

Master M1: module optique solaire



**Carte d'identité de
l'étoile Soleil**

CARTE D'IDENTITE DU
SOLEIL

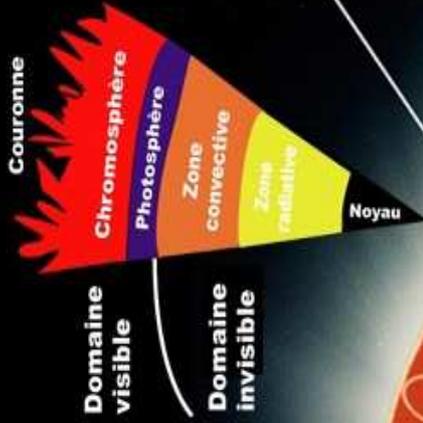
UNE ETOILE BANALE PARMIS
LES 200 MILLIARDS DE LA
GALAXIE

Couronne :

Atmosphère externe du soleil sans limite définie.

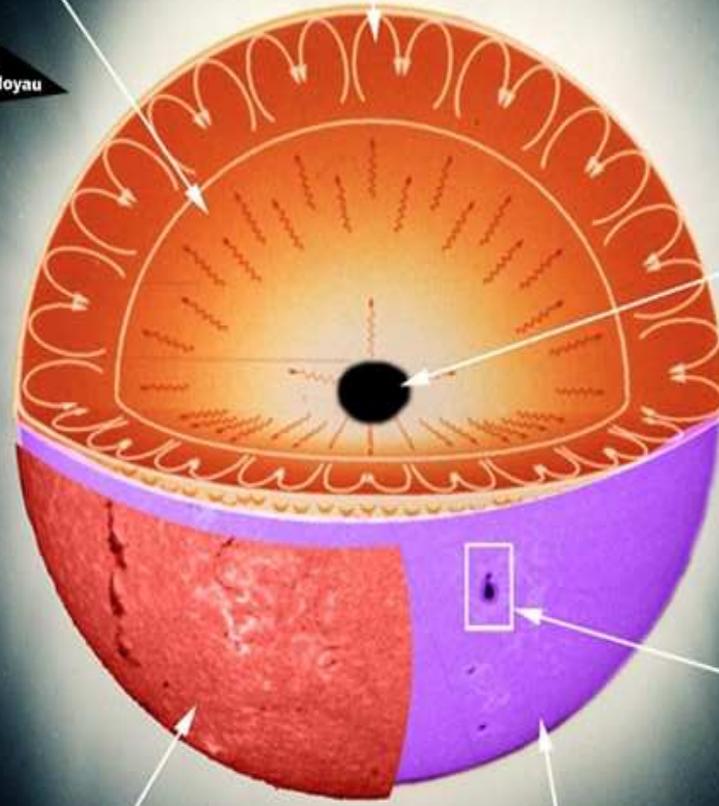
Chromosphère :

Couche très hétérogène. Epaisseur 2 000 à 3 000 km.



Zone radiative :
Transfert de l'énergie par rayonnement.

Zone convective :
Evacuation de l'énergie par mouvement (bouillonnement).



Noyau :

Très dense, très chaud; siège des réactions nucléaires qui fournissent l'énergie du soleil.

Taches :

Région sombre car plus froide, dû au champ magnétique plus fort. Plusieurs milliers de kilomètres.

Photosphère : et "surface" solaire.

Observable en lumière blanche ou dans la raie du calcium ionisé (K1v). Structure de petits grains brillants (1 000 km).

Quelques constantes solaires

$M_S = 2 \cdot 10^{30}$ kg masse solaire

$R_S = 696\,000$ km rayon solaire

$g_S = 275$ m/s² accélération de la pesanteur à la surface solaire

$L = 3.86 \cdot 10^{26}$ W luminosité solaire (luminosité d'1 m² : $6.3 \cdot 10^7$ W)

1 UA = 149 600 000 km distance moyenne Terre/Soleil

$T_e = 5750$ K température effective

Composition : H 92.1% et He 7.8%, autres éléments (O, C, N, Fe, Mg, Ca...) en trace (0.1%)

Rotation : 26 jours à l'équateur, 31 jours aux pôles, inclinaison de 6° sur l'écliptique

Photosphère solaire : 0 → 500 km d'altitude

Pression moyenne $P = 10^3$ Pa et variation de 0 à 500 km : $1.3 \cdot 10^4$ Pa → 10^2 Pa

T moyenne = 5000 K et variation de 0 à 500 km : 6400 K → 4170 K

Densité moyenne $N_H = 10^{22}$ m⁻³ ; variation de ρ de 0 à 500 km : $3 \cdot 10^{-4}$ kg m⁻³ → $3 \cdot 10^{-6}$ kg m⁻³

Densité moyenne $N_e = 10^{19}$ m⁻³ et variation de 0 à 500 km : $5 \cdot 10^{19}$ m⁻³ → 10^{17} m⁻³

Chromosphère solaire : 500 km → 2000 km d'altitude

Pression moyenne $P = 1$ Pa et variation de 500 à 2000 km : 10^2 Pa → 10^{-2} Pa

T moyenne = 8000 K et variation de 500 à 2000 km : 4170 K → 10000 K

Densité moyenne $N_H = 10^{19}$ m⁻³ ; variation de ρ de 500 à 2000 km : $3 \cdot 10^{-6}$ kg m⁻³ → $1.8 \cdot 10^{-10}$ kg m⁻³

Densité moyenne $N_e = 10^{17}$ m⁻³ et variation de 500 à 2000 km : 10^{17} m⁻³ → $4 \cdot 10^{16}$ m⁻³

Couronne solaire : 2000 km → milieu interplanétaire

Conductivité électrique $\sigma = 10^{-3} T^{3/2}$ MKSA, T en Kelvins

Conductivité thermique $k_{//} = 10^{-11} T^{5/2}$ MKSA, T en Kelvins

- Basse couronne typique: **totale**ment ionisée

$$n_p = n_e = 5 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3} \quad T = 1.5 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$P = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$$

$$\rho = 10^{-12} \text{ kg m}^{-3}$$

- à 1 rayon solaire :

$$n_p = n_e = 10^{12} \text{ m}^{-3} \quad T = 1.5 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$P = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}$$

$$\rho = 2 \cdot 10^{-15} \text{ kg m}^{-3}$$

- à 1 UA (orbite terrestre):

$$n_p = n_e = 10^7 \text{ m}^{-3} \quad T_p = 4 \cdot 10^4 \text{ K}$$

$$T_e = 1.5 \cdot 10^5 \text{ K}$$

$$\rho = 10^{-20} \text{ kg m}^{-3}$$

vitesse du vent solaire à la Terre: 400 km/s en moyenne

- milieu interplanétaire à grande distance: $n_p = n_e = 10^6 \text{ m}^{-3}$

Quelques constantes universelles

$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ vitesse de la lumière dans le vide

$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ masse de l'électron

$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ MKSA}$ constante de Planck

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ MKSA}$ constante de Boltzmann

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ MKSA}$ perméabilité magnétique du vide

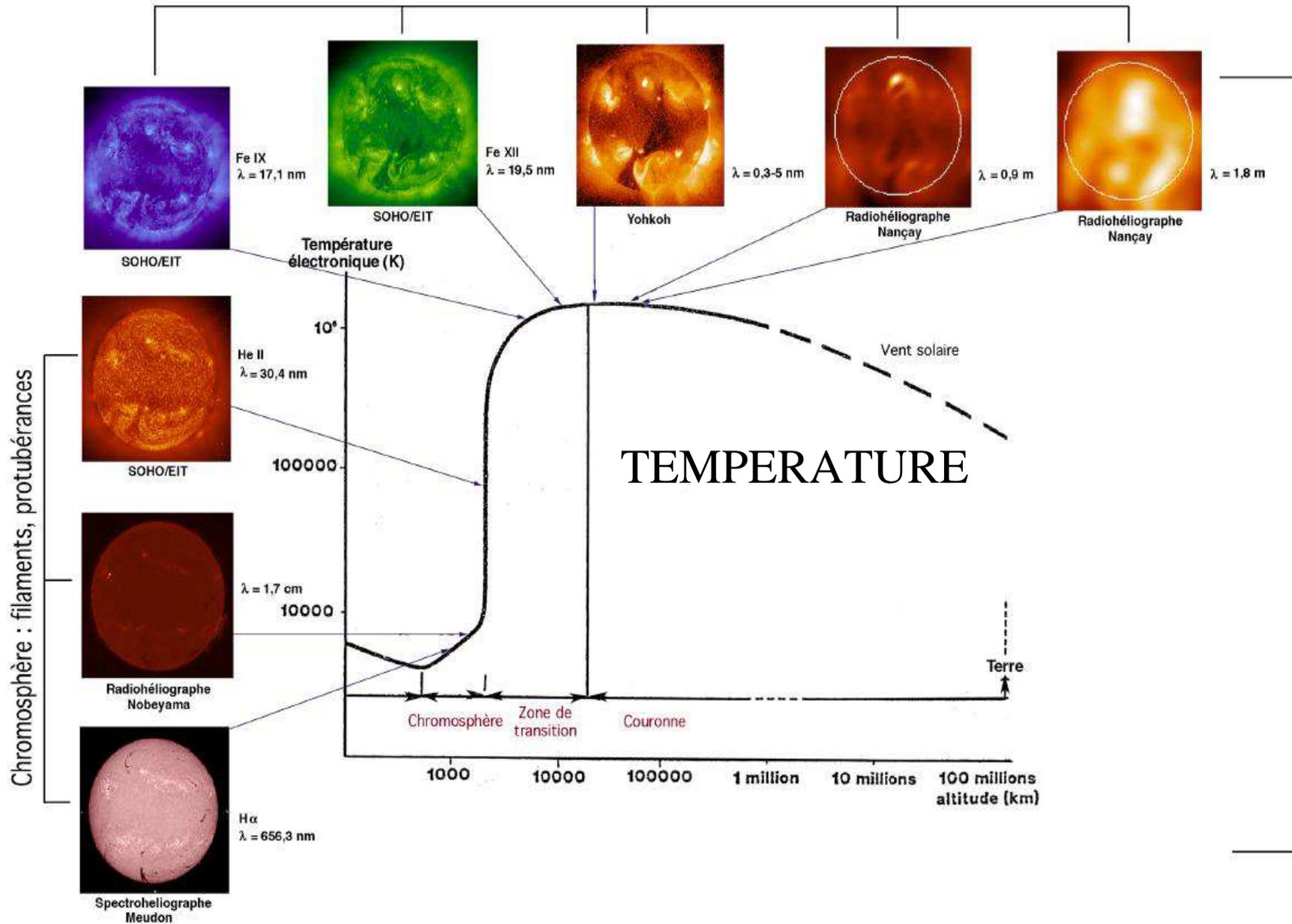
$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ MKSA}$ constante gravitationnelle

$1/(4 \pi \epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ MKSA}$, ϵ_0 permittivité du vide

$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ charge de l'électron

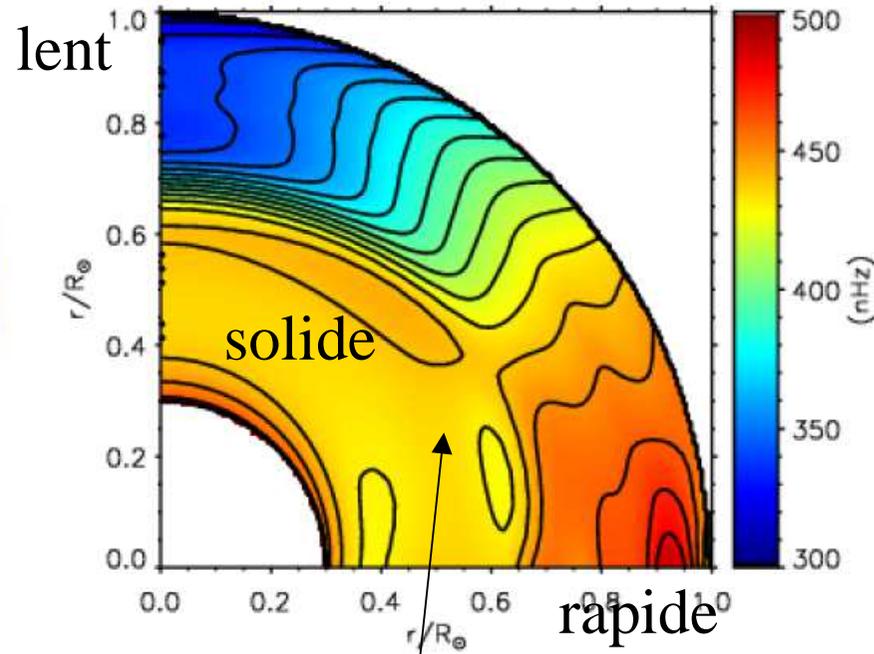
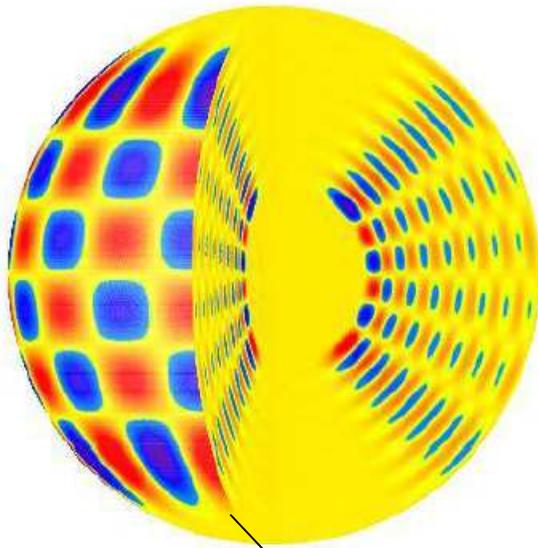
$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ masse du proton

Couronne solaire : boucles magnétiques, trous coronaux



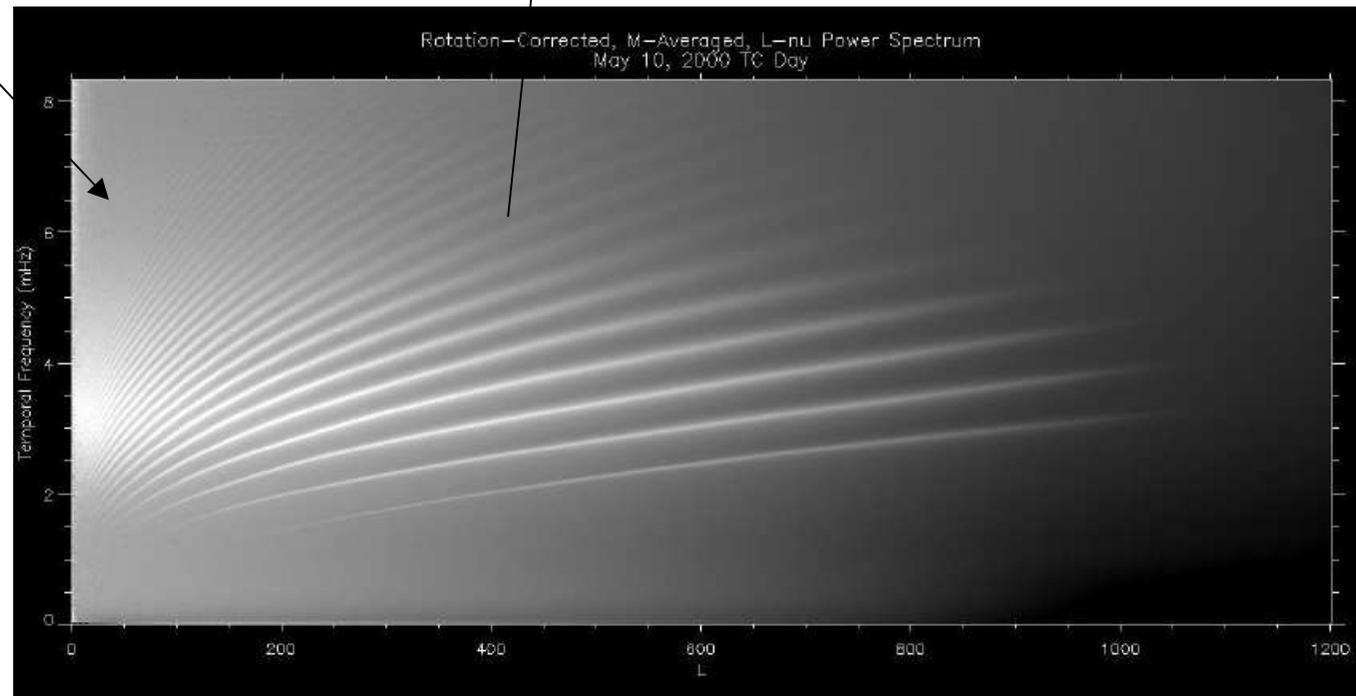
LE SOLEIL

STRUCTURE INTERNE ET
HELIOSEISMOLOGIE



Vitesse de rotation du soleil en fonction de la latitude et de la profondeur

Diagramme $\omega - k$ des modes de vibration de la surface solaire



LE SOLEIL

PRESENTATION GENERALE
DES PHENOMENES DONT
SON ATMOSHERE EST LE
SIEGE: filaments, protubérances,
taches, éruptions

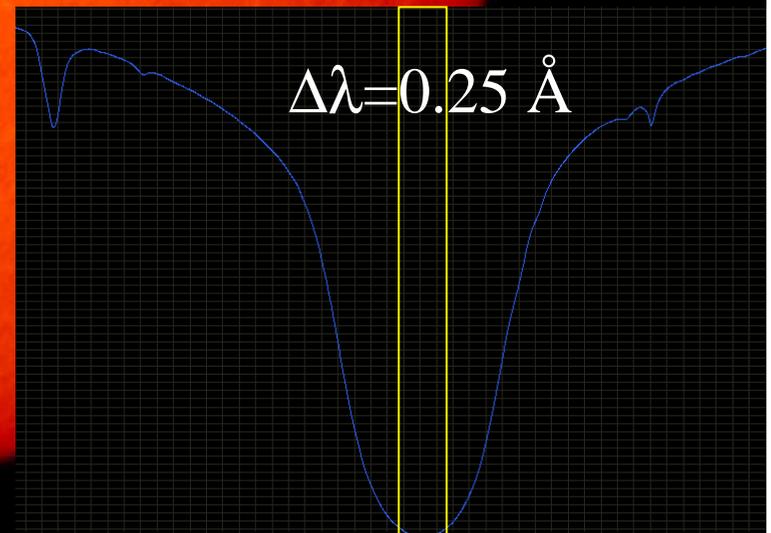
MEUDON

H alpha

Chromosphère

8000 K

Filaments = structures en absorption sur le disque suspendues dans la couronne contre la gravité ρg par la force de Laplace $\mathbf{F} = \mathbf{j} \wedge \mathbf{A}\mathbf{B}$



Observatoire de Paris-Meudon

03/Oct/28 08:50:59

Rotation: 2009 Lc:296.8

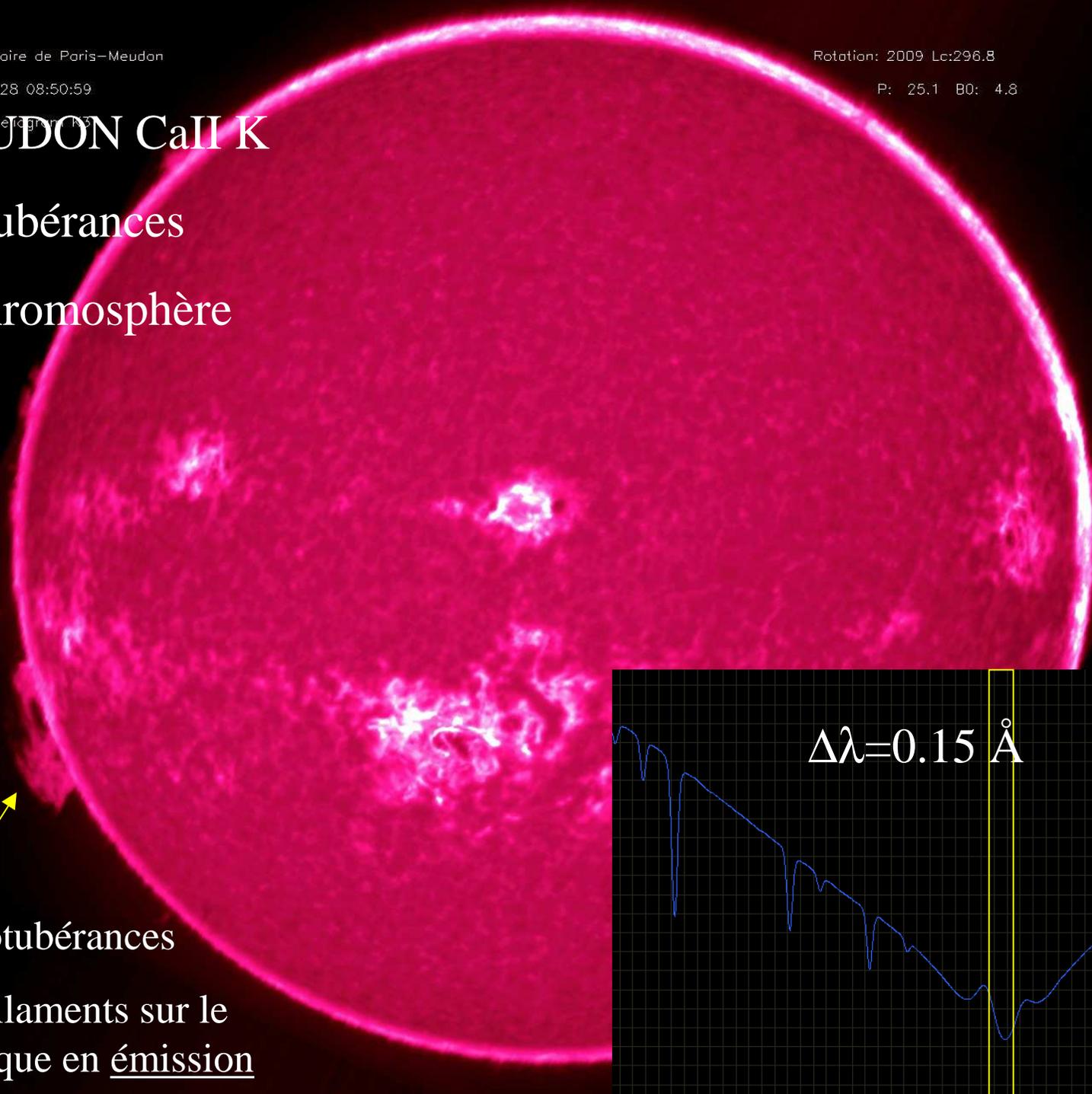
P: 25.1 B0: 4.8

MEUDON CaII K

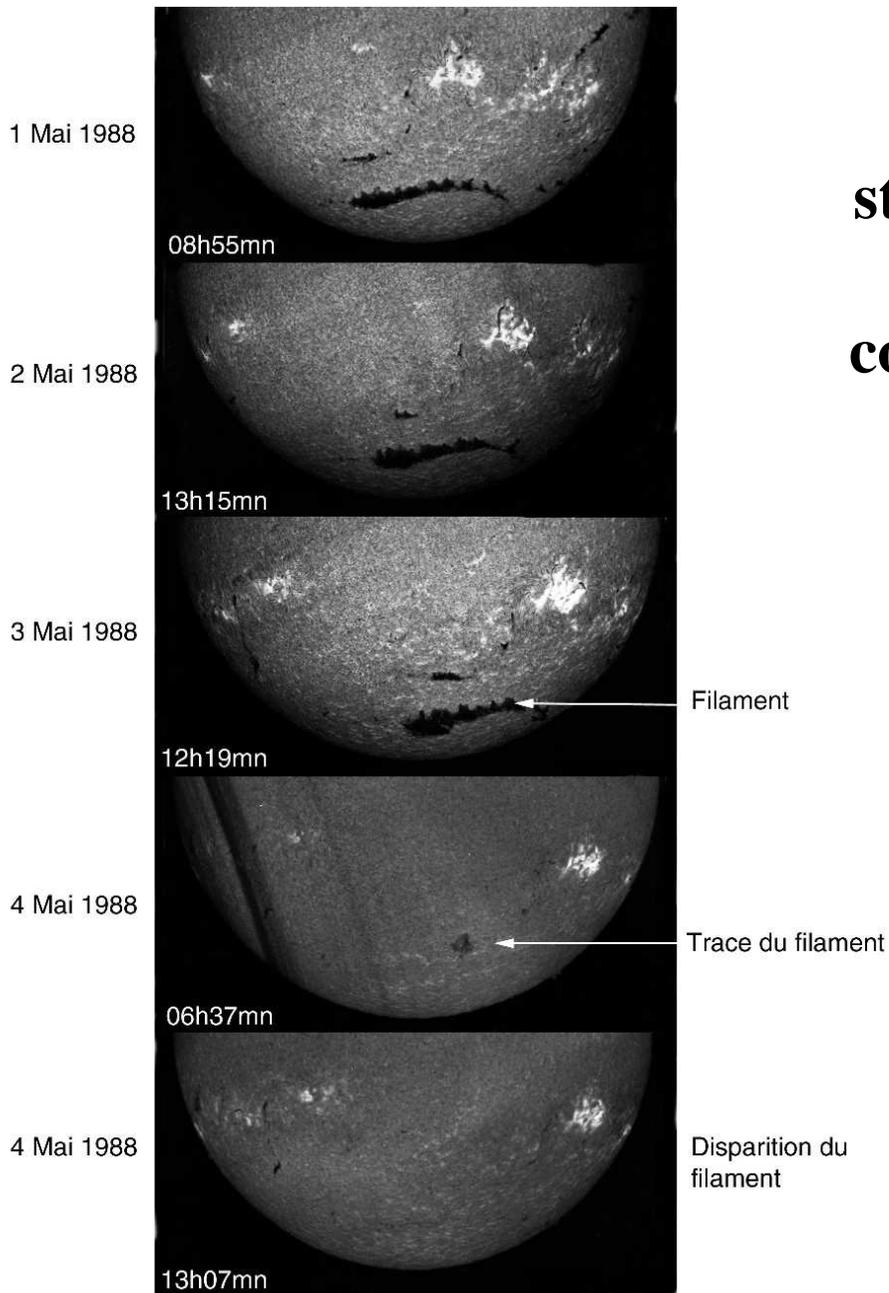
Protubérances
et chromosphère

Protubérances

= filaments sur le
disque en émission

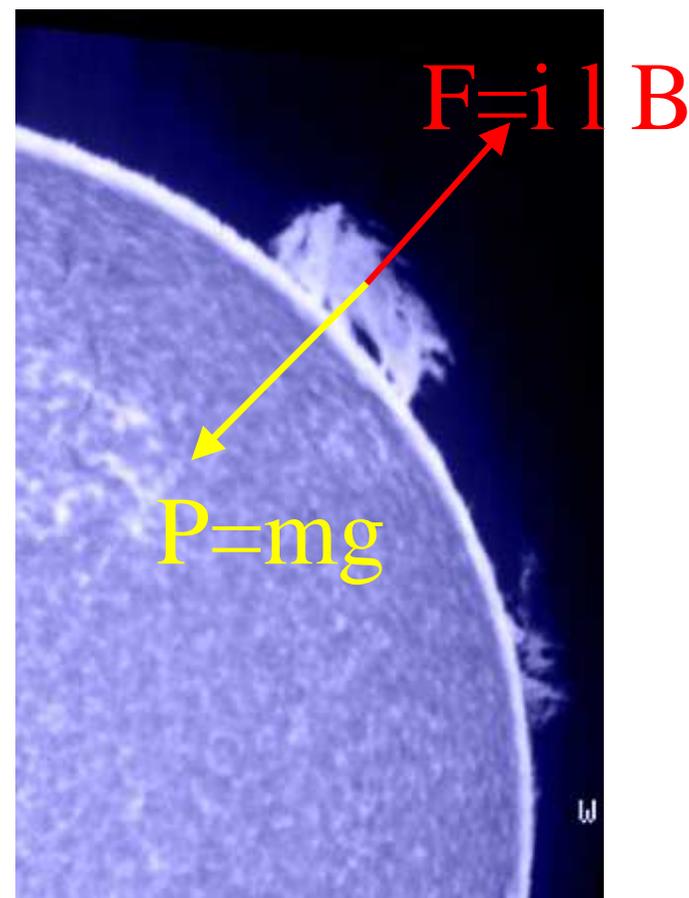


Disparition brusque d'un filament quiescent



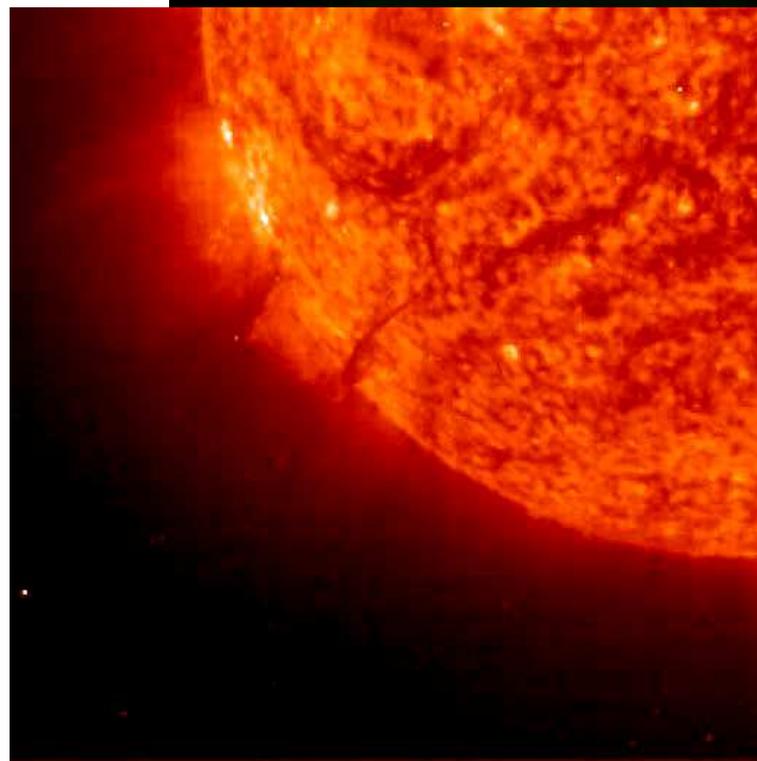
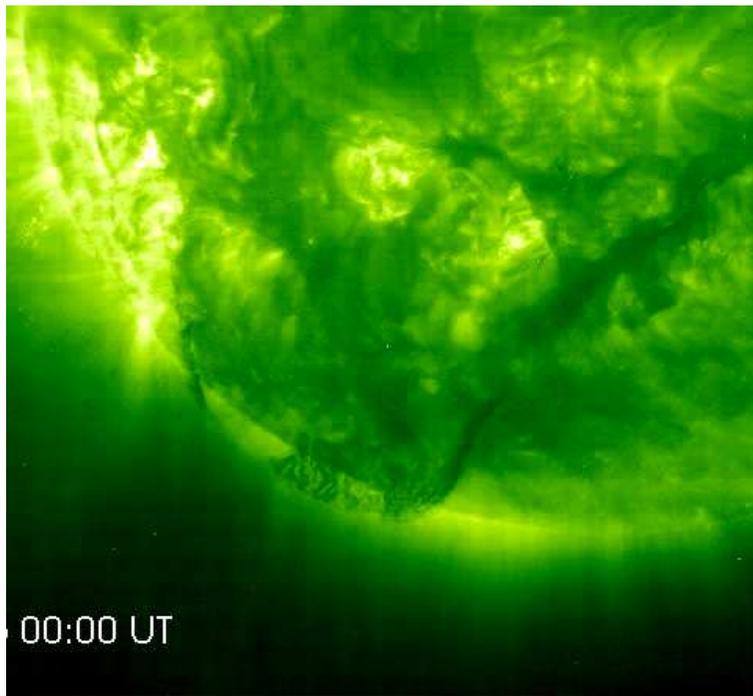
LES FILAMENTS ET LES PROTUBERANCES

structures magnétiques soutenues
par les champs magnétiques
contre la gravité solaire (275 m/s^2)



UV

00:00 UT



H α

MEUDON

CaII K

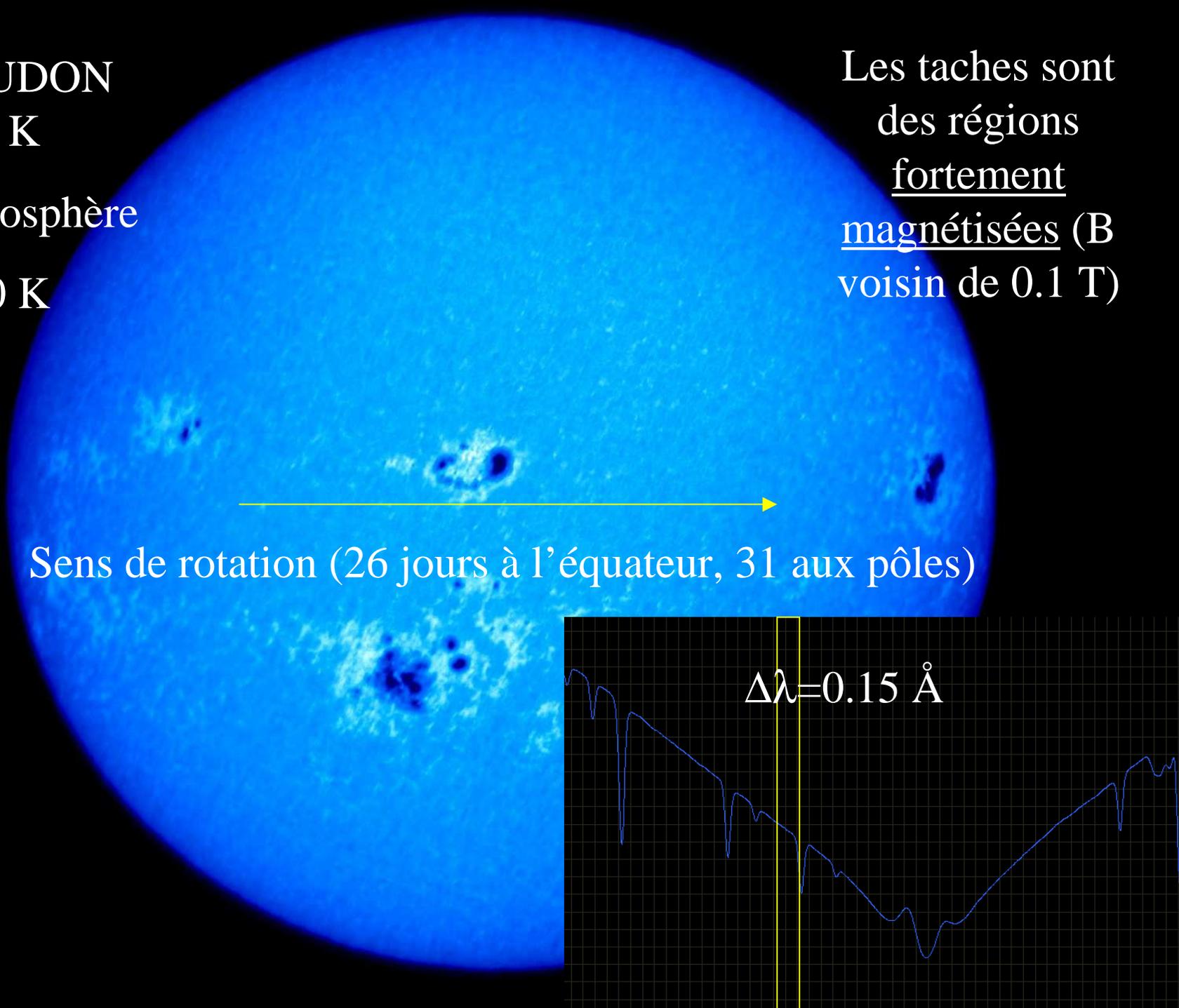
Photosphère

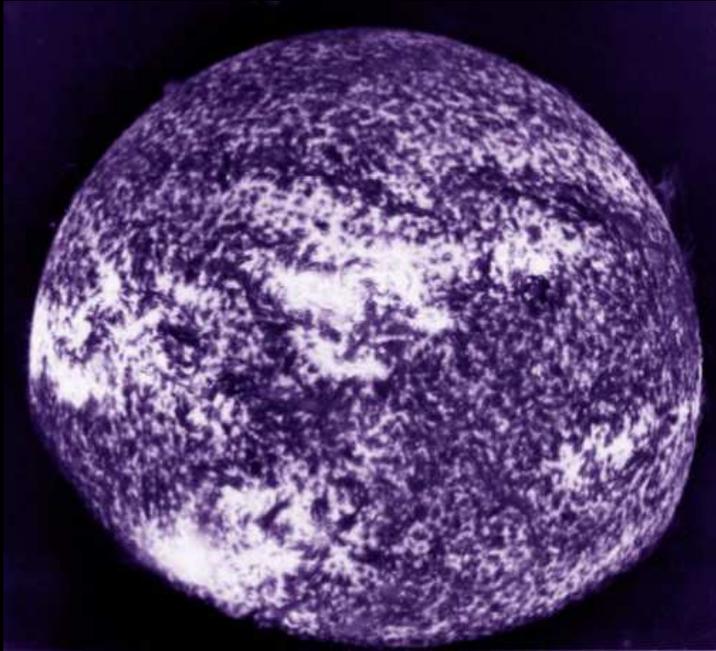
6000 K

Les taches sont
des régions
fortement
magnétisées (B
voisin de 0.1 T)

Sens de rotation (26 jours à l'équateur, 31 aux pôles)

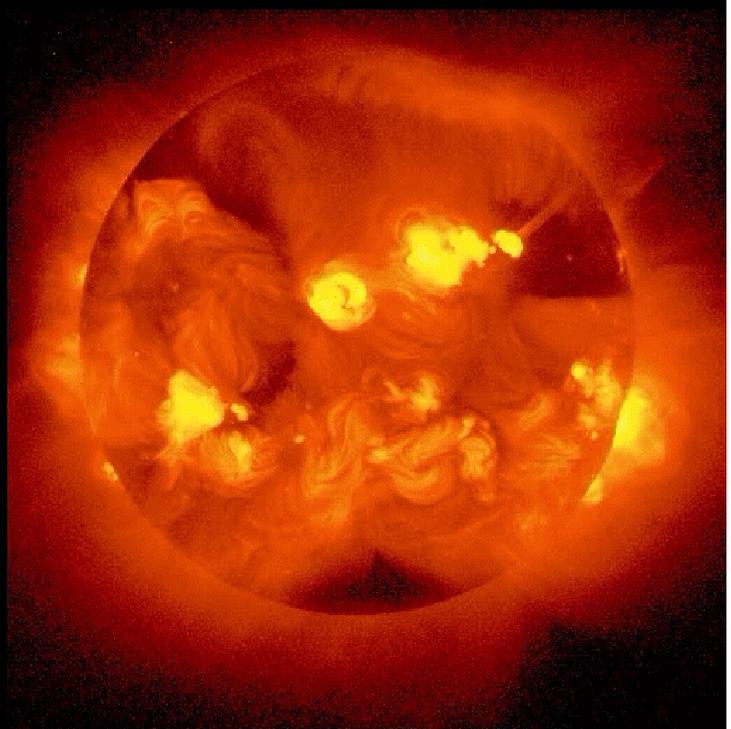
$\Delta\lambda = 0.15 \text{ \AA}$





1996-
2009:
SOHO
FeXII 19.5
nm (1.4
10⁶K) →

2003/10/27 22:12:11 UT



1979: TRC Lyman alpha
121.6 nm (20000K)

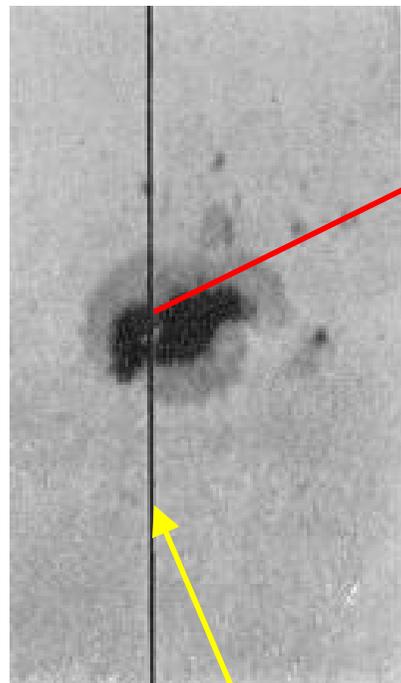
le soleil en UV et X

1991-1999: Solar A (Yohkoh) observe
le cycle solaire en rayons X →

LE SOLEIL

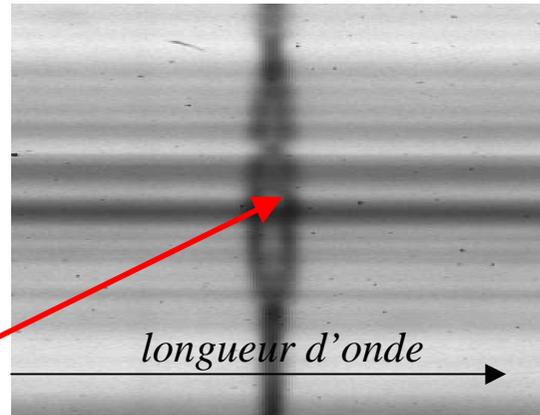
MANIFESTATIONS DU
MAGNETISME,
INSTABILITES D'ORIGINE
MAGNETIQUE

George Hale (1868-1938) découvre la nature magnétique des taches (1908) et le cycle de 22 ans (1919) en y observant l'effet Zeeman

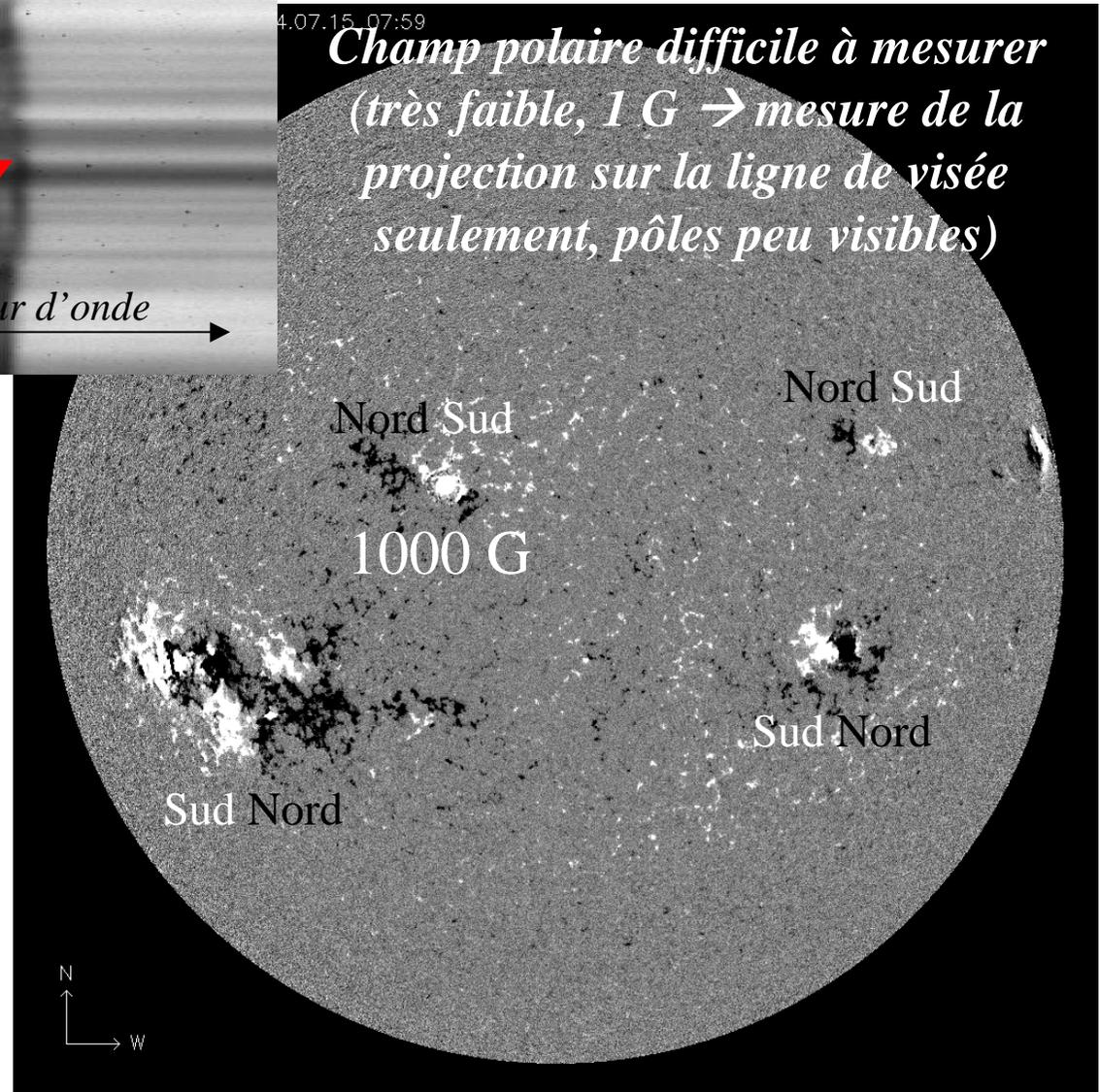


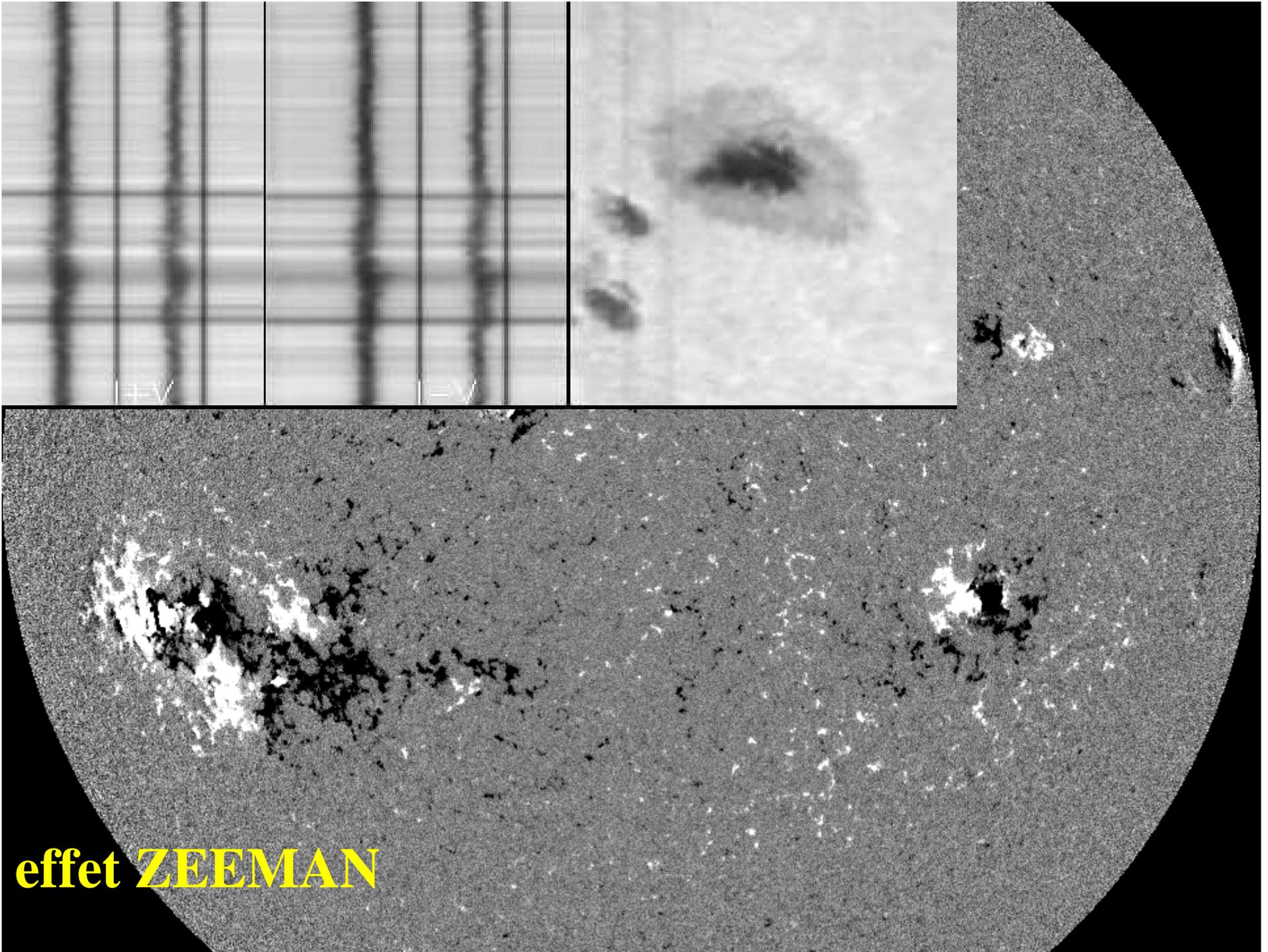
Les raies spectrales se divisent en fonction de l'orientation du vecteur **B**.

Fente d'analyse



Champ polaire difficile à mesurer (très faible, 1 G → mesure de la projection sur la ligne de visée seulement, pôles peu visibles)





effet ZEEMAN



SDO NASA

Vitesse Doppler (projetée
sur la ligne de visée)
dérivée du décalage
Doppler $\Delta\lambda$ sur les raies

$$V_{//} = C \Delta\lambda/\lambda$$

SDO NASA

Champ magnétique (projeté
sur la ligne de visée) obtenu à
partir de l'écartement $\Delta\lambda_B$

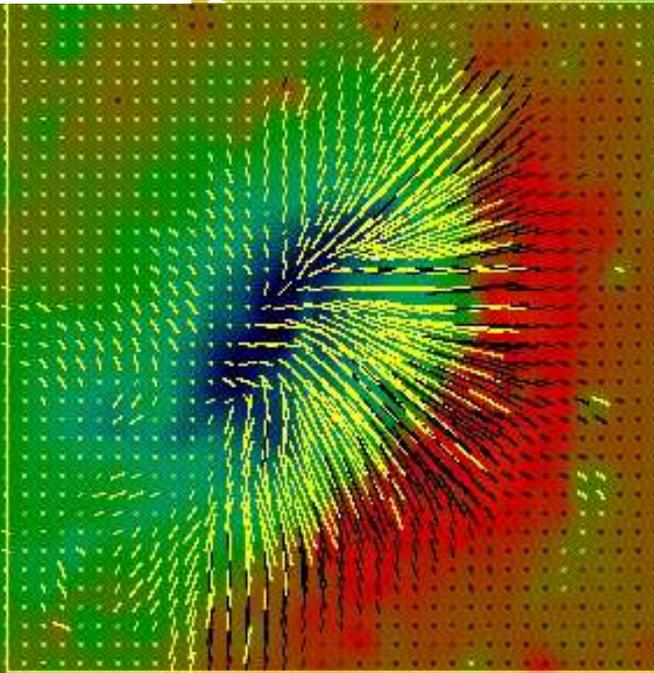
Zeeman sur la raie FeI 6173

$B_{//}$ proportionnel à $\Delta\lambda_B$



Mesure des champs magnétiques vectoriels

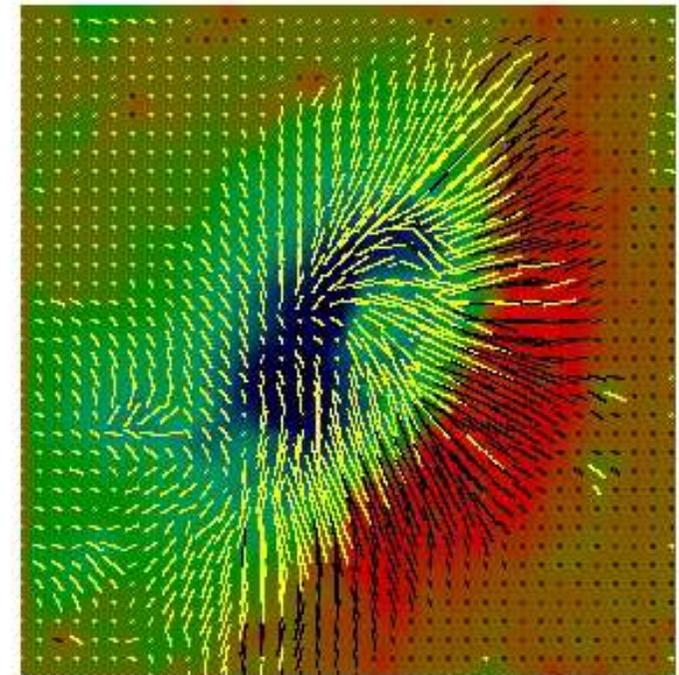
À partir de la polarisation circulaire et
linéaire par effet Zeeman



Télescope THEMIS INSU/CNRS

Ca MSDP

Fe MTR



-2000 0 2000

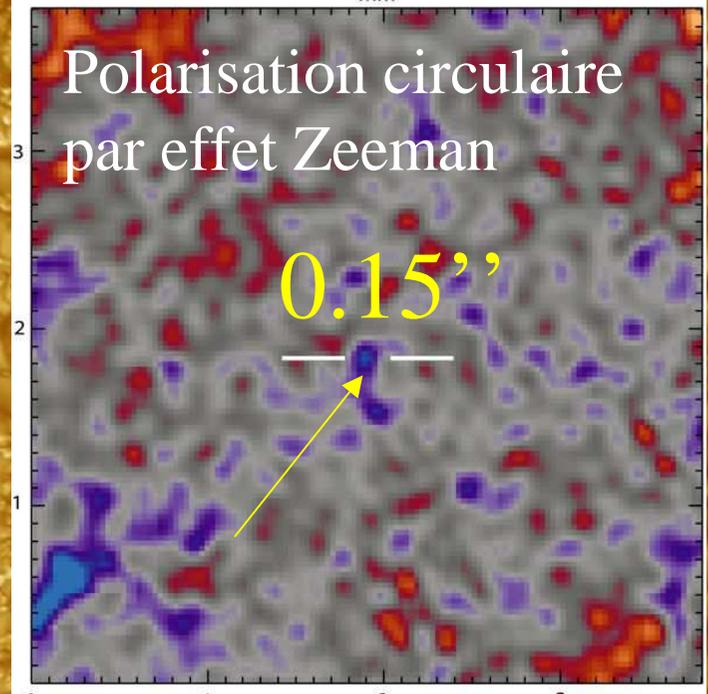
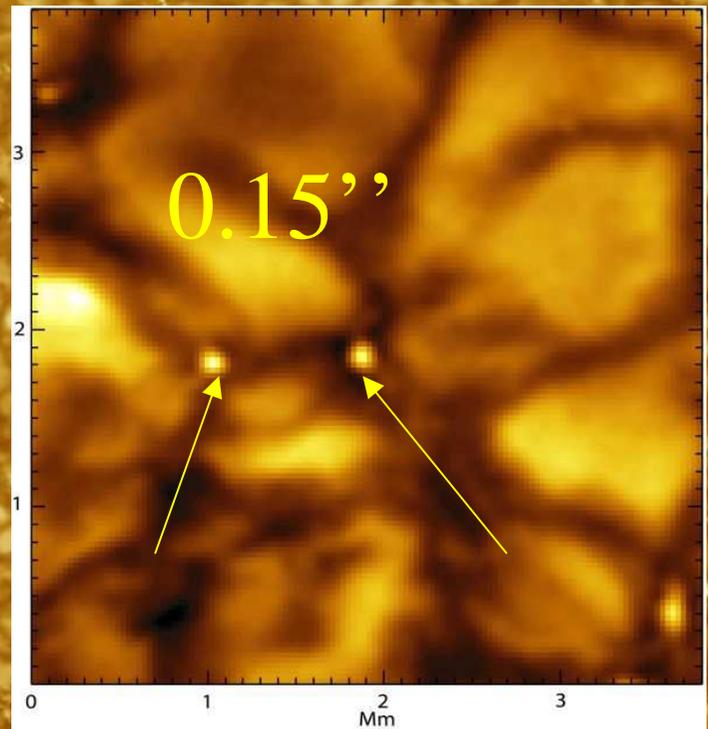


Gauss

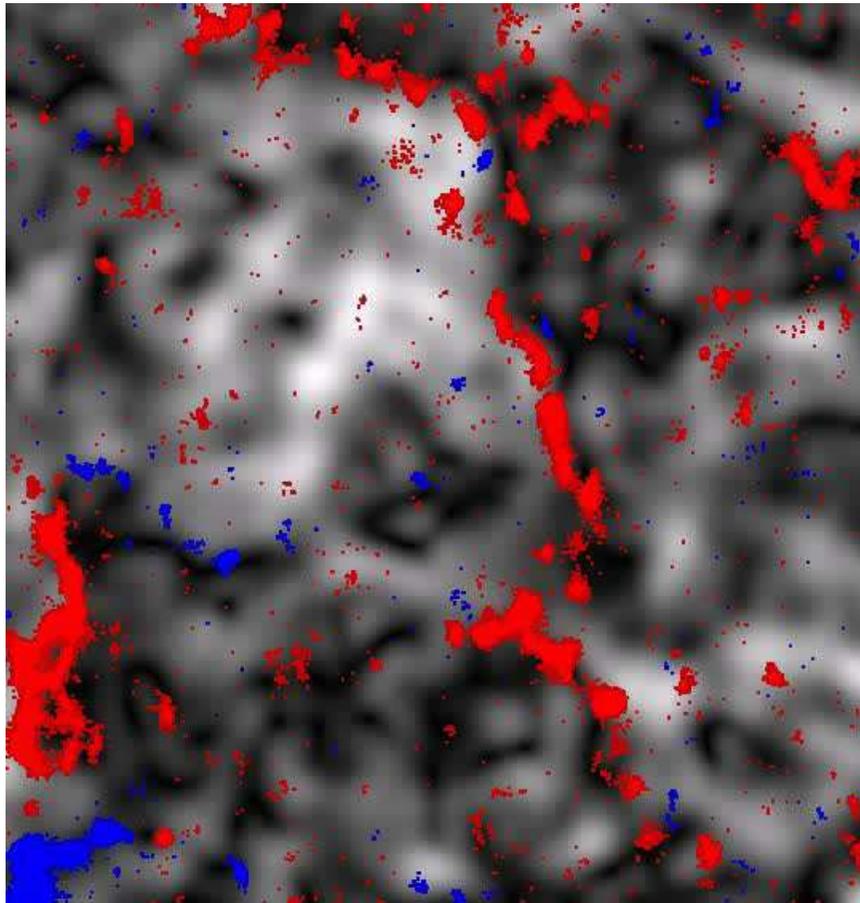
↑ 2000
↓

**La haute résolution
spatiale**

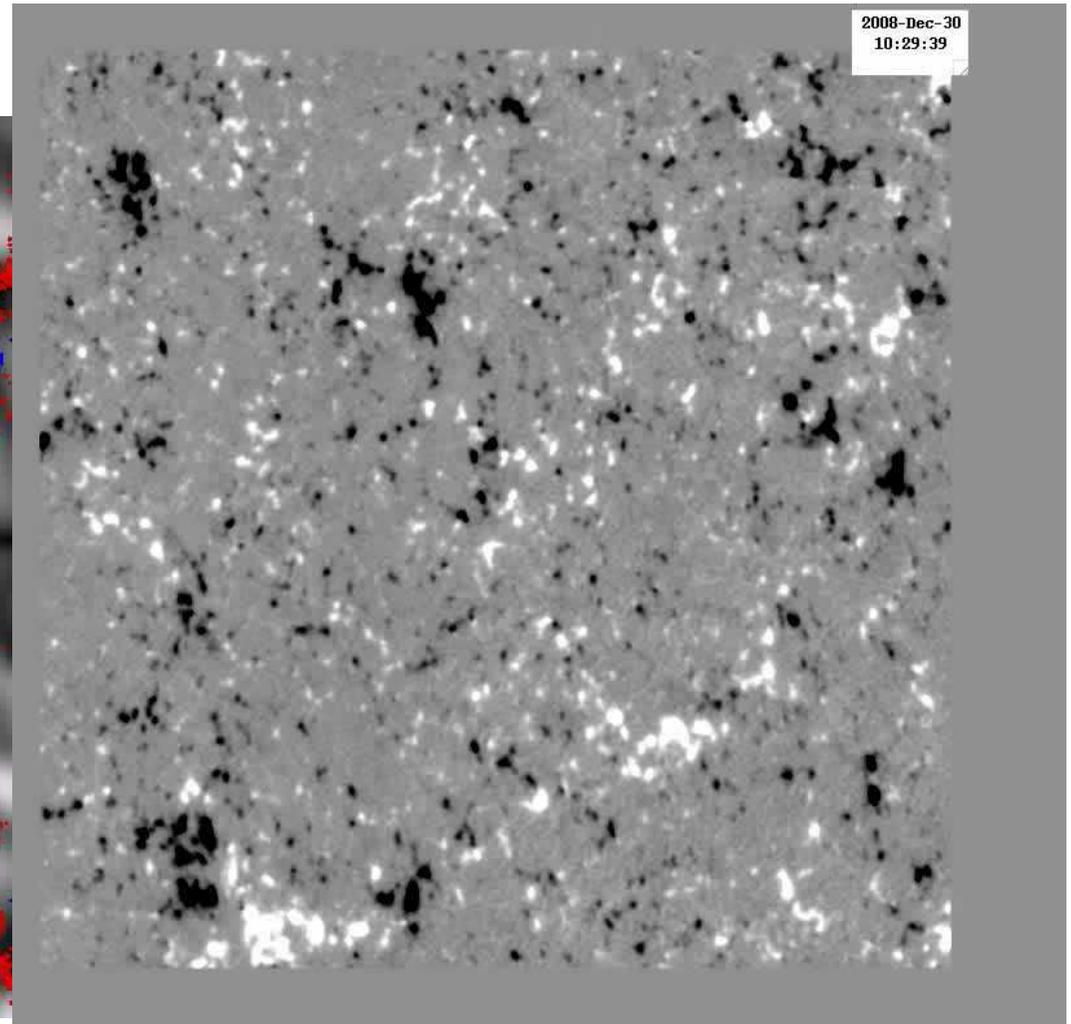
Ici en bande CH à 430 nm



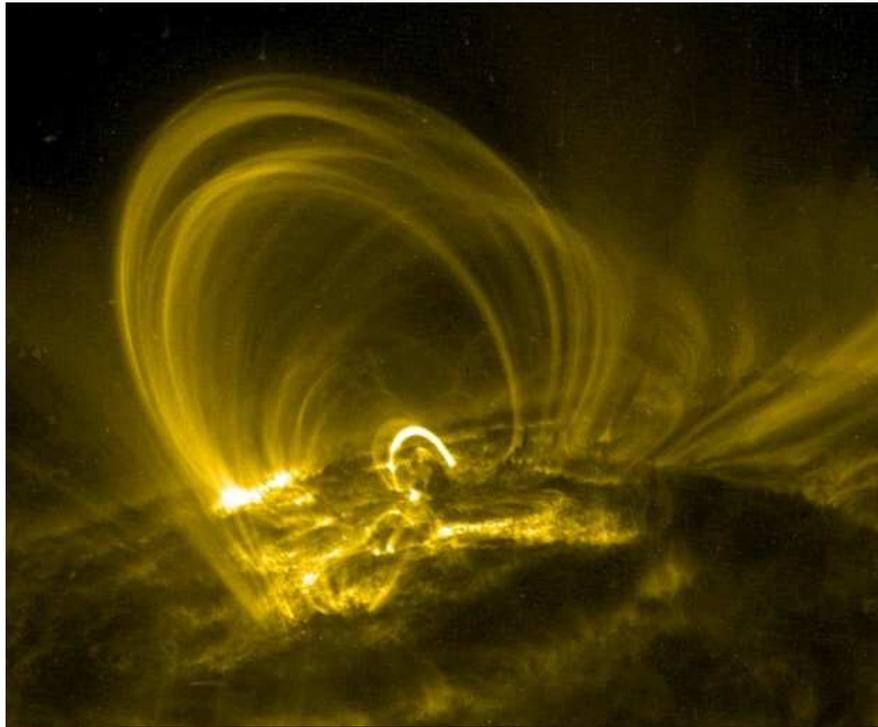
Magnéto dynamique de la surface solaire à haute résolution spatiale – satellite HINODE



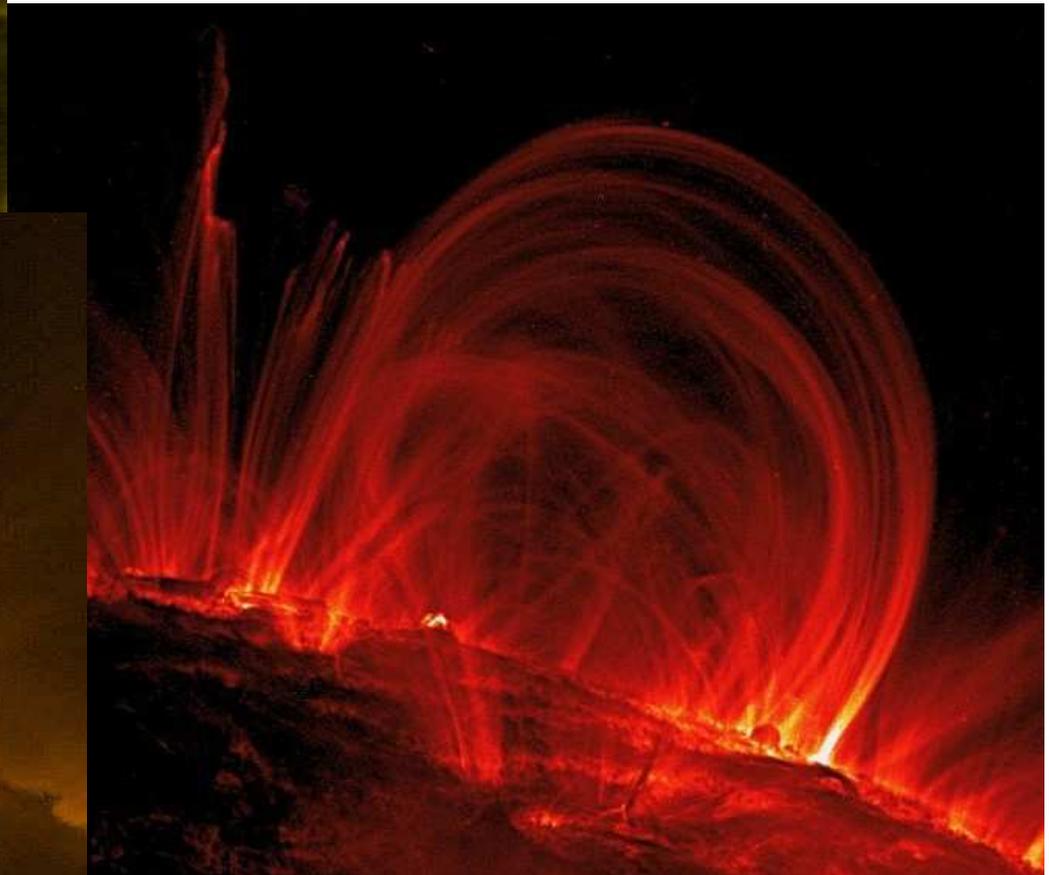
Champ magnétique et vitesses horizontales



Champ magnétique durant 7 jours
(1 pixel = 0.16 arc sec)



Transition Region And Coronal Explorer
TRACE 1999 et
l'imagerie des
champs
magnétiques dans
la couronne



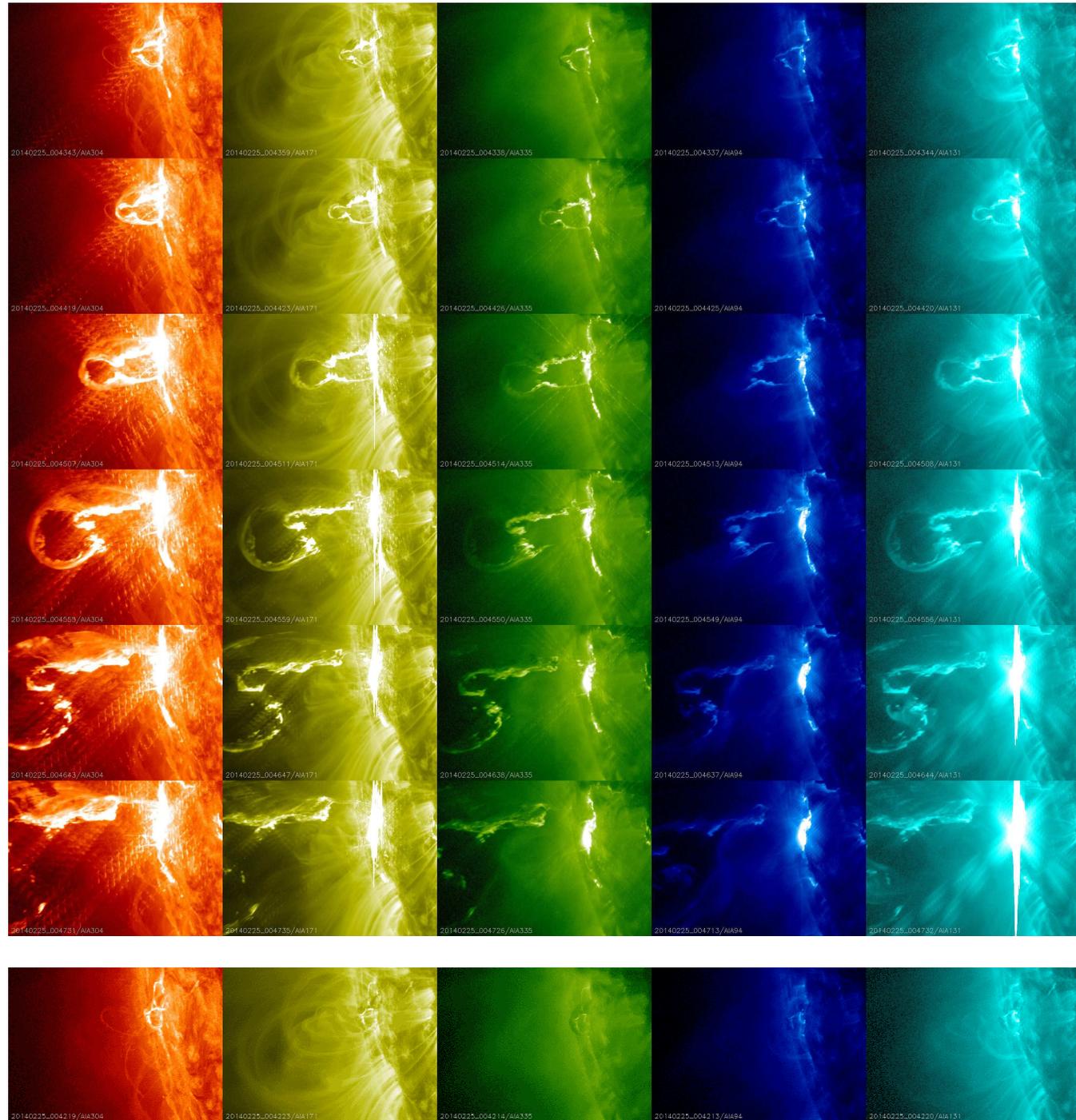
2002-Apr-21
00:43:09

ERUPTIONS SOLAIRES

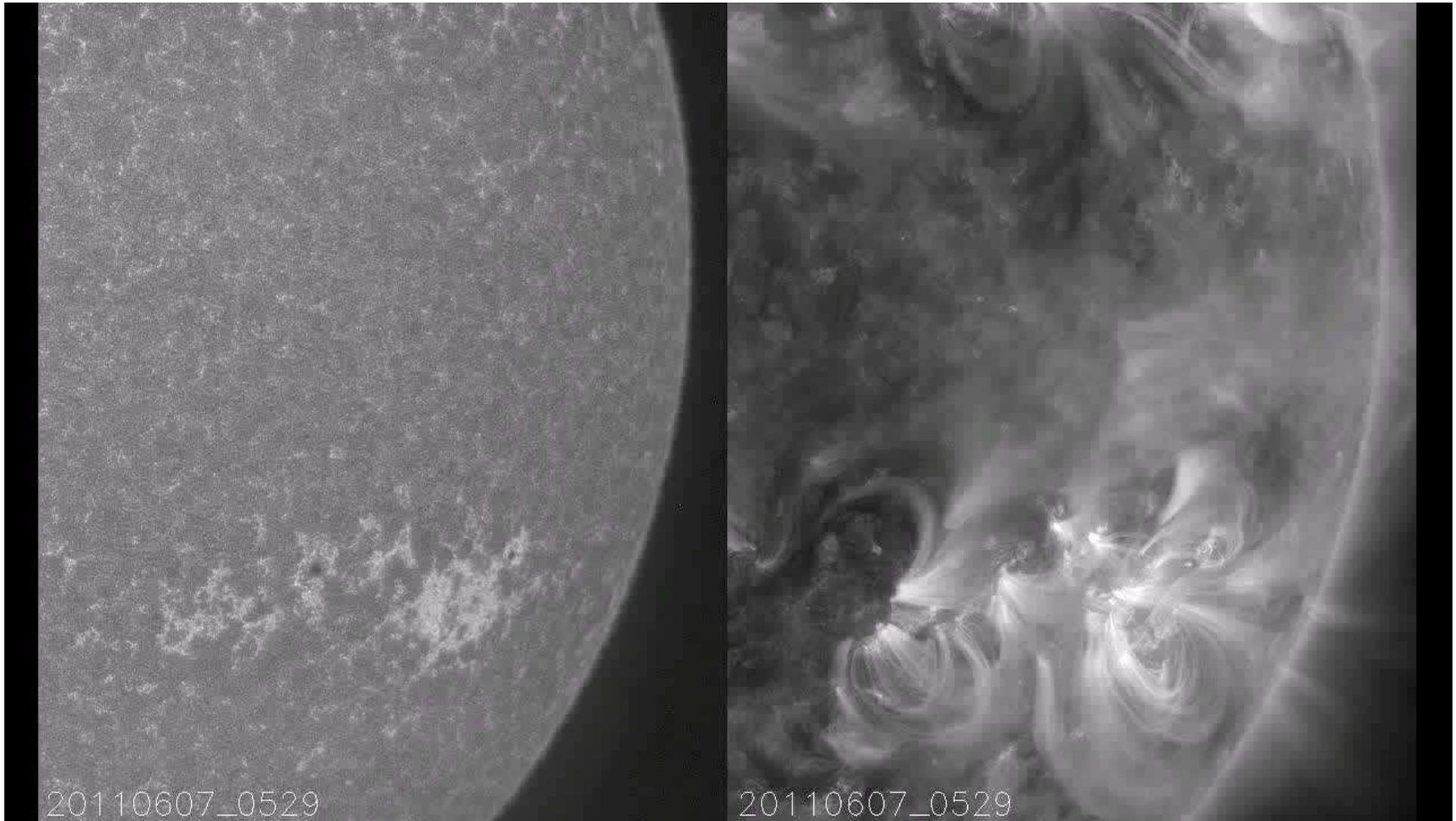
Satellite SDO
NASA 2010

EUV

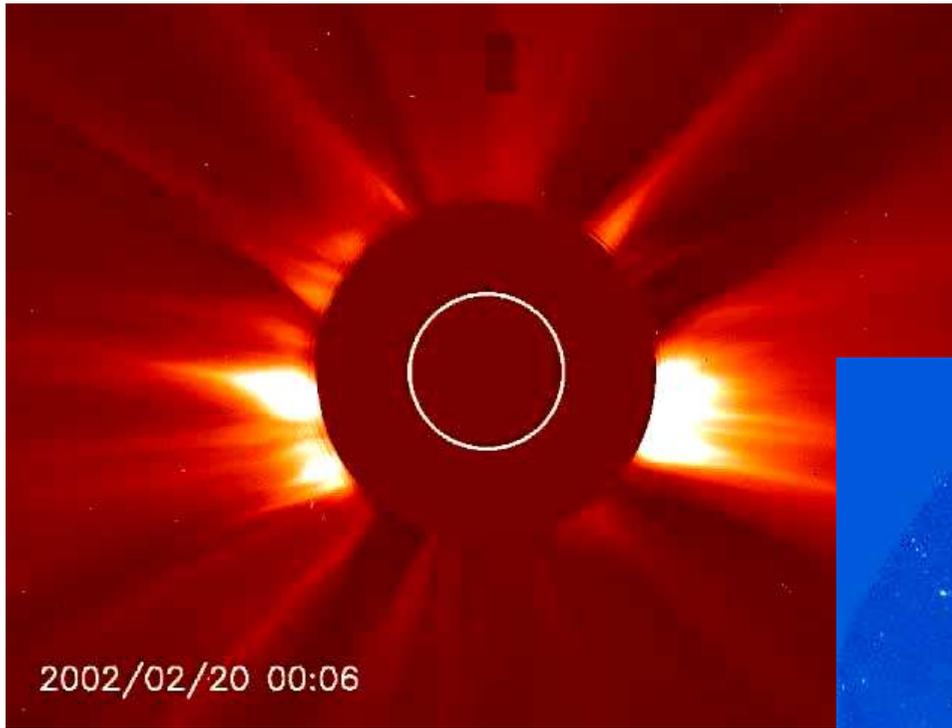
100000 K à 10
millions de K



SDO NASA éruption solaire observée dans le continu UV et dans une raie du Fer à 1 million de degrés – noter les impacts sur la chromosphère de la matière projetée par l'éruption à grande distance

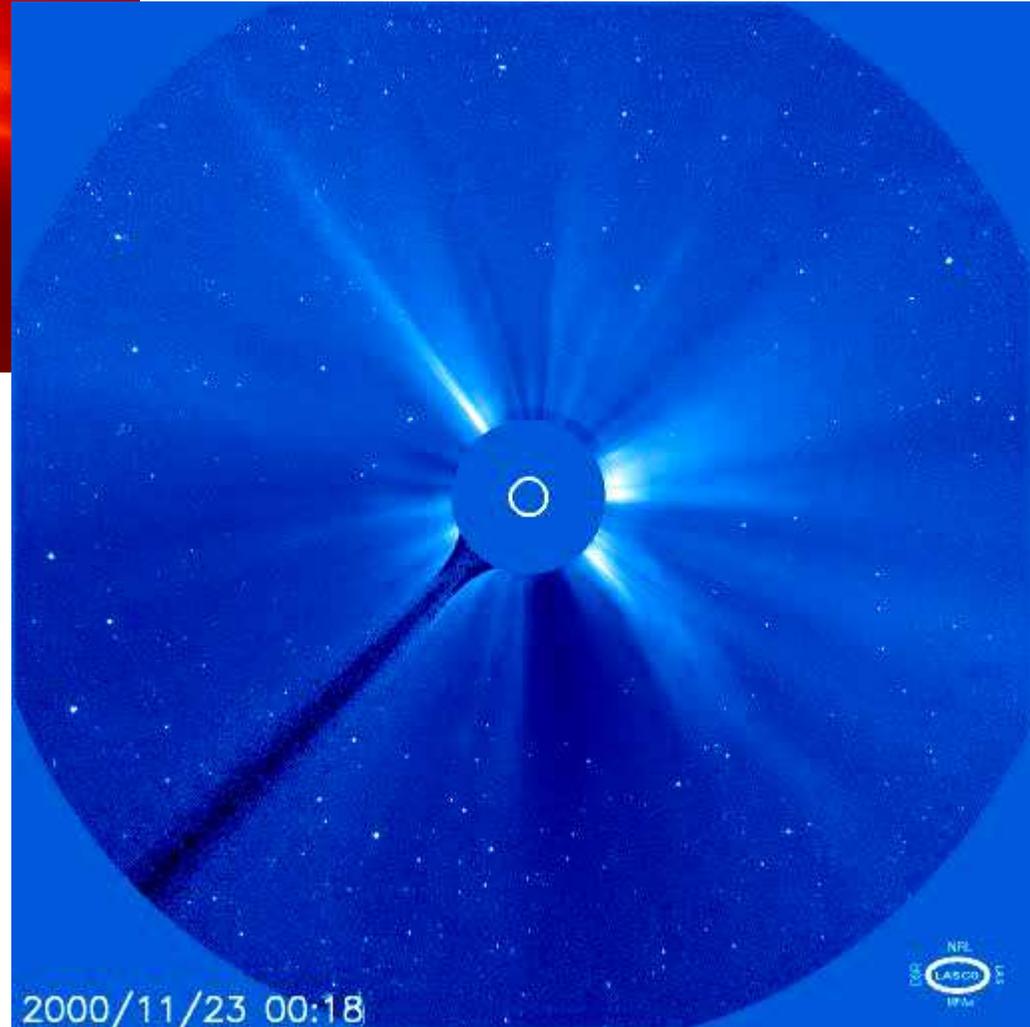


*1996: SOHO au point de
Lagrange L1 – La
COURONNE SOLAIRE*



2002/02/20 00:06

*Les éjections de masse
coronale
suite à une éruption
ou à une instabilité d'un
filament
(Observation SOHO/ESA-
NASA, coronographe spatial
LASCO)*



2000/11/23 00:18



LE SOLEIL

CYCLICITE, VARIABILITE

CYCLES DE 11 ANS

1979

1982

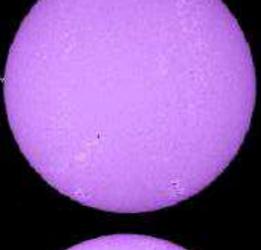
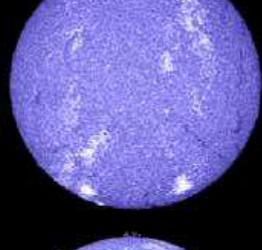
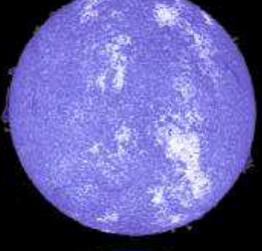
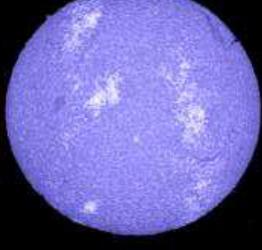
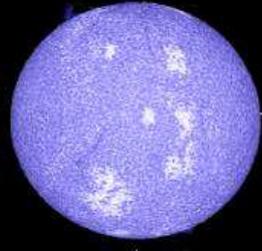
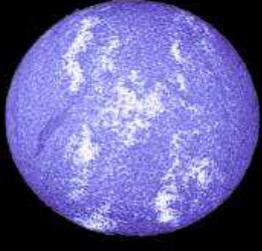
1986

1988

1990

1996

1999



Maximum

Phase
décroissante

minimum

Phase
croissante

Maximum

minimum

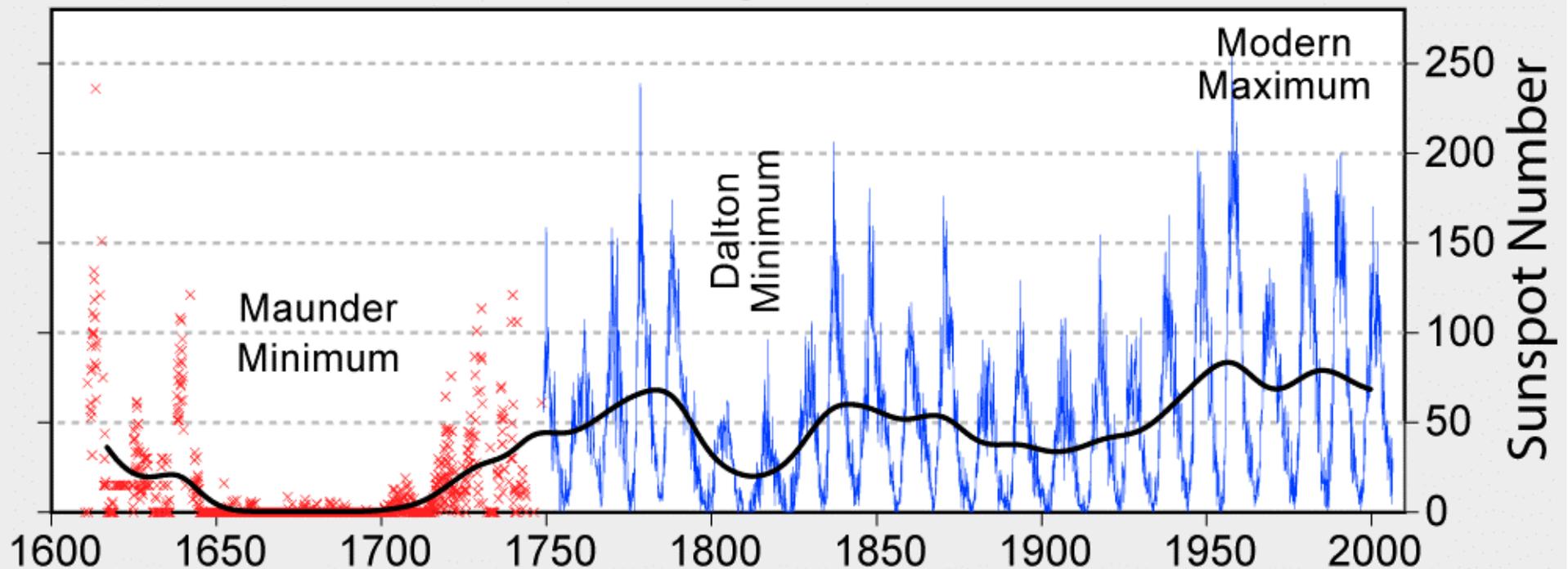
Phase
croissante

CYCLE 21

CYCLE 22

CYCLE 23

400 Years of Sunspot Observations

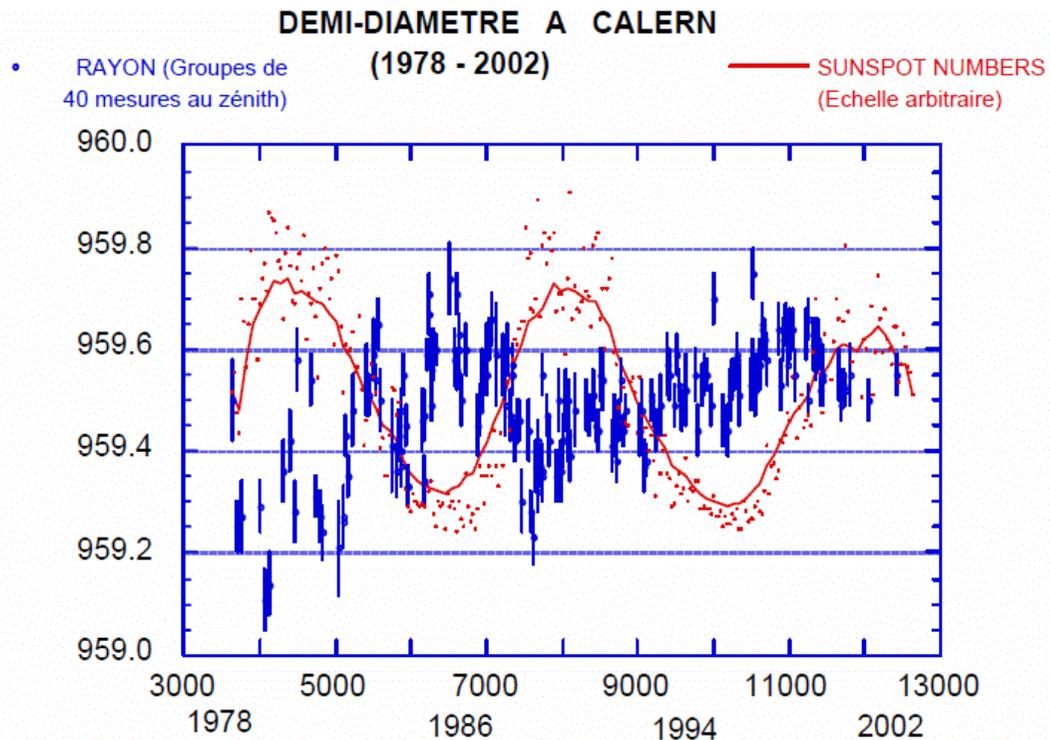


1890: Gustav Spörer (1822-1895) et Edward Maunder (1851-1928) découvrent le minimum prolongé de 1645-1705

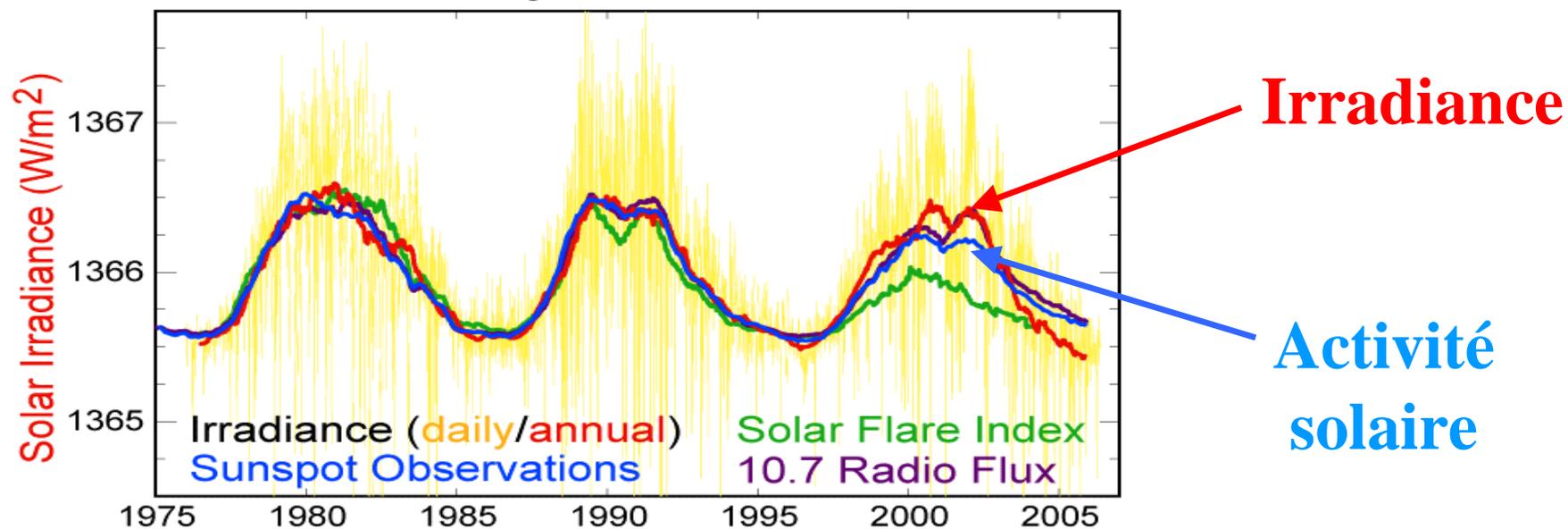
« C'est la 3ème tache qui a paru en cette année 1676, dans laquelle elles ont été plus fréquentes qu'elles n'avoient été pendant 20 années précédentes... Elle fut aperçue par Monsieur Picard en prenant la hauteur du Soleil pour la rectification des horloges le matin du trentième d'Octobre... »

J.-D. Cassini, archives de l'Académie

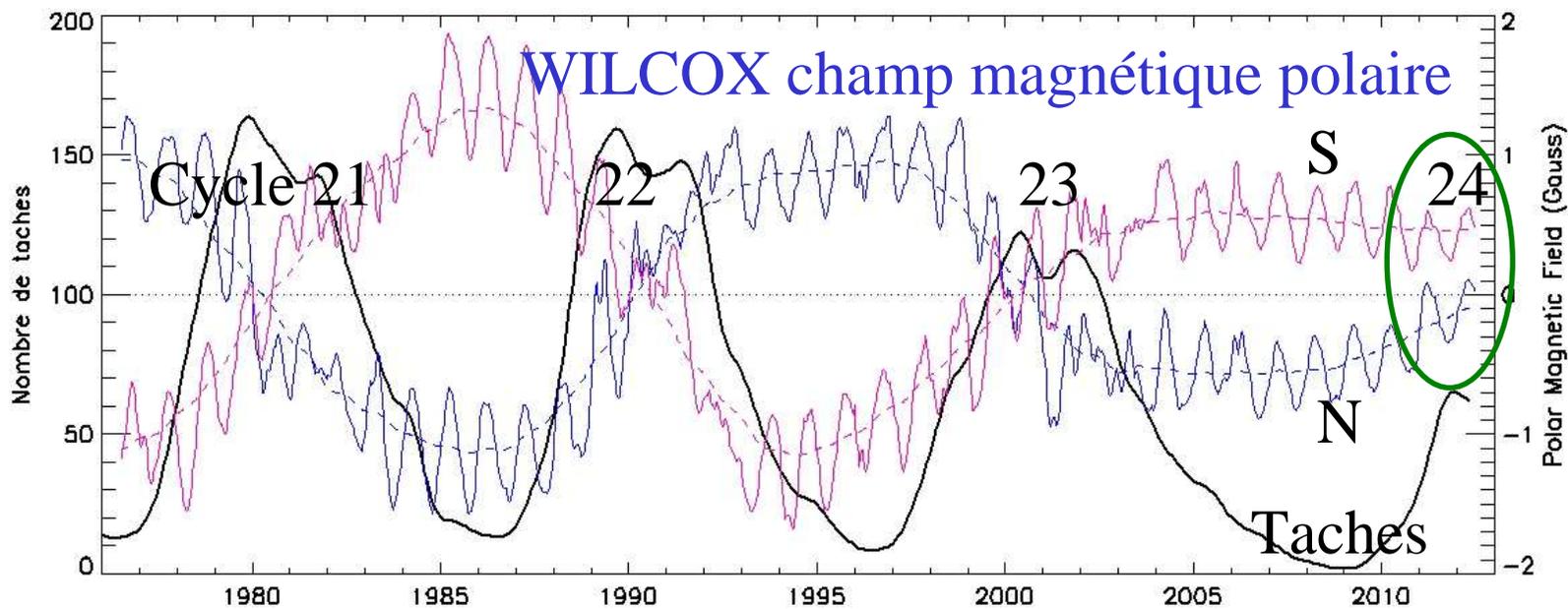
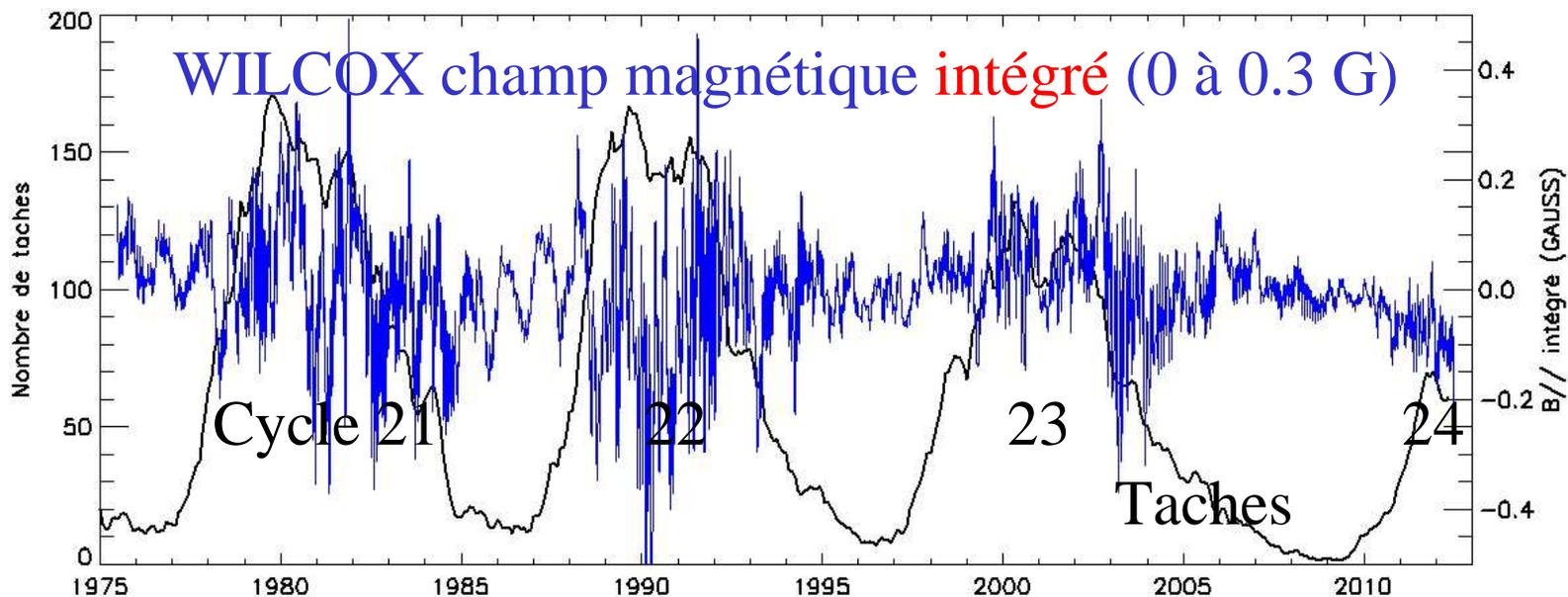
variation de
l'irradiance
(données satellite)
et du diamètre
solaire (sol) en
fonction du cycle
solaire



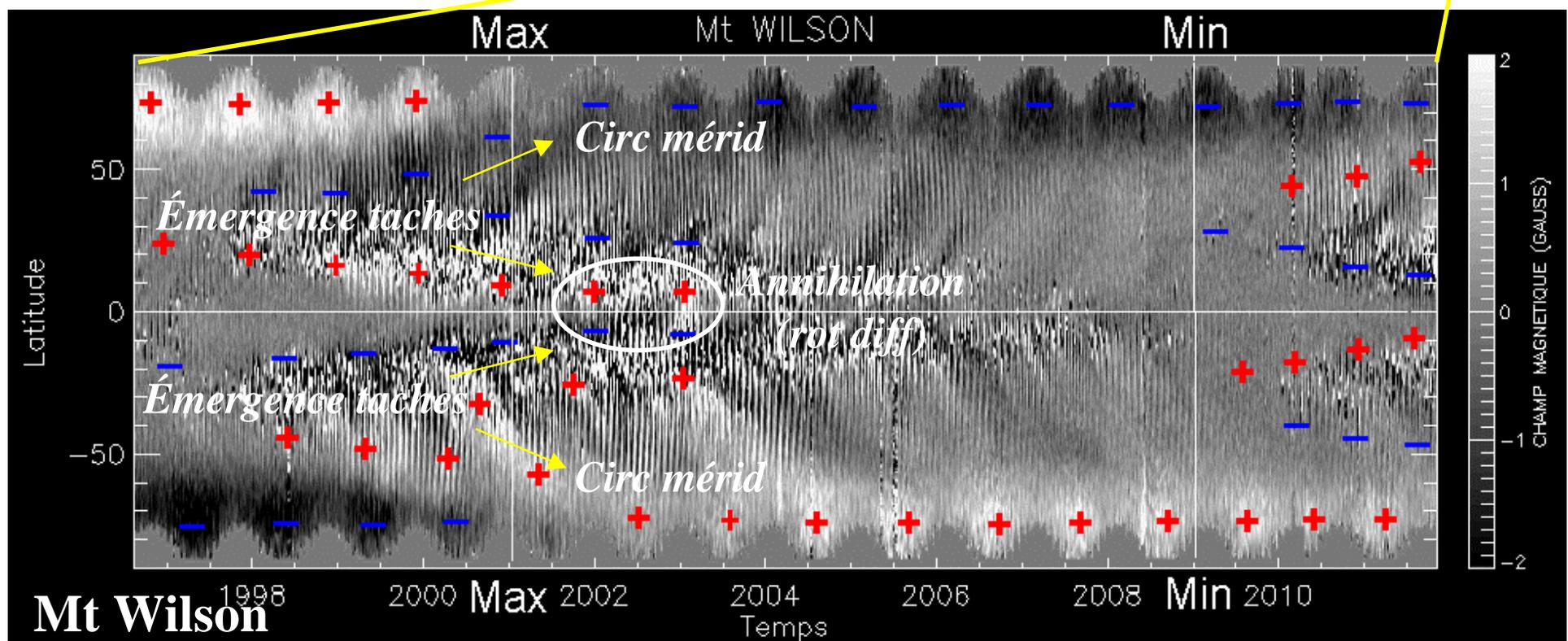
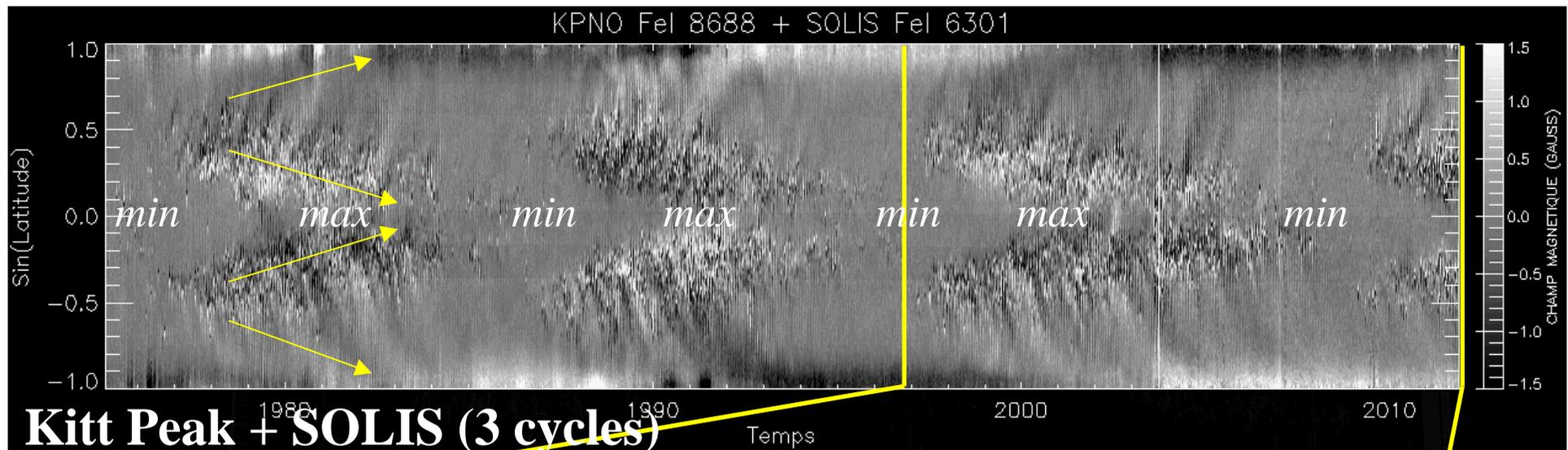
Solar Cycle Variations



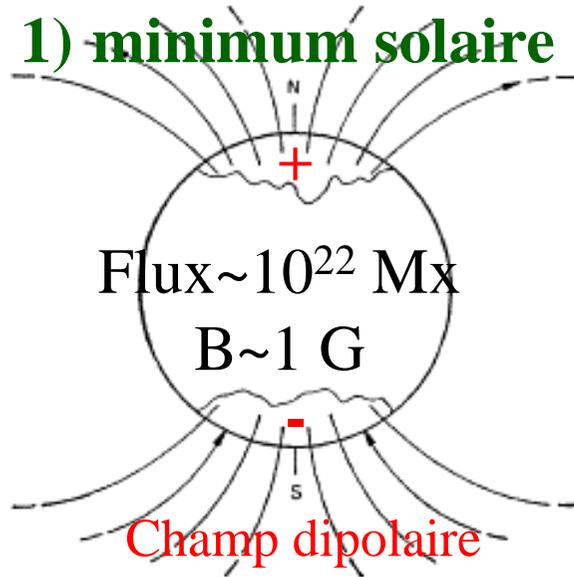
*Inversion
du champ
polaire au
maximum
d'activité
solaire*



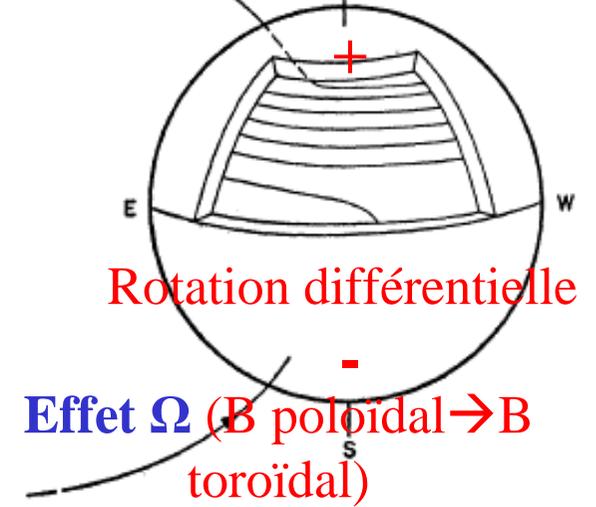
← *Champ
polaire
fort au
minimum
d'activité
solaire*



1) minimum solaire



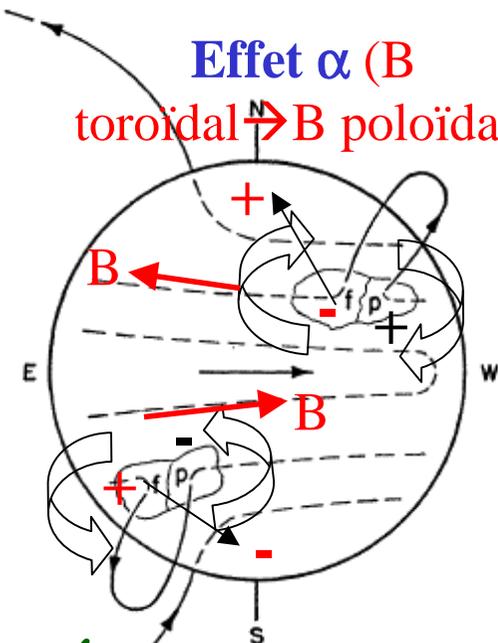
2) Amplification du champ



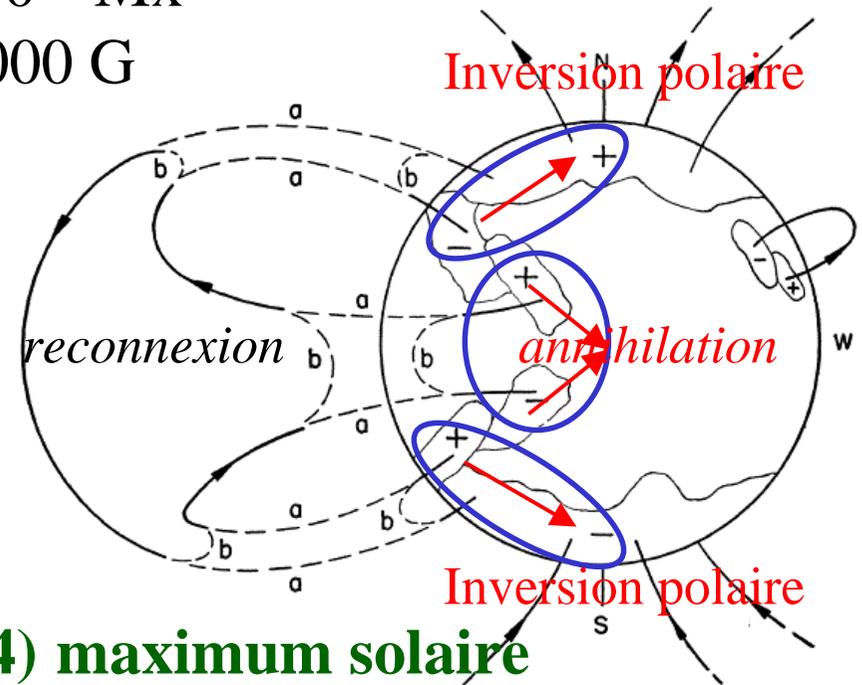
Modèle dynamo qualitatif de Babcock Leighton

Au maximum
 Flux $\sim 10^{25}$ Mx
 $B \sim 1000$ G

Effet α (B toroidal \rightarrow B poloidal)



← Émergence des taches et mouvements anticycloniques (horaire au N, antihoraire au S) liés à la force de Coriolis



3) Émergence du champ

4) maximum solaire

INSTRUMENTS AU SOL

Actuels: Sac Peak, Kitt Peak, Big Bear (USA),
Canaries

Prochaine décennie: ATST (USA), EST (Europe)

DANS L'ESPACE

Actuellement: satellites SDO (NASA), Solar B
(JAXA)

prochaine décennie: Solar C (JAXA), Solar
Orbiter (ESA), Solar Probe (NASA)

arte

Télescope solaire de Big Bear
Californie, USA
Big-Bear-Teleskop
Kalifornien, USA



European Solar Telescope (> 2020)