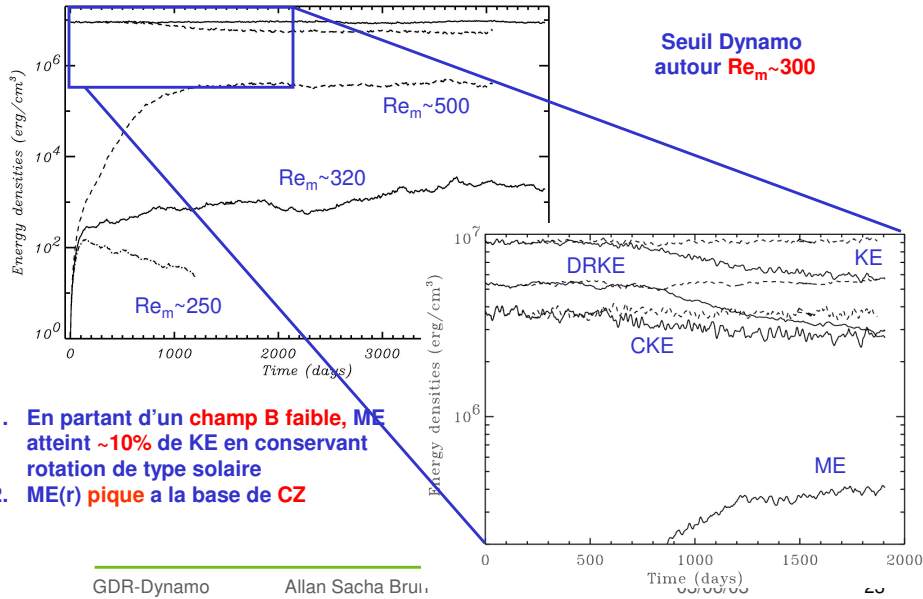
GDR-Dynamo

Allan Sacha Brun

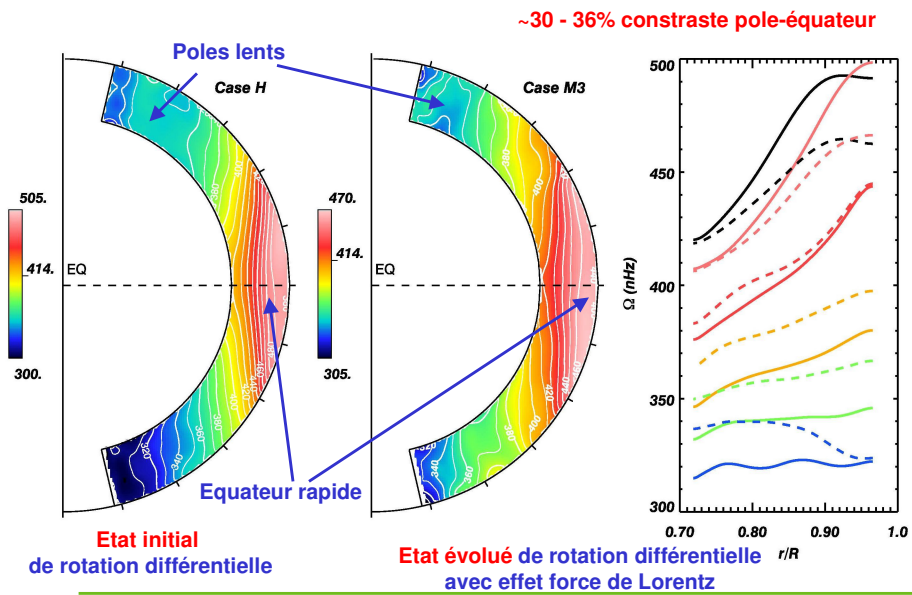
03/06/03

22

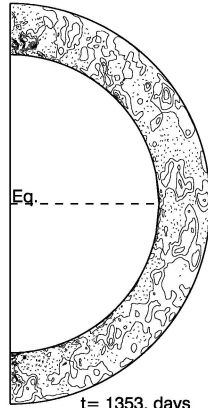
## Effet Dynamo – Energie Magnétique



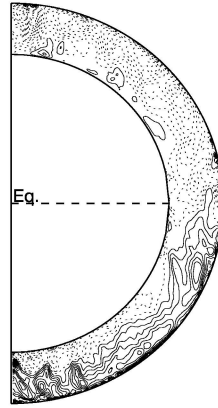
## Vitesse Angulaire $\Omega$ (avec et sans champ magnétique)



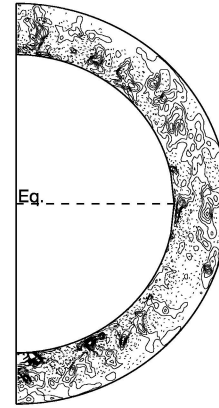
## Btor, Helicites Cinétiques et Magnétiques



t= 1353. days

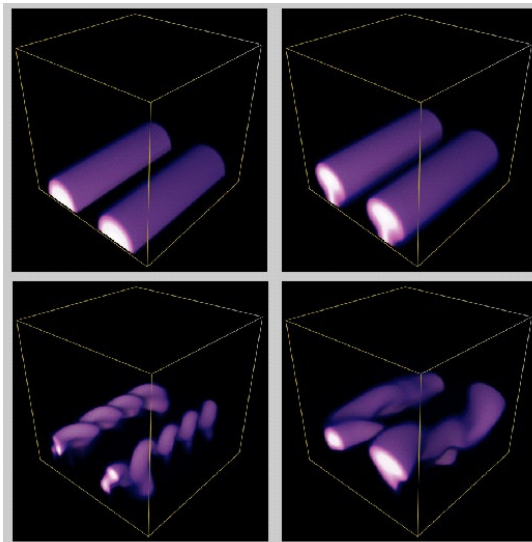


Kinetic Helicity t= 1353. da

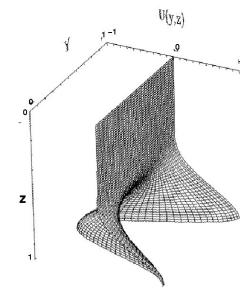


Magnetic Helicity t= 1353

## Formation et Émergence de Tubes de Champ dans la Tachocline



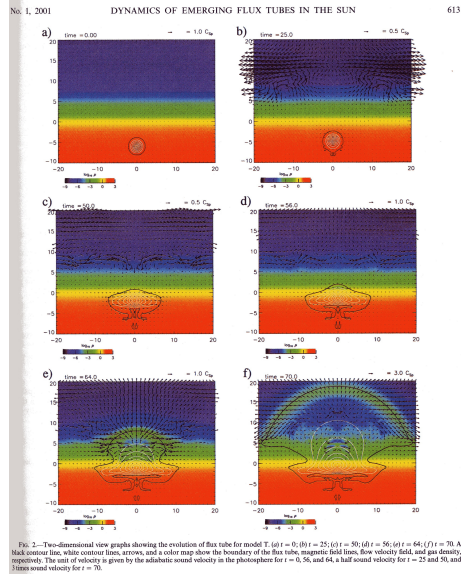
**Calcul NonLinéaire  
(absence de convection)**



**Cisaillement Imposé**



## Émergence de Tubes de Champ en Surface



(Galloway & Weiss 1981,  
Gliman 1993, Glatzmaier 1985,  
Brandenburg et al. 1993  
Fan 2001, Malgara 2001  
Moreno-Insertis & Emonet 1996  
Stein et Nordlund 1998  
Cattaneo 1999  
Zhang 2003, Busse....  
Tobias et al. 2001  
Brummell et al. 2002  
Cline et al. 2003, .....

En France plus particulièrement:

Belmont et Rezeau 2001 (magnetopause)  
Ponty et al 2001 (dynamo cinématique)  
Guermont et al 2003 (elements finis MHD)  
Marie et al 2003 (von karman)  
Brun et al. 2003 (dynamo dynamique)

## Minimum de Maunder (~1650-1715)



Origine stochastique ou chaos déterministe?

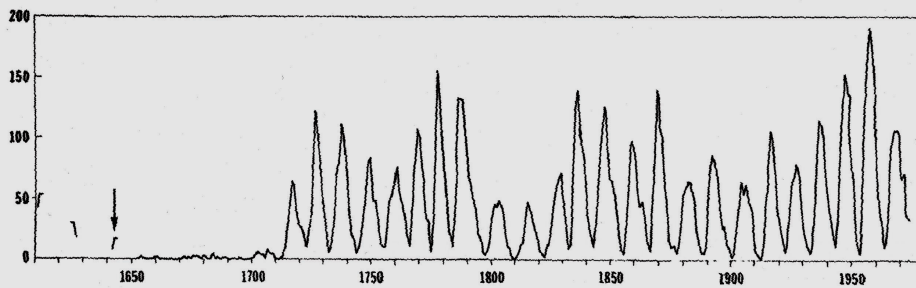


Fig. 1. Annual mean sunspot numbers, A.D. 1610–1974, from Waldmeier (1961) and Eddy (1976). Arrow marks the period of this study, 1642–1644.

(Eddy et al 1976)

## Evidences pour Activité Stellaire

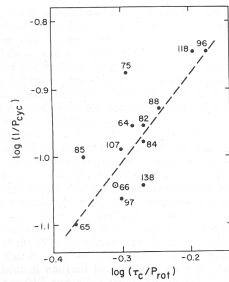


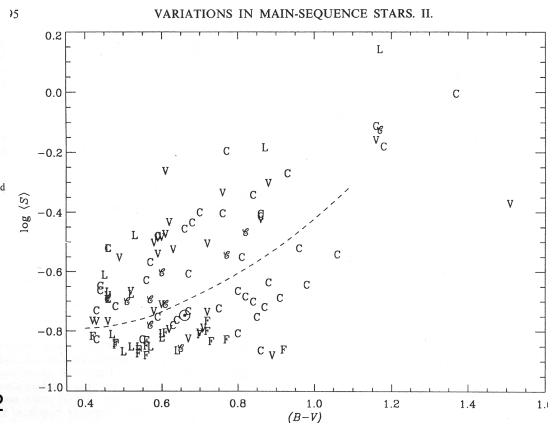
FIG. 2.— $\log(1/P_{cyc})$  vs.  $\log(t_c/P_{rot})$  for the stars of Table 1. The dashed line is a linear least squares fit to the data.

### Refs Observationnelles:

Wilson 1978  
 Durney et al. 1981  
 Noyes et al. 1984  
 Baliunas et al. 1995  
 Shorlin, ..., Donati et al 2002

### Bon traceur d'activité: raies Ca II

$$P_{cyc} \sim (P_{rot}/t_c)^{1.25} \text{ pour étoiles G2} \rightarrow \text{K7}$$



Activite stellaire 3 cas: **etoiles purement convectives, type solaire**  
**et etoiles massives avec coeur convectif**

## Conclusions (I)



- Le Soleil tourne **différentiellement** à sa surface du au couplage subtil entre rotation et convection
- L'**activité magnétique** solaire (cycle de 22 ans, éruptions, ...) peut être comprise par le phénomène physique de la **dynamo** à petites et grandes échelles
- Un **régime dynamo nonlinéaire** en convection-rotation peut être soutenu pour un nombre de Reynolds magnétique  $Rm = v_{rms} L / \eta \sim 300$
- Solutions peuvent être trouvées ou une **dynamo** et un profil de **rotation solaire** tant que **ME** n'est pas trop importante (~20% of KE), mais **P<sub>cyc</sub> trop court**

## Conclusions (II)



- **Maxwell stresses** accélèrent les poles
- Partie moyenne du champ magnétique 2-3 ordres de grandeur plus petite que fluctuations
- **Effet  $\alpha$**  est élevé dans la CZ, donc période trop courte
- La **tachocline** est une condition nécessaire pour comprendre le cycle de 22 ans solaire
- L' **émergence** de tube de champ a travers la zone convective nécessite un fort champ
- Le Soleil **présent** doit certainement avoir des **poles rapides** et un **équateur lent** pendant le minimum de Maunder (1650). Origine stochastique ou chaos déterministe?