



The Sun

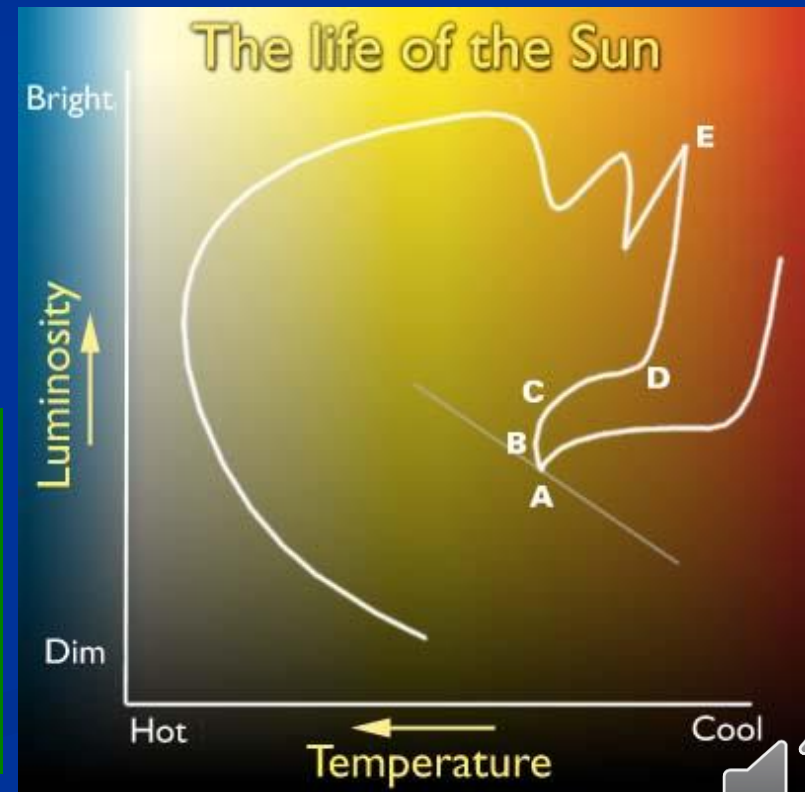
Part 1 : Internal structure and photosphere

Frédéric Clette



Le Soleil: caractéristiques de base

- Étoile naine jaune "ordinaire", de type G2
- Située dans le disque galactique à 27000 AL du centre de la Voie Lactée
- Phase de séquence principale:
 - Depuis 4,5 milliards d'années
 - Pour encore 5,5 milliards d'années
 - Structure stable mais évolution de la luminosité de l'ordre de 10% sur plusieurs milliards d'années (A-B).



Propriétés stellaires:

Magnitude apparente bolométrique:	-26,5
Magnitude absolue (10pc):	+4,5
Température effective:	5780 K
Indice B-V:	+0,6
Classification spectrale:	G2V

Le Soleil: caractéristiques de base

- Composition de surface:
78% H, 20% He, 2% éléments lourds (O, métaux)
- Source d'énergie ($T_{\text{Centre}} = 15 \times 10^6 \text{K}$): cycle proton-proton
 - Conversion de 4 millions de tonnes de matière par seconde

Propriétés intrinsèques:

Masse: $1,9866 \times 10^{30} \text{ kg}$ ($330000 \times M_{\text{Terre}}$)

Rayon: $6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ($105 \times R_{\text{Terre}}$)

Luminosité: $3,3 \times 10^{26} \text{ W}$

Densité moyenne: 1.408 g/cm^3

Accélération gravitationnelle à la surface: $273,8 \text{ m/s}^2$

Vitesse critique d'éjection: $617,7 \text{ km/s}$

Rotation sidérale: Période (Lat.: 16°): $25,38 \text{ j}$

Propriétés géocentriques:

Période de rotation synodique moyenne: $27,275 \text{ j}$

Distance moyenne (1AU): $149,5985 \times 10^9 \text{ m} \pm 0,000005$

Distances extrêmes: $147,10 \text{ à } 152,10 \times 10^6 \text{ km}$

Diamètre apparent: $1919,3''$ ($0,5244^\circ \text{ à } 0,5422^\circ$)

Ellipticité: 3.3%



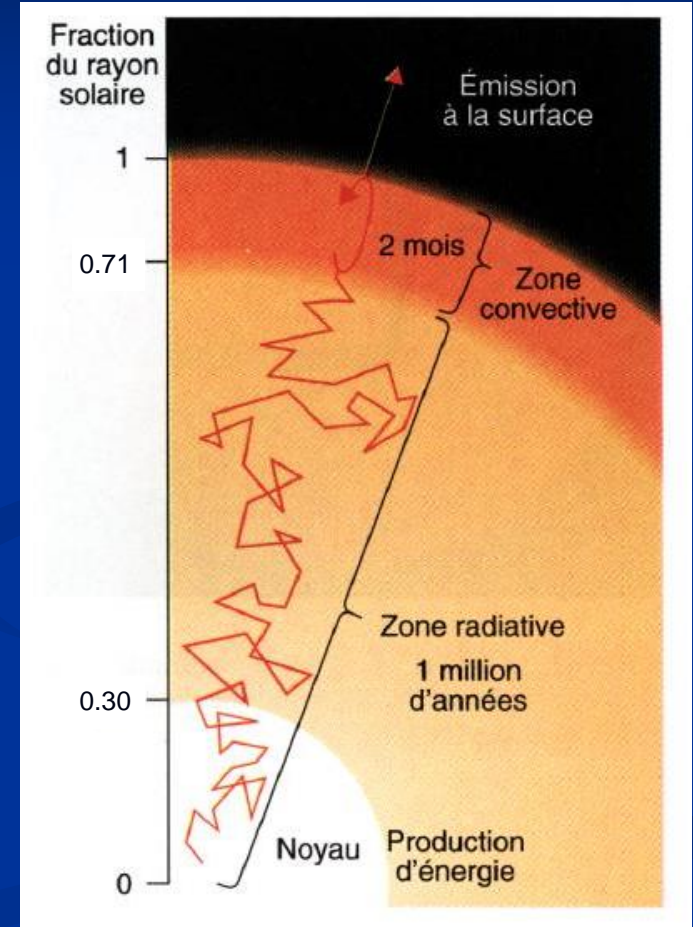
Les multiples rôles du Soleil

- Attraction gravitationnelle sur les planètes (orbites, marées)
- Environnement déterminé par l'absorption du rayonnement électromagnétique solaire (des rayons gamma aux infrarouges)
- Influences par l'émission corpusculaire (électrons, protons, particules α , etc.):
 - Vent solaire: perte de masse de 2 millions de tonnes par seconde
- Neutrinos solaires:
 - Pas d'influence mais information directe sur les réactions nucléaires centrales.

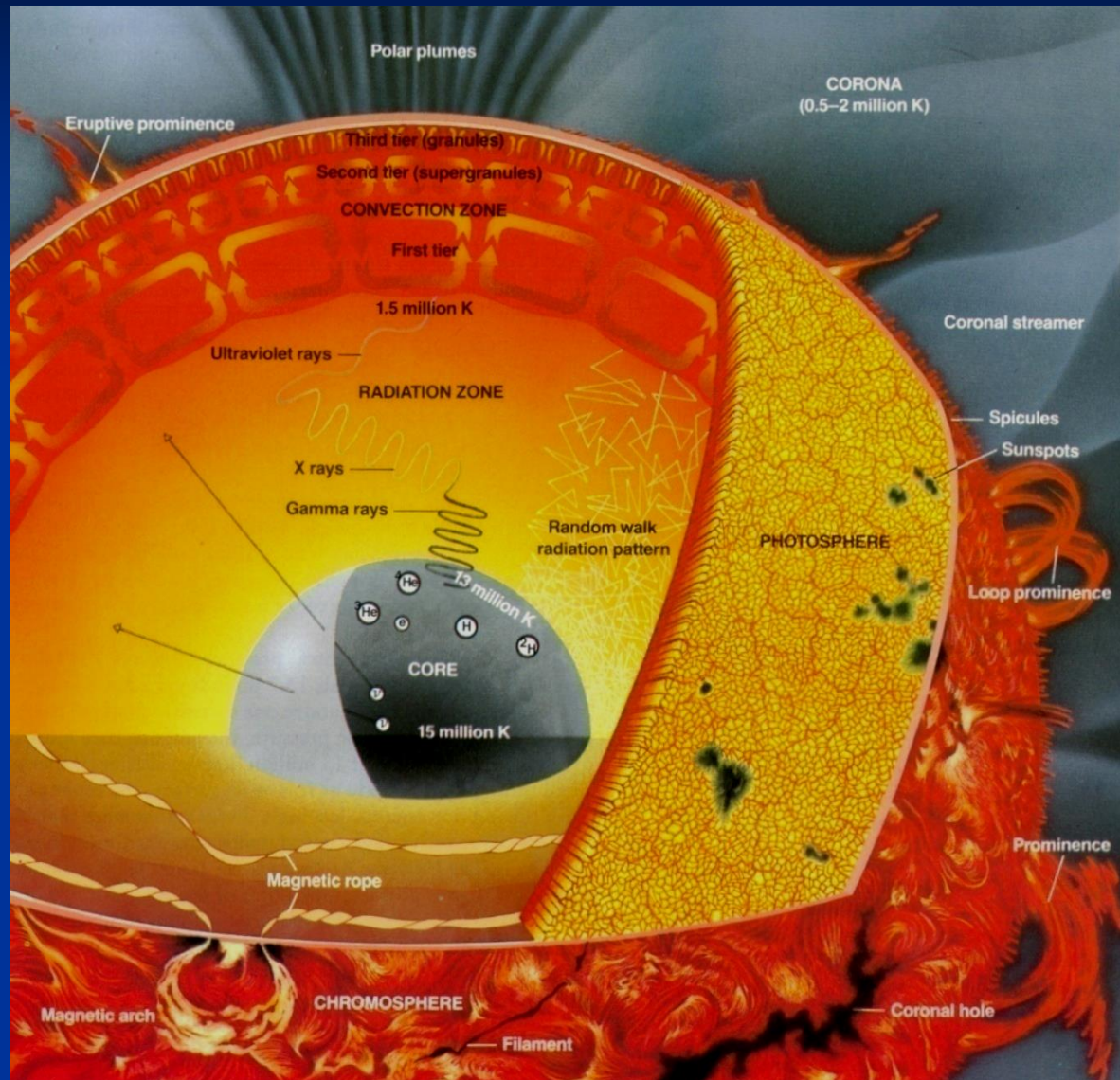


Le Soleil: structure interne

- Cœur:
 - 0 à 0,30 R_s (3% du volume)
 - Siège des réactions nucléaires
- Zone radiative:
 - 0,30 à 0,71 R_s (33% du volume)
 - Transport d'énergie par les photons (gamma)
 - Temps de transport: 10^6 ans
- Zone convective:
 - 0,71 à 1 R_s (64 % du volume)
 - Transport d'énergie par convection à grande échelle
 - Ionisation partielle de l'H et l'He sous la surface → $C_p/C_v < 5/3$ (exposant adiabatique)
 - Seulement 2% de la masse du Soleil, mais rôle essentiel pour l'activité et la vent solaire
 - Temps de transport: 2 mois

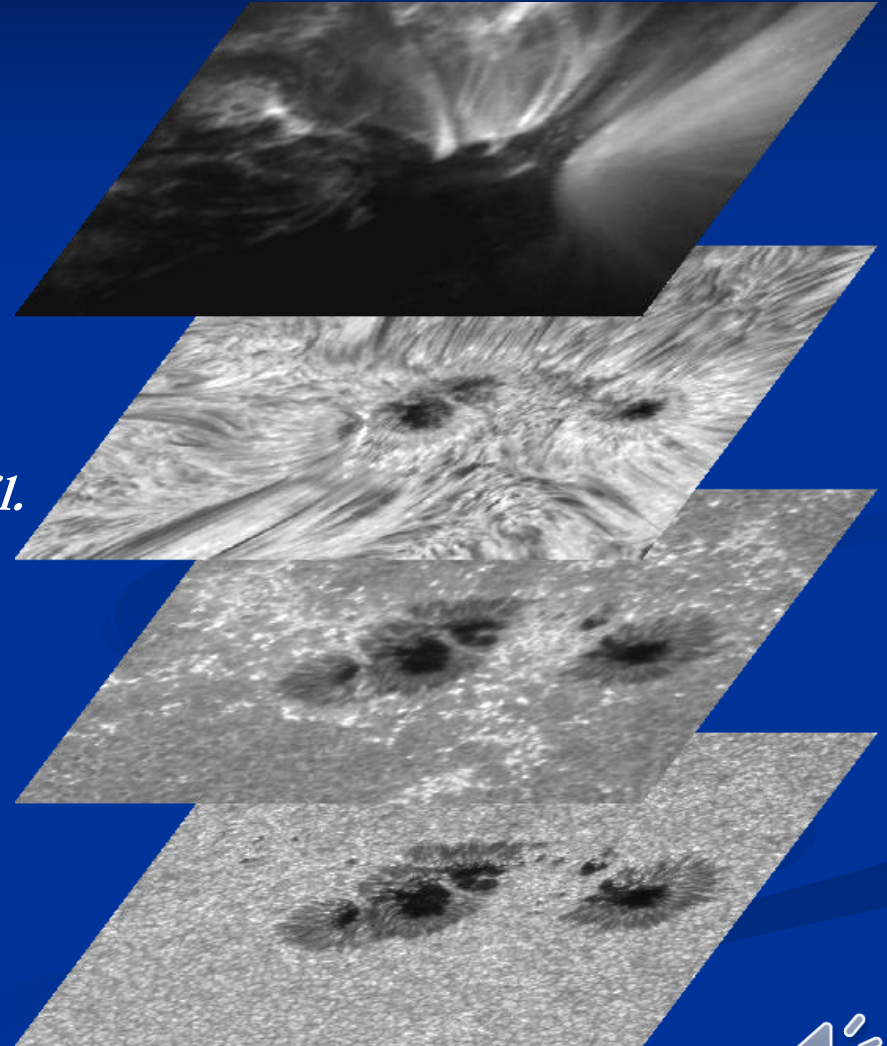
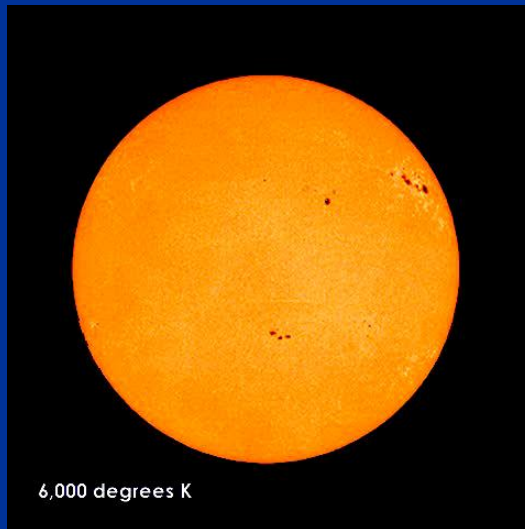


Le Soleil: structure interne



L'atmosphère calme: introduction

- 4 couches principales:
 - Photosphère
 - Chromosphère
 - Couche de transition
 - Couronne (héliosphère)
- Changement complet des conditions physiques à travers ces couches:
➔ ***Changement total d'aspect du Soleil.***



La Photosphère: propriétés

- Épaisseur: 500km (1" vu de la Terre > limbe solaire net)

- Sommet = minimum de température

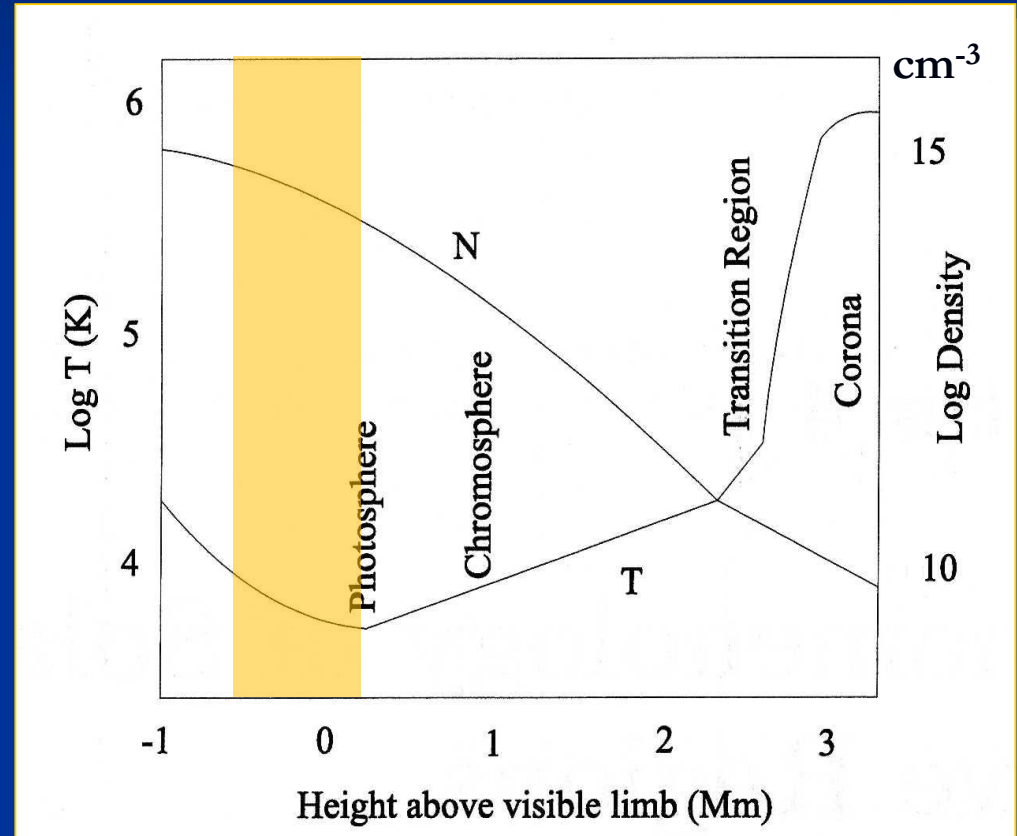
- Échelle de hauteur pour la pression:

$$H_p = kT/mg = p/\rho g$$

où m est la masse moléculaire moyenne

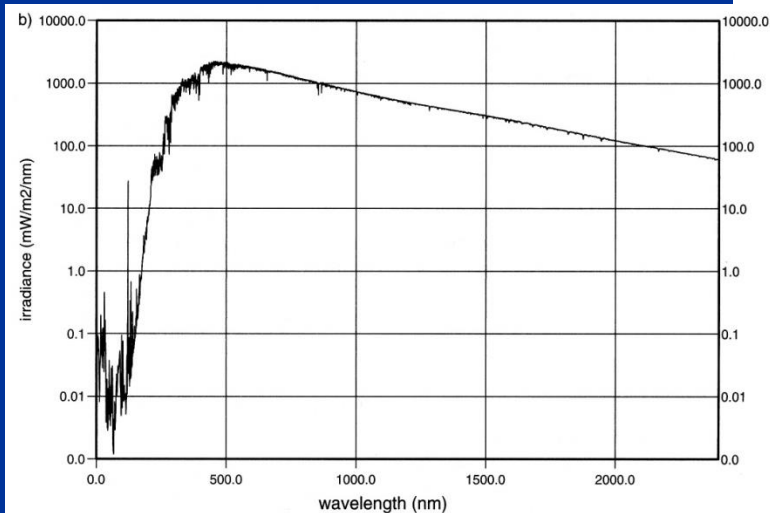
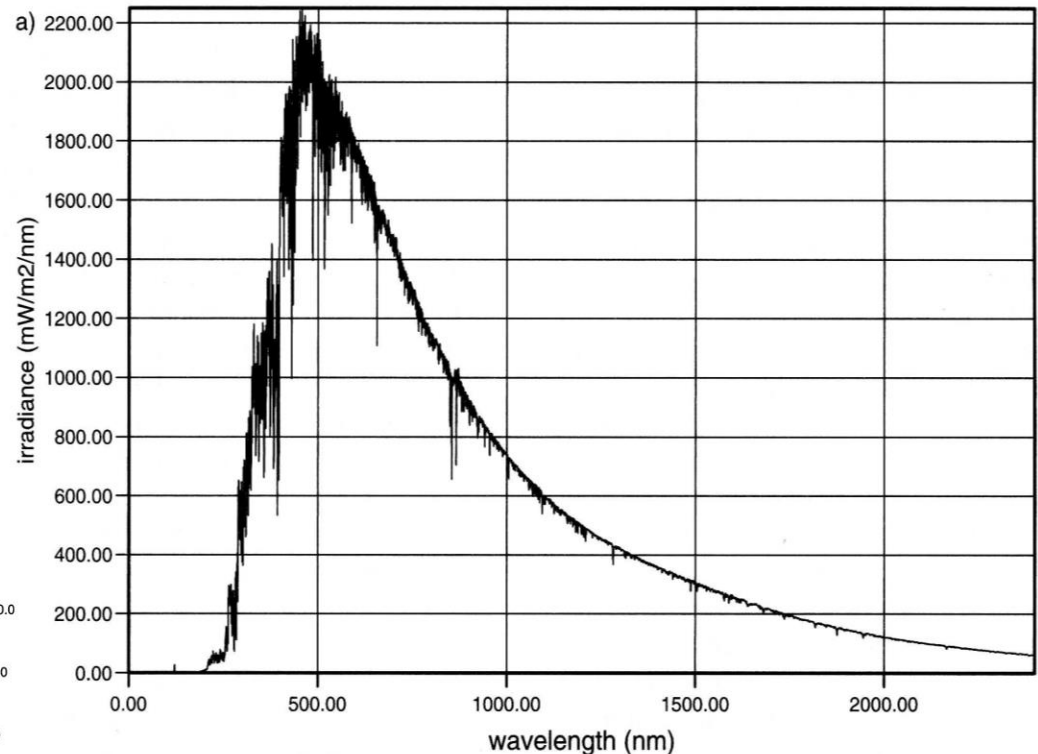
- Avec $T=5000K$,
 $H_p= 150 \text{ km}$
(Couronne: 10^6K , $H_p= 30000 \text{ km}$)

- Source de 95% du rayonnement du Soleil (visible et infrarouge)



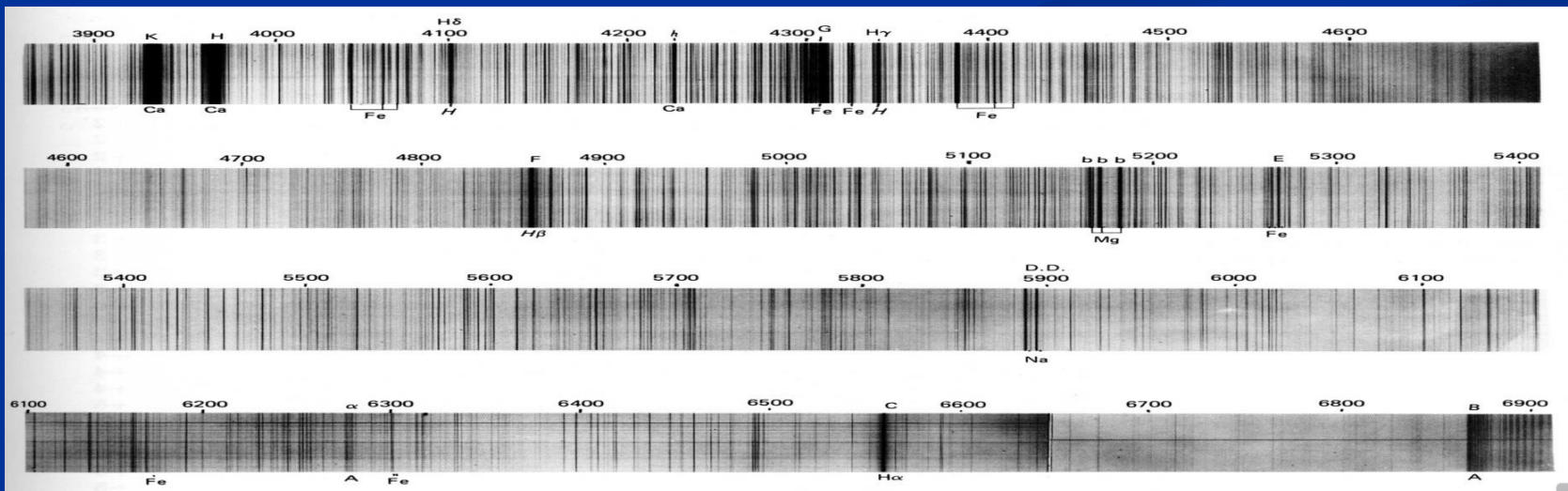
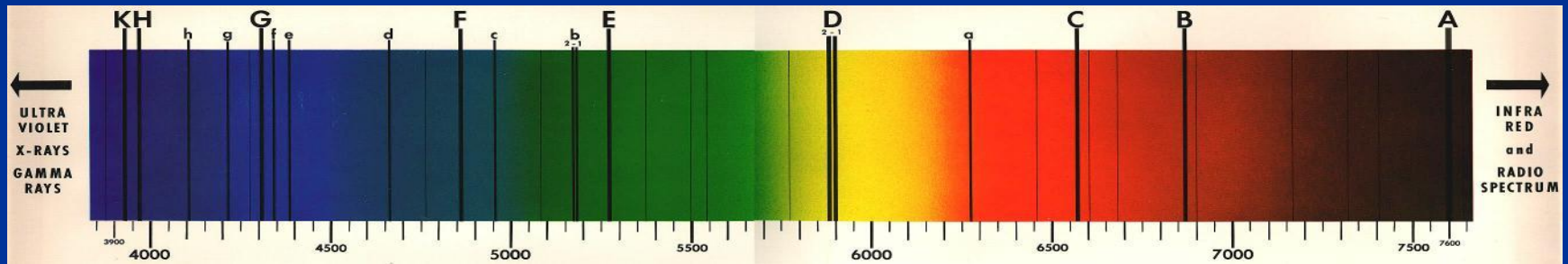
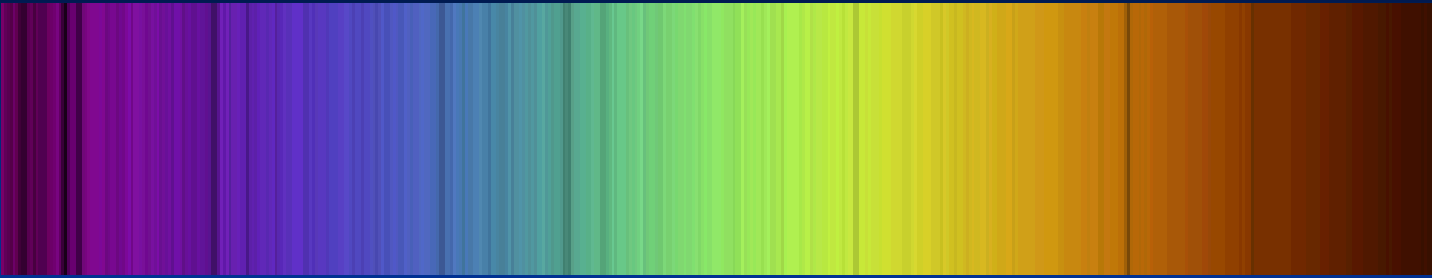
Éclairement spectral et sa variation

- Éclairement spectral:
 - 95% dans le visible et l'IR
 - Proche du rayonnement d'un corps noir à 6000K
 - Variabilité < 1% dans cette bande



- Mesures de l'éclairement spectral absolu disponible dans la gamme 200 à 2000 nm (Mission ATLAS, spectrographe à grille SOLSPEC, *Thuillier et al. 2004*)

Photosphère: le spectre visible



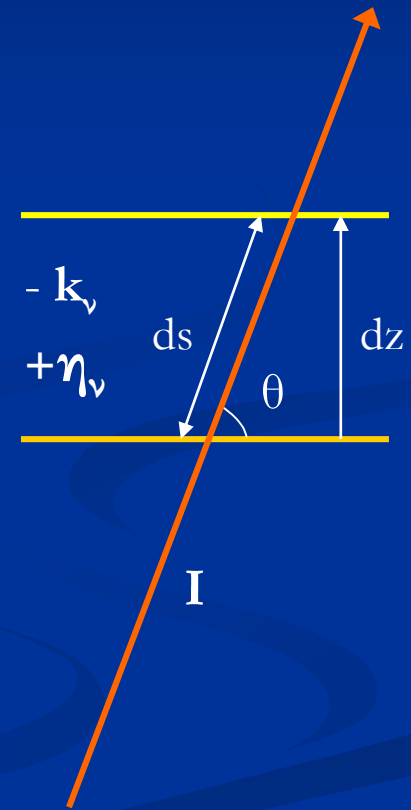
Photosphère: transfert radiatif

- Fort gradient thermique négatif → absorption du rayonnement émergent par les couches plus froides
- Hypothèse: atmosphère plan-parallèle

Soit I_ν la densité de flux ($\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{ster}^{-1}$), l'équation de transfert radiatif s'écrit:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = k_\nu (S_\nu - I_\nu)$$

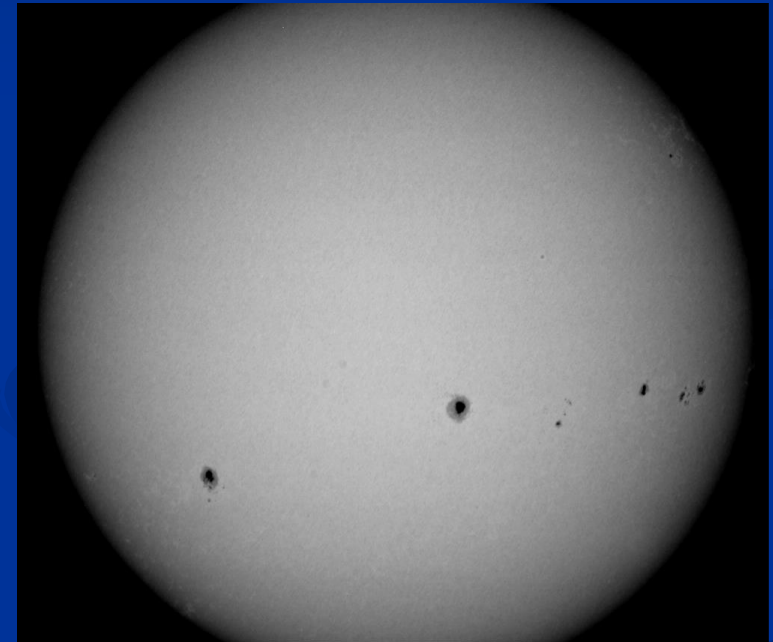
où k_ν : coefficient d'absorption
 S_ν : fonction source de l'émission
 $\eta_\nu = k_\nu \cdot S_\nu$ est l'émissivité ($\text{W m}^{-3} \text{Hz}^{-1} \text{ster}^{-1}$)
 $ds = -dz / \sin\theta = -dz / \mu$
avec dz = élément de profondeur géométrique et θ inclinaison du rayon lumineux



Photosphère: transfert radiatif

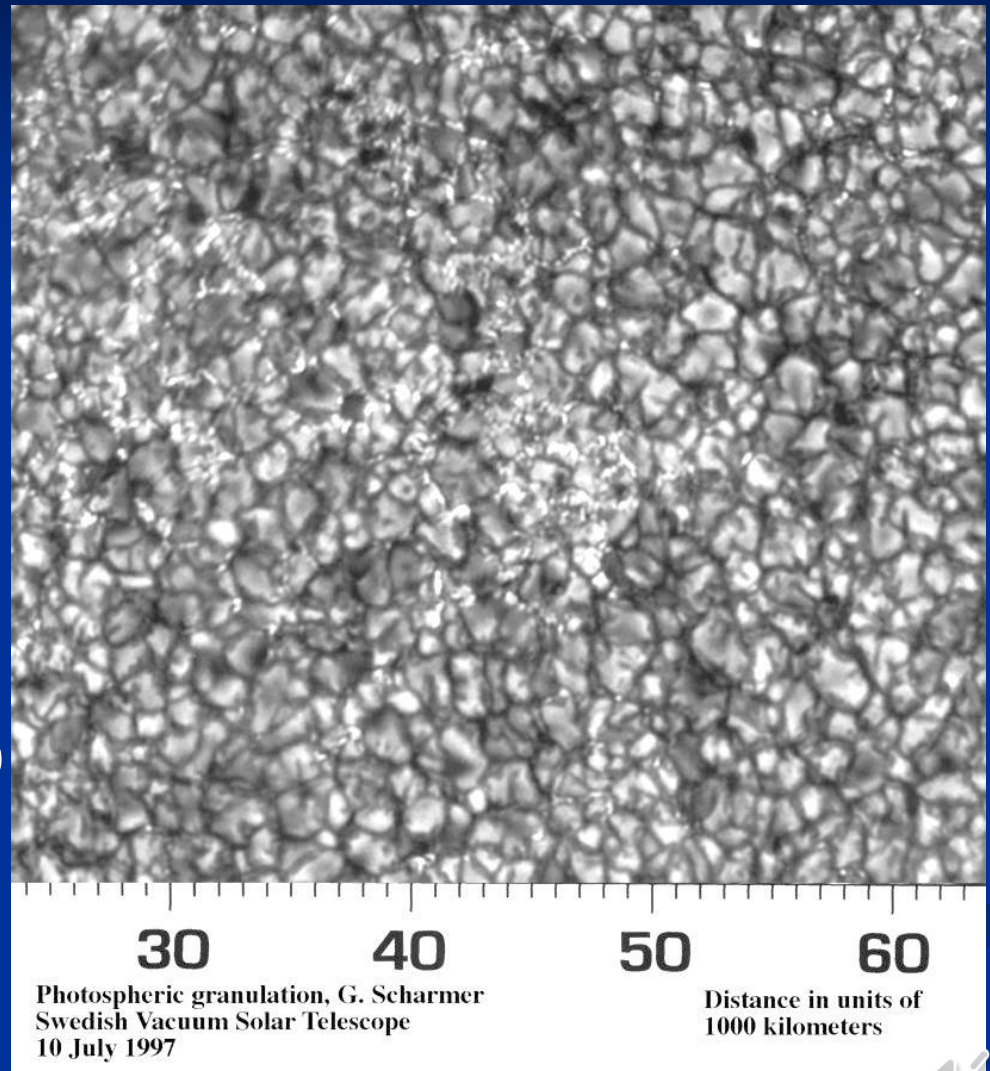
$$I_\nu(\tau_\nu = 0, \mu) = \int_0^\infty B_\nu(T) e^{-\tau_\nu/\mu} \frac{d\tau_\nu}{\mu}$$

- Par la dépendance à μ , on obtient une relation entre la directivité du rayonnement et la distribution spectrale
 - La dépendance de l'assombrissement centre-limbe à la longueur d'onde ν donne $\tau_\nu(\nu)$
 - Si $I_\nu(0,0)$ (spectre observé au centre du disque) est également connu, alors on en déduit la variation de B_ν en fonction de ν (donc $T(\nu)$).
 - De $\tau_\nu(\nu)$ et $T(\nu)$, on tire $T(\tau_\nu)$



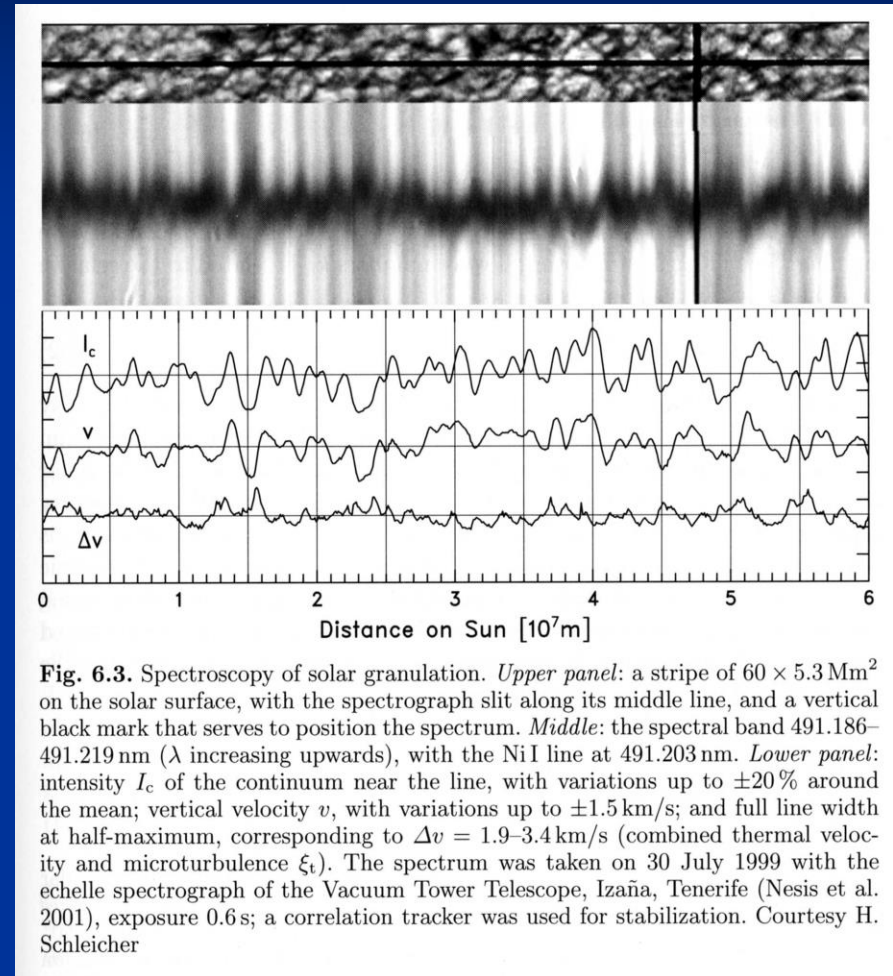
Photosphère calme: la granulation

- La surface solaire est couverte d'un motif constitué de granules brillantes séparées par un réseau de sillons sombres
- Empreinte des mouvements convectifs subphotosphériques
- Taille d'un granule: 500 à 1500 km, en moyenne 1000 km (1,35")
- Contraste du motif: 10% ($\Delta T=150$ K)

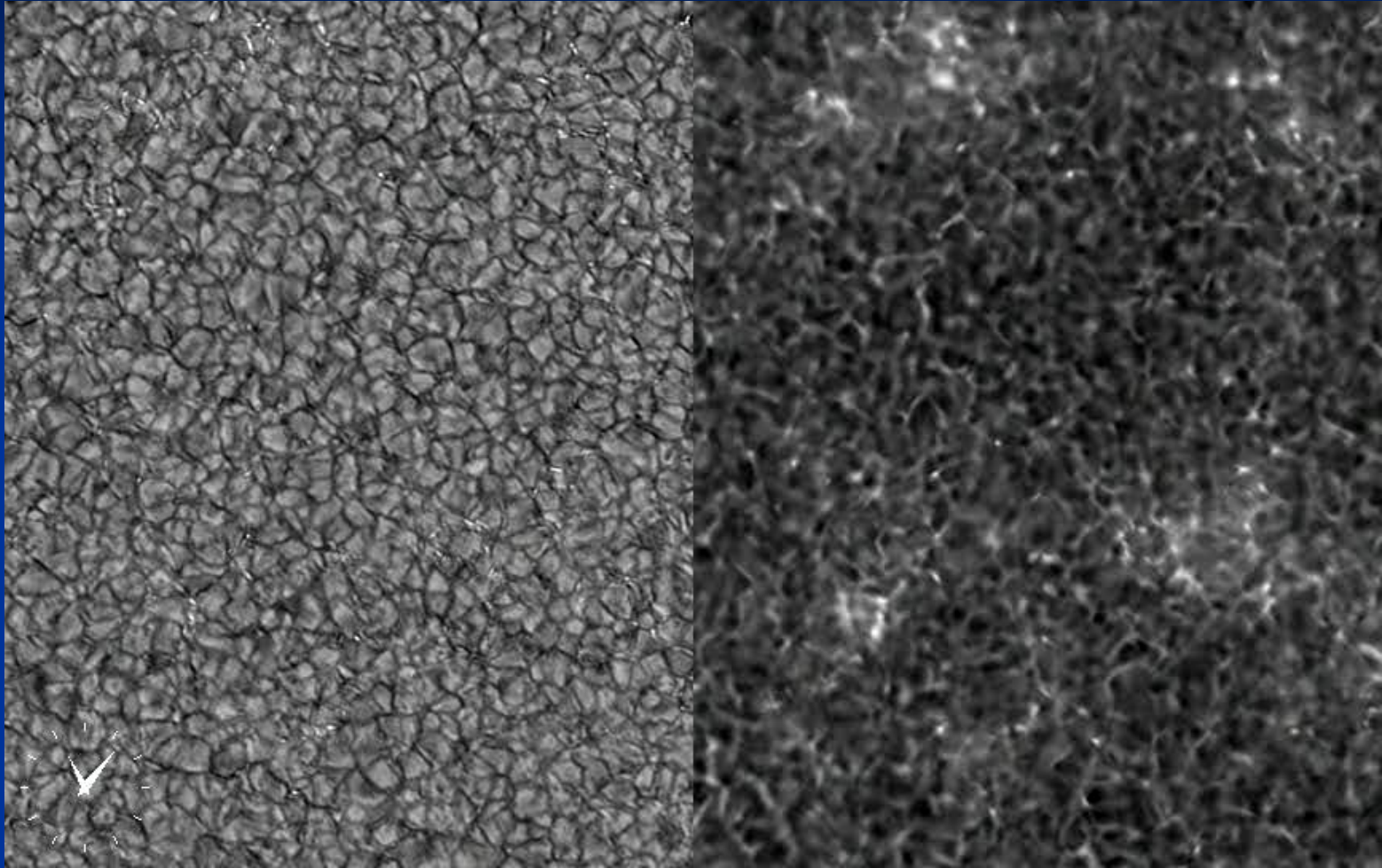


Photosphère calme: la granulation

- Champ de vitesse (spectrographie Doppler):
 - Centre des granules: ascendant
 - Intergranules: descendant
 - Vitesses: 1-2 km/s
- Durée de vie: 0 à 20 min (moyenne: 8 min)
 - Formation: émergence dans les sillons intergranules
 - Disparition par subsidence ou plus souvent par fragmentation
- Fournit l'excitation stochastique d'ondes acoustiques (modes p) se propageant à l'intérieur du Soleil.



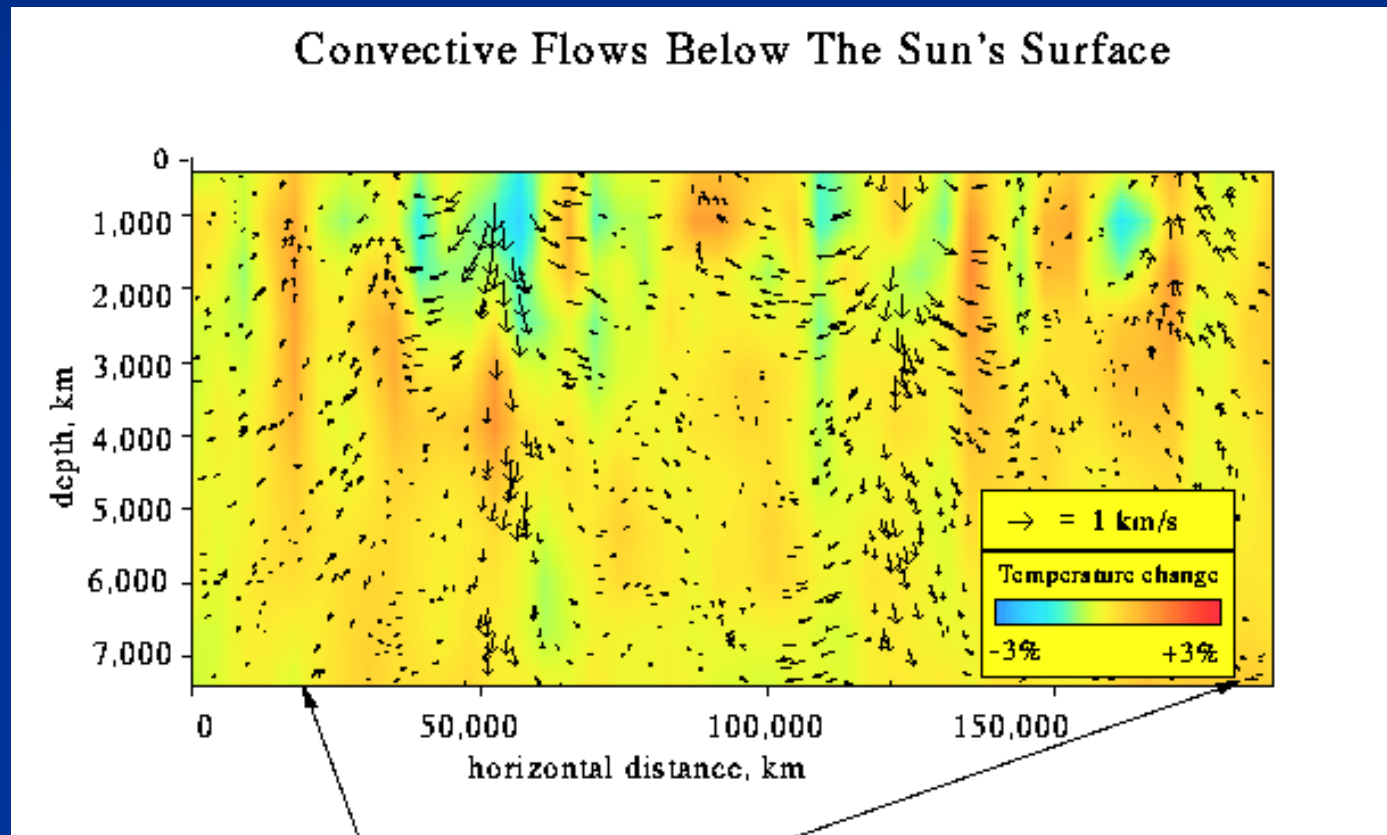
Photosphère calme: la granulation



- Film: Swedish Solar Telescope, La Plama, Tenerife. Gauche: intensité, Droite: vitesses Doppler

Photosphère calme: la granulation

- Échelle verticale des cellules convectives semblable à la dimension horizontale

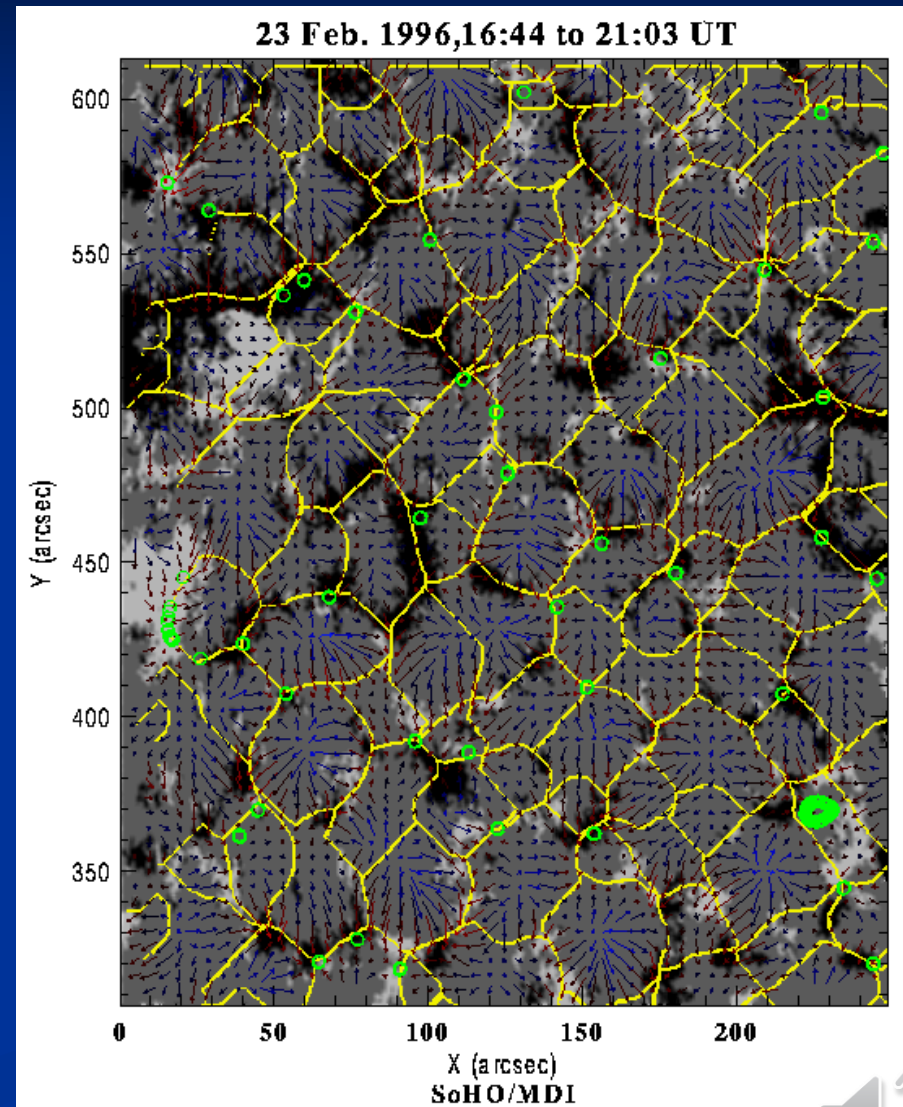


Photosphère: supergranulation

■ Supergranulation

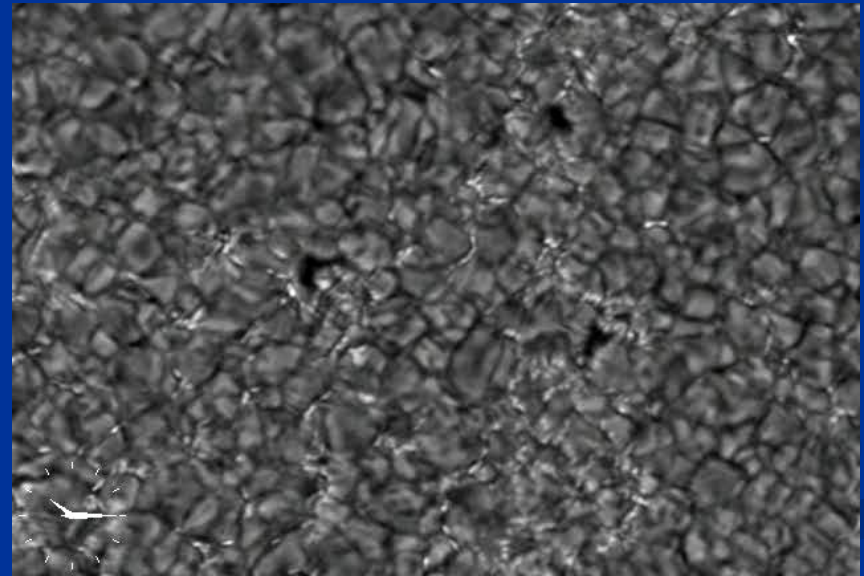
(Leighton 1962):

- Echelle: 20 à 30 Mm
- Environ 20000 supergranules sur tout le Soleil
- Durée de vie: 12 h en moyenne
- Cellules animés de flux divergeant horizontaux ($v = 400$ m/s).
- Divergences des éléments de flux magnétiques, qui se concentrent en bordure des cellules (*voir réseau chromosphérique*)



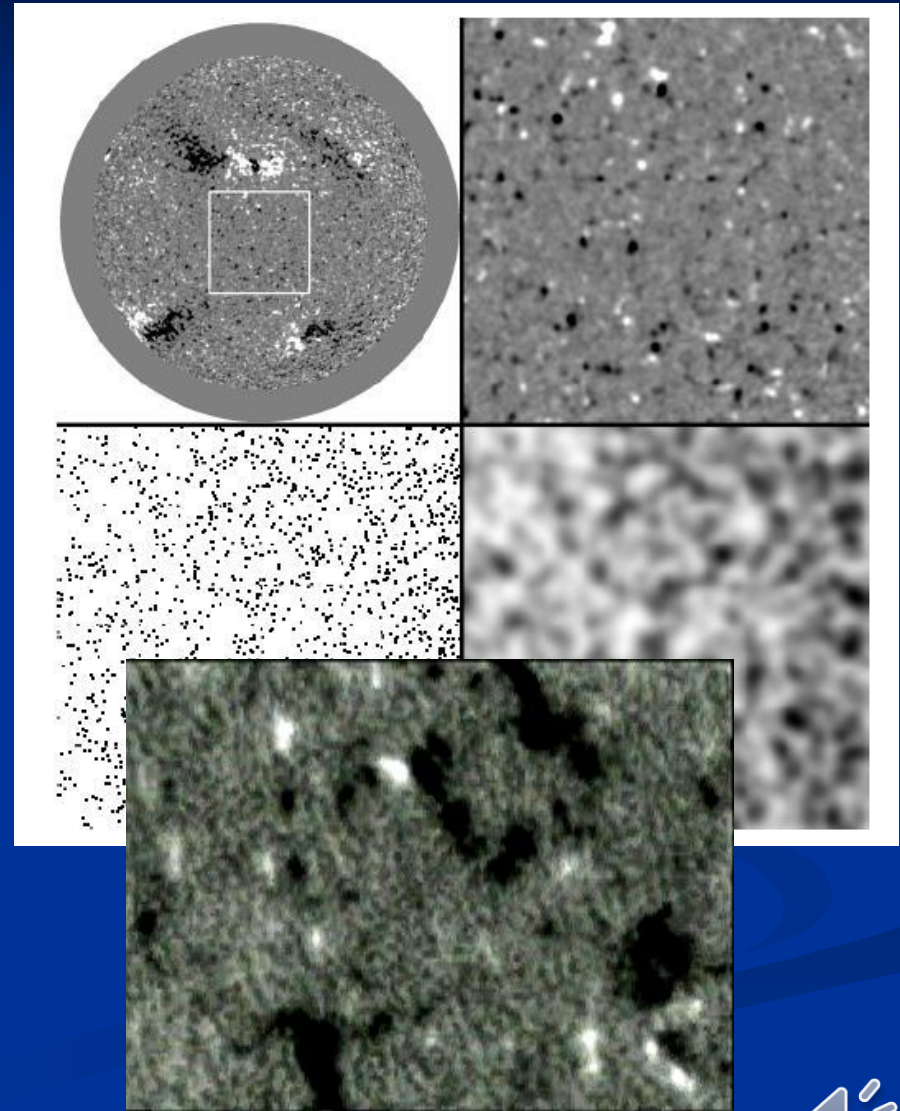
Photosphère calme: Points brillants et tubes de flux

- Points brillants:
 - Localisés dans les sillons intergranules
 - Bien contrastés dans la bande G (430nm, CH, TiI, TiII, FeI, CaI)
 - Concentration du champ magnétique dans les courants descendants: le champ photosphérique est entièrement contenu dans ces concentrations
- Tubes de flux:
 - Diamètre: <100km
 - Induction magnétique: 0,1 à 0,15T (1000 à 1500 G)
 - Canaux transportant l'énergie convective sous forme d'ondes magnéto-acoustiques vers les couches supérieures (Choudhuri, 1993)



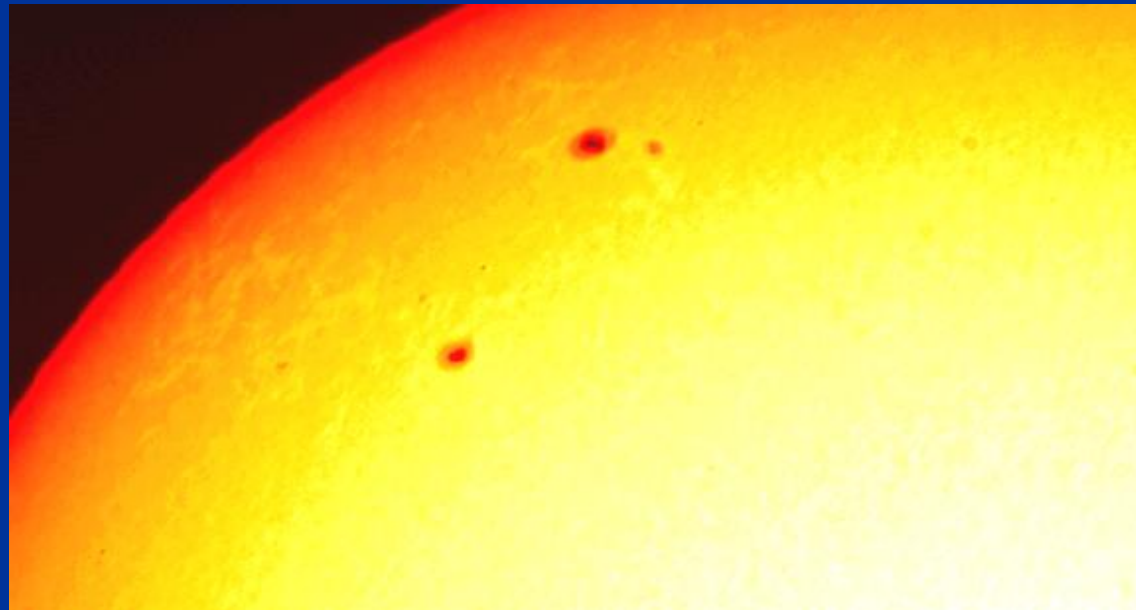
Photosphère: régions éphémères

- Petites régions à courte durée de vie contenant un champ magnétique dipolaire et couvrant toute la surface du Soleil calme.
- Flux total émergeant dans les RE:
 $5 \times 10^{23} \text{ Mx/j}$,
soit $2 \times 10^{18} \text{ Mx s}^{-1}$
(1800 régions/h)
 - Flux suffisant pour remplacer le flux magnétique total du soleil calme ($3 \times 10^{23} \text{ Mx}$) en 14h.



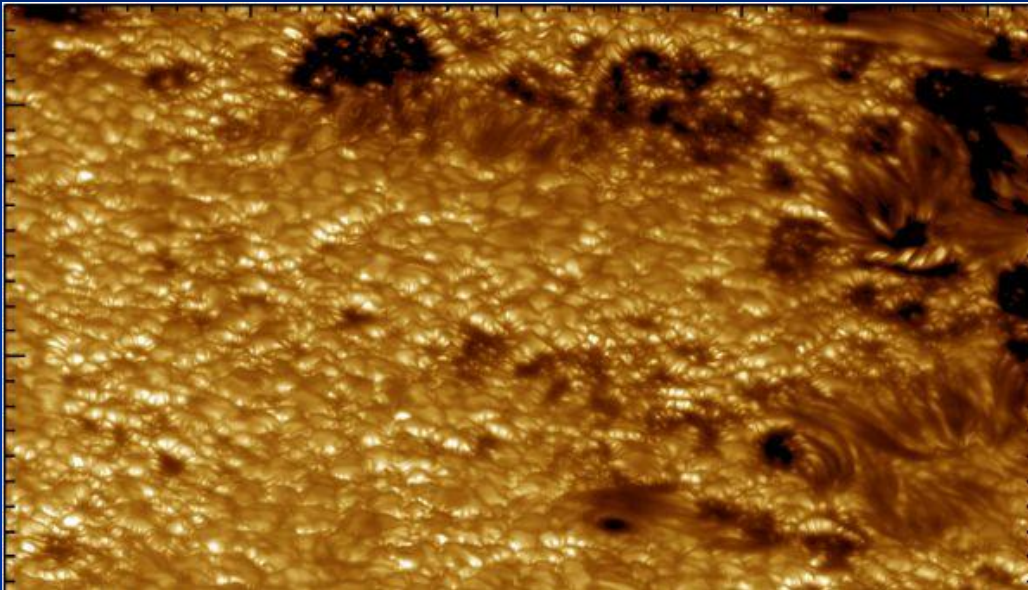
Photosphère: les facules

- Plages plus brillantes aux contours complexes correspondant à des concentrations plus fortes du champ magnétique:
 - Régions plus chaudes (qqes centaines de degrés)
 - Altération du motif granulaire
 - Tubes de flux renforcés, de plus grande section.
- Contraste faible (quelques %):
 - Renforcé dans le bleu (surtout dans l'aile de la raie Ca IIK, 396 nm)
 - Renforcé près du limbe (facules invisibles au centre du disque)



Photosphère: facules

- Emission anisotrope avec un minimum à la verticale:
 - parois brillantes "invisibles" des granules dans la direction perpendiculaire à la surface;



Swedish Vacuum
Telescope, 2003

- Deux catégories:
 - **Plages faculaires autour des régions actives:**
 - souvent présentes avant la formation et après la disparition des groupes de taches
 - Surface totale faculée souvent égale ou supérieure à la surface des taches solaires.
 - **Facules isolées, quasi ponctuelles:**
 - Présentes aussi dans les régions polaires aux latitudes $> 55^\circ$ (65° en moyenne)
 - Courte durée de vie (min à heures)
 - Plus nombreuses au moment du minimum du cycle solaire (précurseurs du cycle à venir)

➔ **Forme atténuée d'activité, mais jouant un rôle important (bilan radiatif)**

Les taches solaires: historique

- Manifestation la plus ancienne connue de l'activité solaire:
 - Premières observations à l'œil nu plusieurs millénaires avant J-C (Chine)
 - Premières observations télescopiques par Galilée (1610), Fabricius et Scheiner (premières publications)
- 19^{ème} siècle:
 - Schwabe: premières observations systématiques durant 43 ans.
 - Carrington: découverte de la rotation différentielle.
 - R.. Wolf (Zurich, 1816-1893):
 - Collecte de toutes les observations historiques.
 - Introduction de l'indice des taches, le nombre de Wolf:

$$R_z = k(10g + f)$$

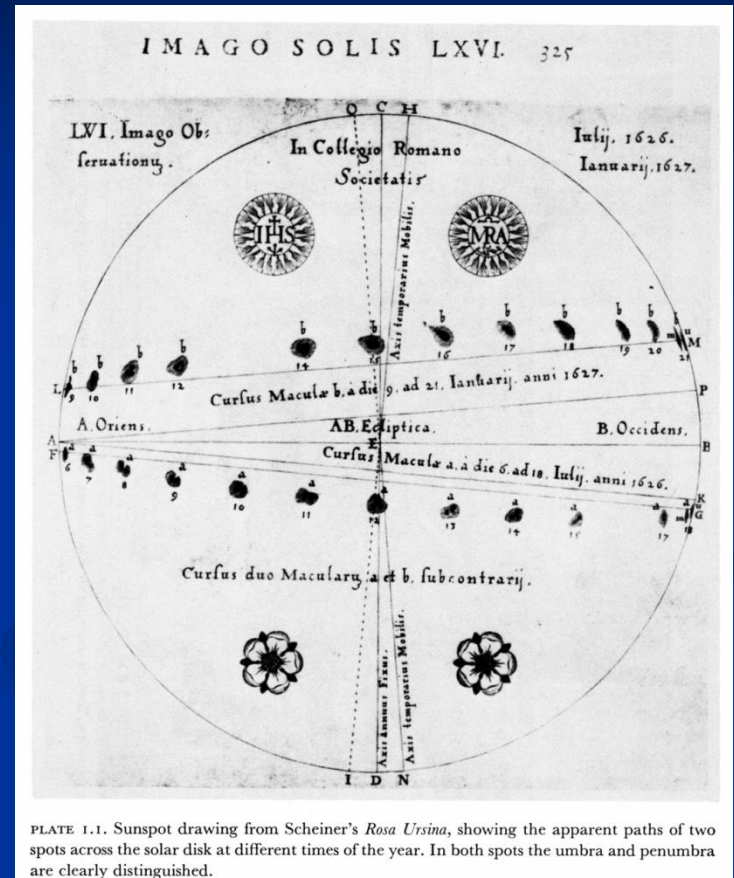


PLATE 1.1. Sunspot drawing from Scheiner's *Rosa Ursina*, showing the apparent paths of two spots across the solar disk at different times of the year. In both spots the umbra and penumbra are clearly distinguished.

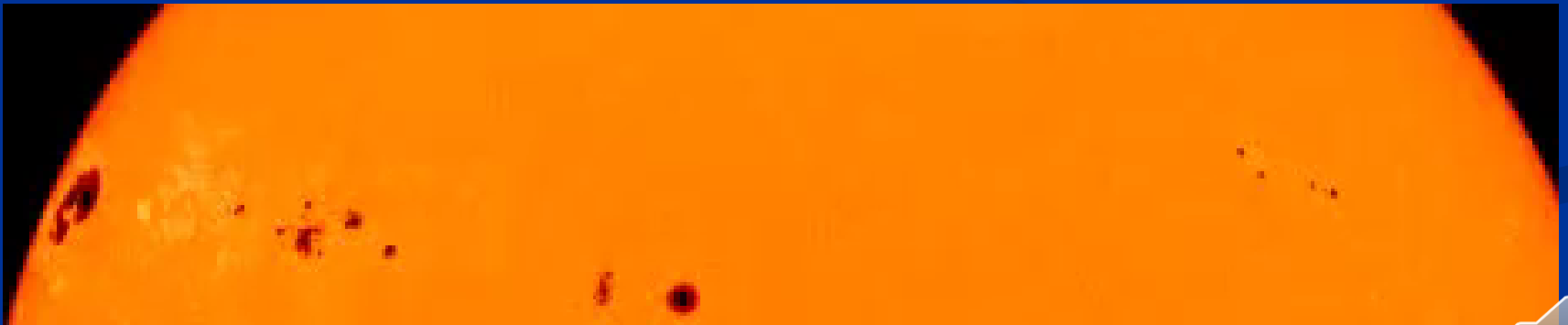
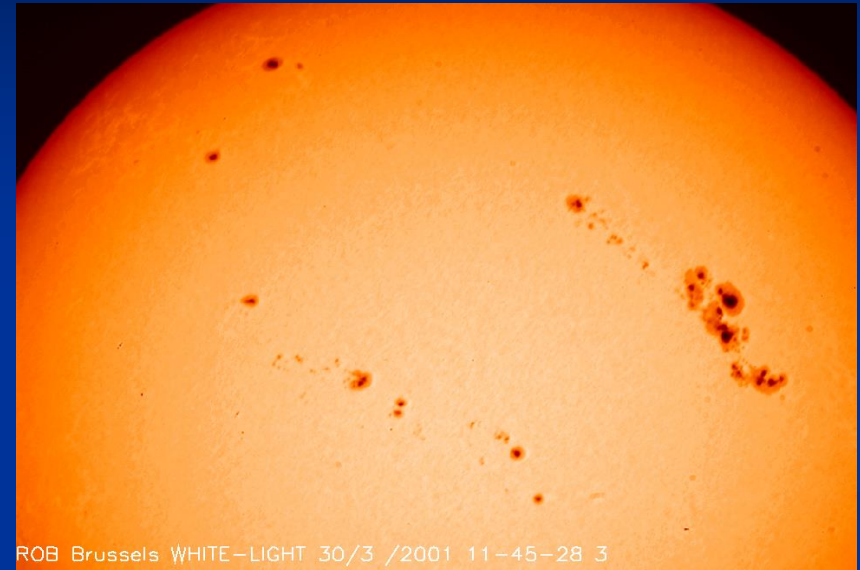
f = nombre totale de taches

g = nombre de groupes

k = coefficient de rattachement de la station

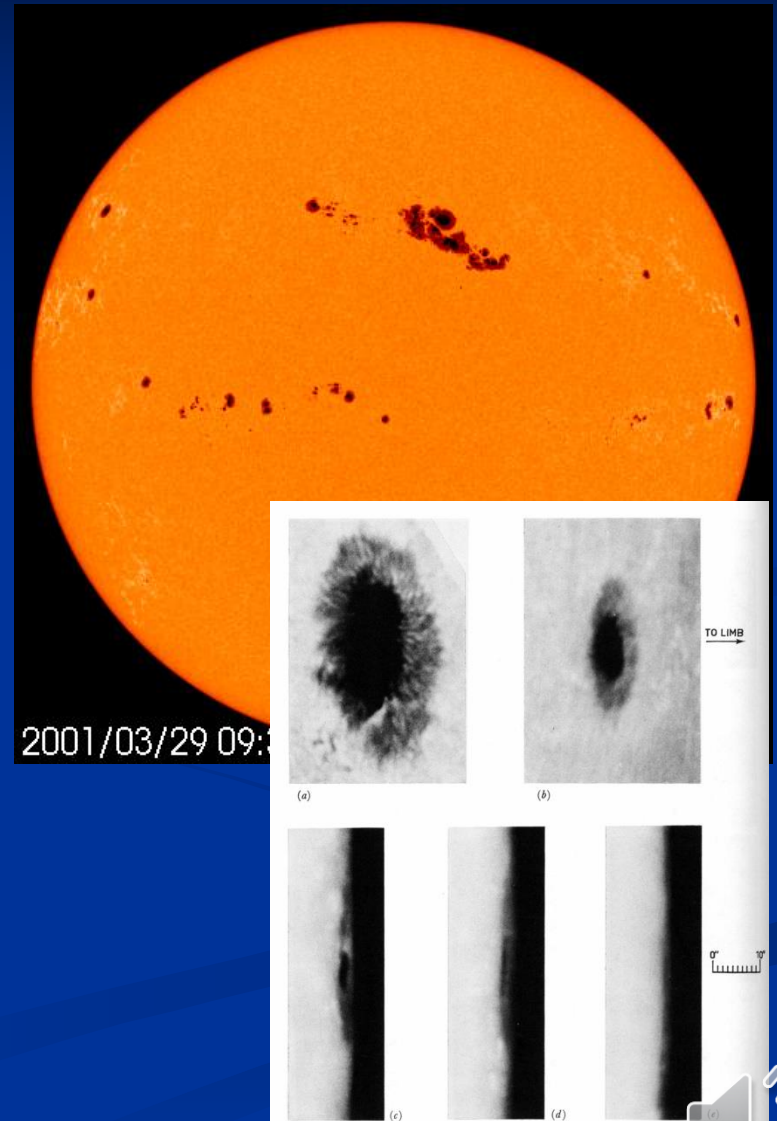
Les taches solaires: propriétés

- Régions plus sombres de la photosphère
- Petites taches sans structure (pores):
 - Diamètre < 2500 km
- Pour $D > 2500$ km, deux zones:
 - **Ombre** centrale:
 - Diamètre = 10 à 15000 km
 - Intensité = 5 à 30% $I_{\text{Photosphère}}$
 - **Pénombre**:
 - D: jusqu'à 50000km
 - Intensité = 50 à 70 % $I_{\text{Photosphère}}$



Les taches solaires: propriétés

- Durées de vie: quelques heures à plusieurs mois
- Température de l'ombre: 4000K
 - Par la loi de Stefan $E_{\text{tot}} = \sigma T^4$, le flux d'énergie est réduit de 20% par rapport à la photosphère calme (5800K).
- Groupes allongés dans la direction E-W
- Répartition en deux bandes à latitudes intermédiaires: 5 à 40° de latitude
- Effet Wilson (1769): dépression par rapport au niveau de la photosphère moyenne (jusqu'à 10000km)



Les taches solaires: champs magnétiques

- Point de percée de champs magnétiques intenses à travers la mince couche de la photosphère
- Structure globale dipolaire:
 - Polarité N-S orientée E-W
 - Légère inclinaison moyenne par rapport à l'équateur : 12° (Tache de tête, W, plus proche de l'équateur)
- Une tache = une polarité:
 - Groupe traversé par une ligne neutre
 - Topologie parfois très complexe
- Intensité du champ:
 - Ombre : 0,3 T (3000 G)
 - Pénombre, 0,1T (1000 G)
 - *Mesure des champs magnétiques par l'effet Zeeman.*

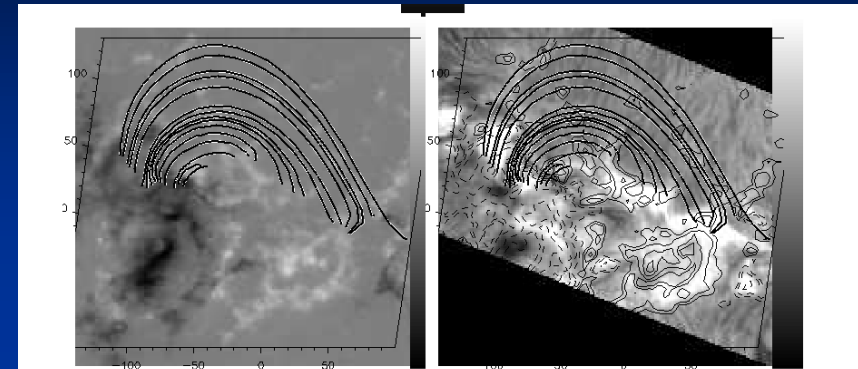
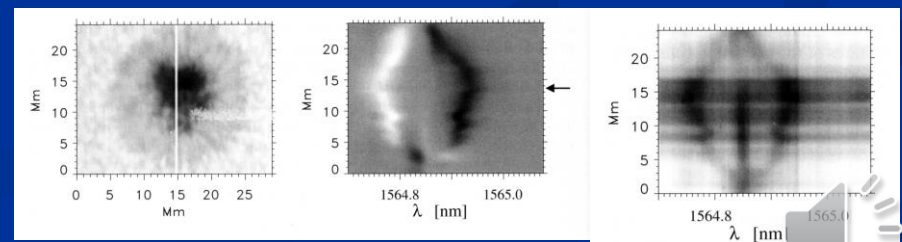
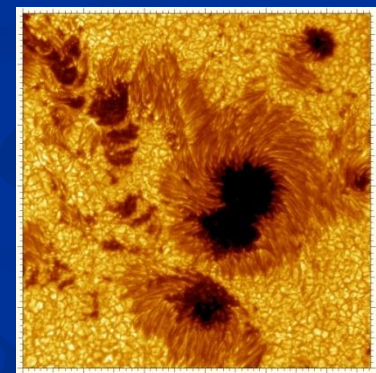
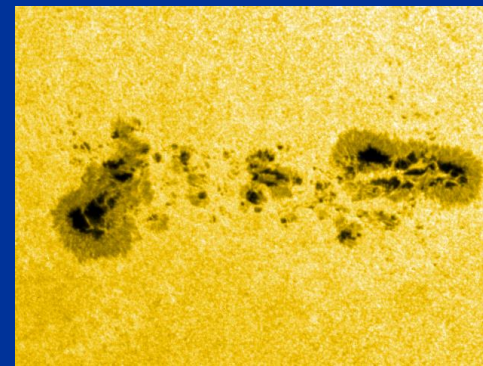
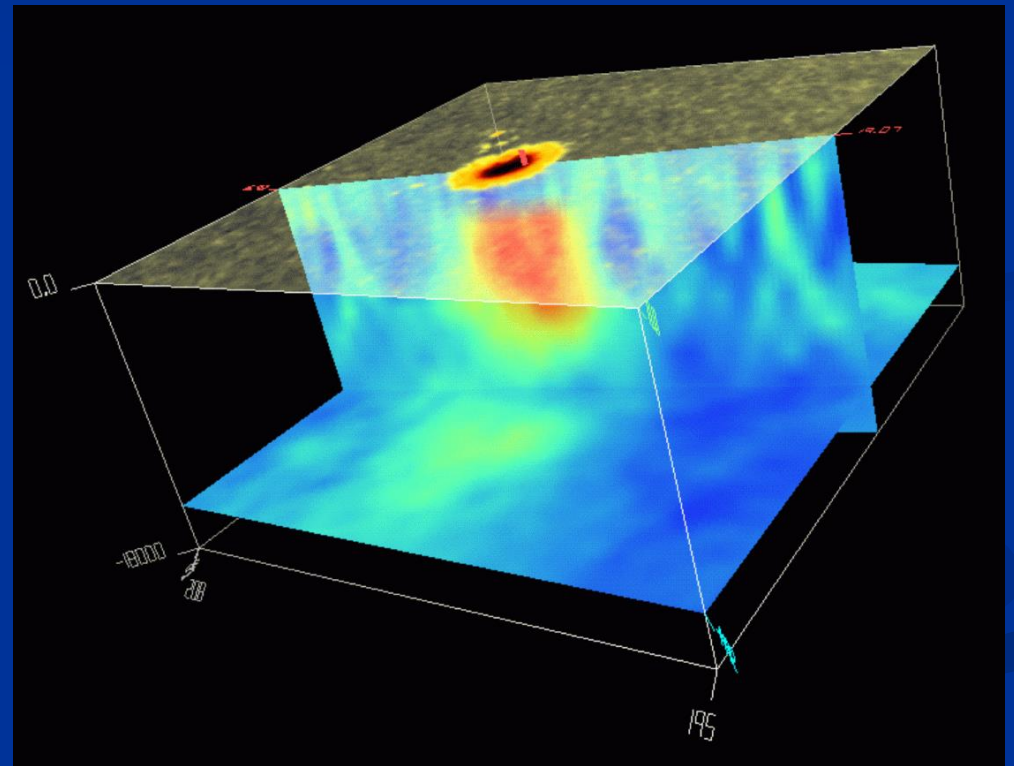
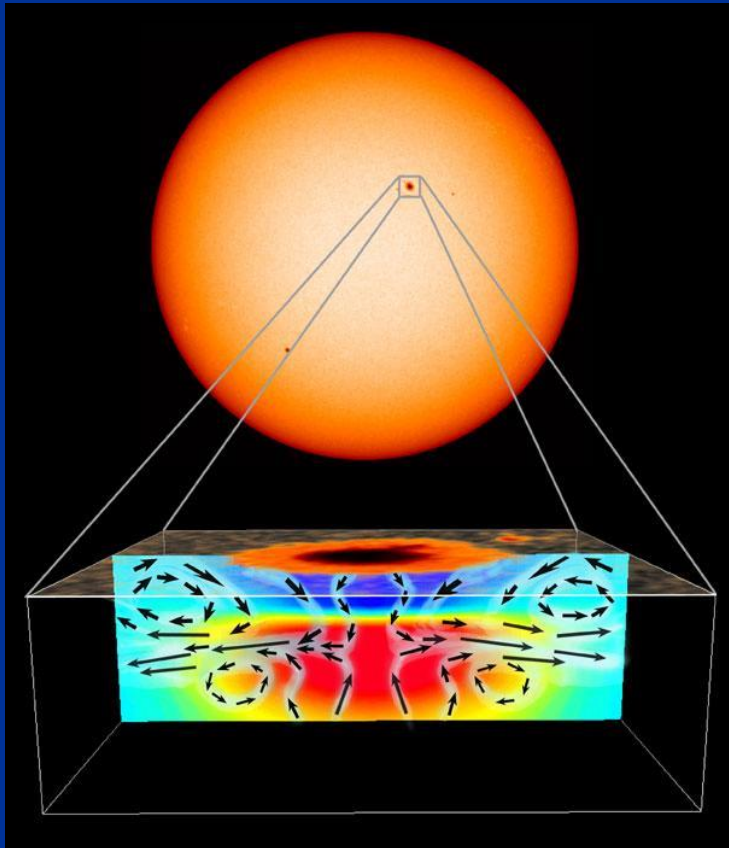


Fig. 11. (top left) superposition of the TRACE 195 Å image of 16:59 UT with a sample of magnetic field lines resulting from the *lfff* extrapolation. (top right) projection view of the field lines shown in the bottom panels. Continuous (resp. dashed) contours stand for positive (resp. negative) vertical fields. North is toward the left. (bottom right) partial view of the flare as observed in H α with the VTT/MSDP at 16:00 UT. The field lines are the ones which are rooted in the flare ribbons R1 and R2 as well as in

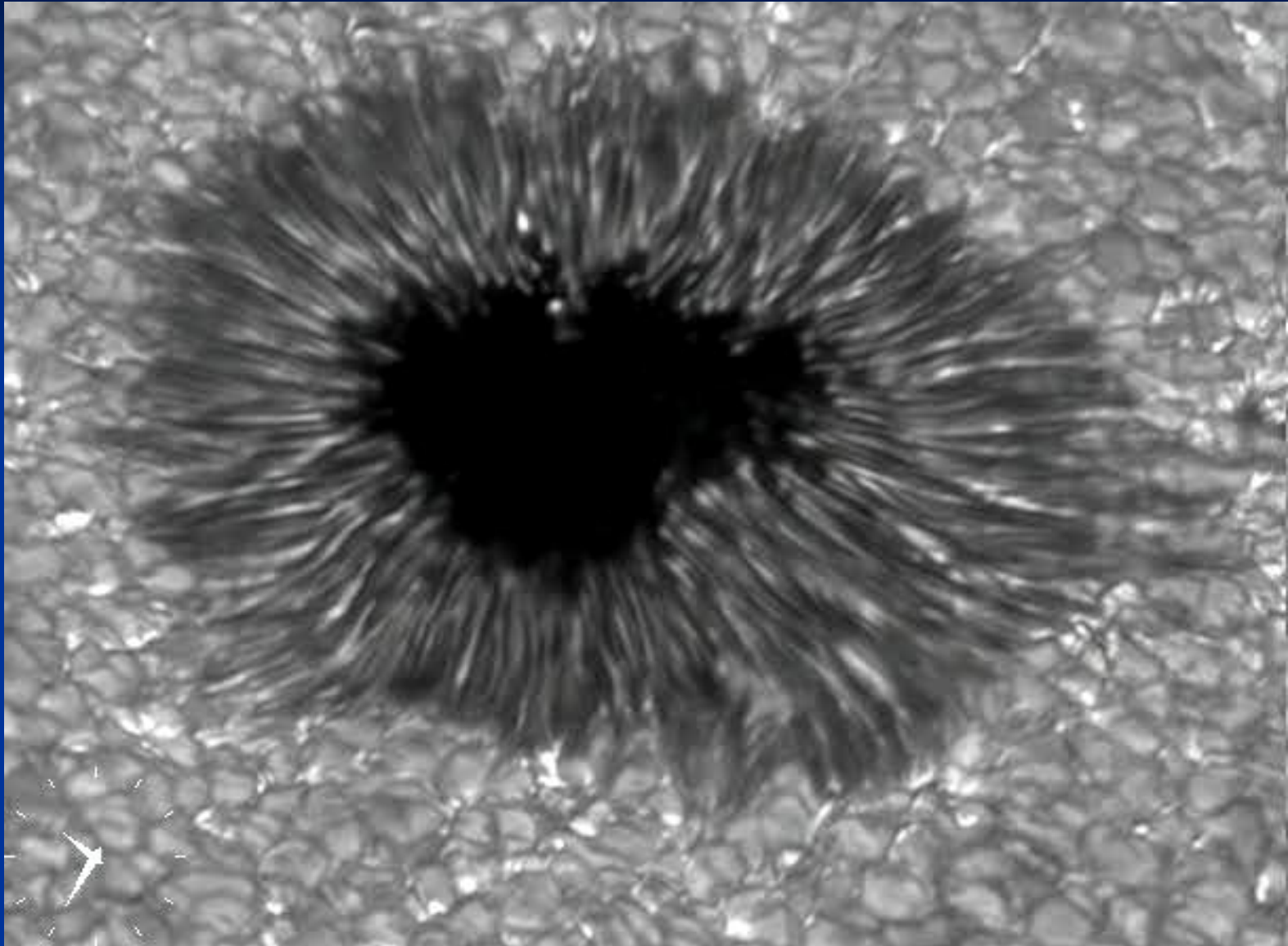


Champs magnétiques: sondage acoustique

- Hélioséismologie: perturbation de la propagation des ondes acoustiques (modes p) en profondeur.
- Détection d'une corde de flux magnétique sous une tache solaire (données: SOHO:MDI, réseau au sol GONG)



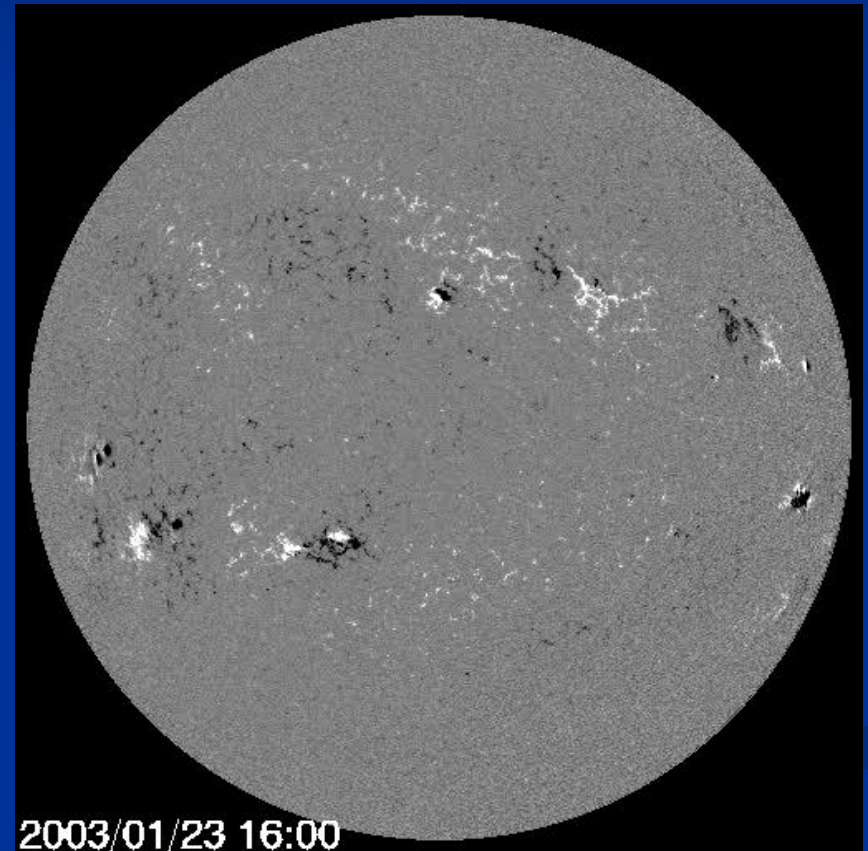
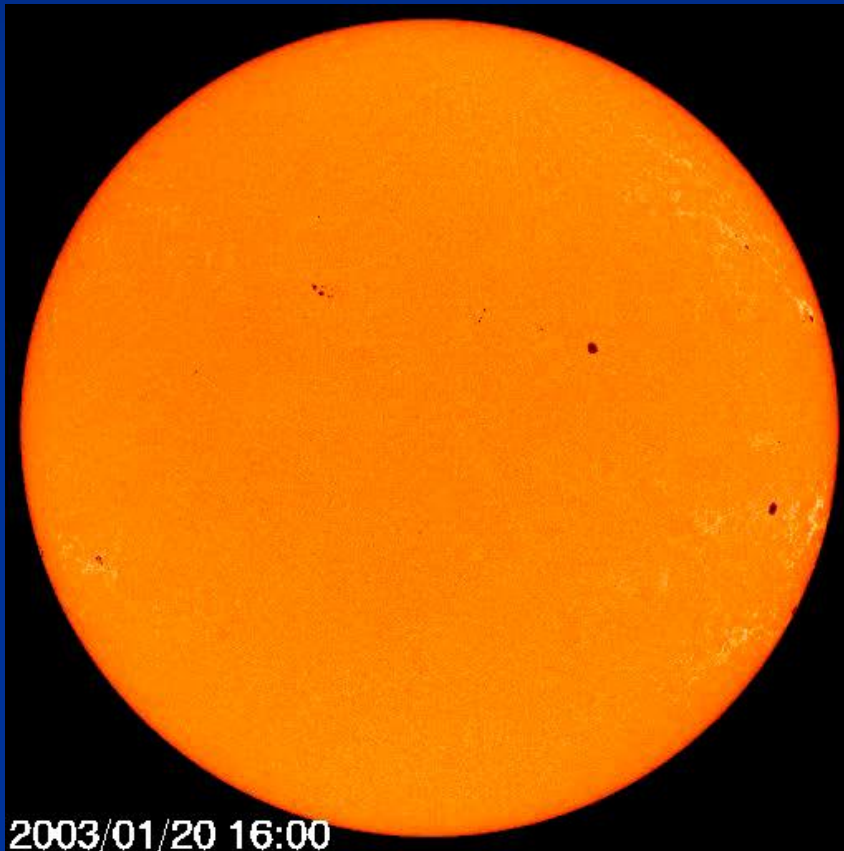
Dynamique d'une tache solaire (*Dutch Open Telescope*)



Les taches solaires: évolution globale

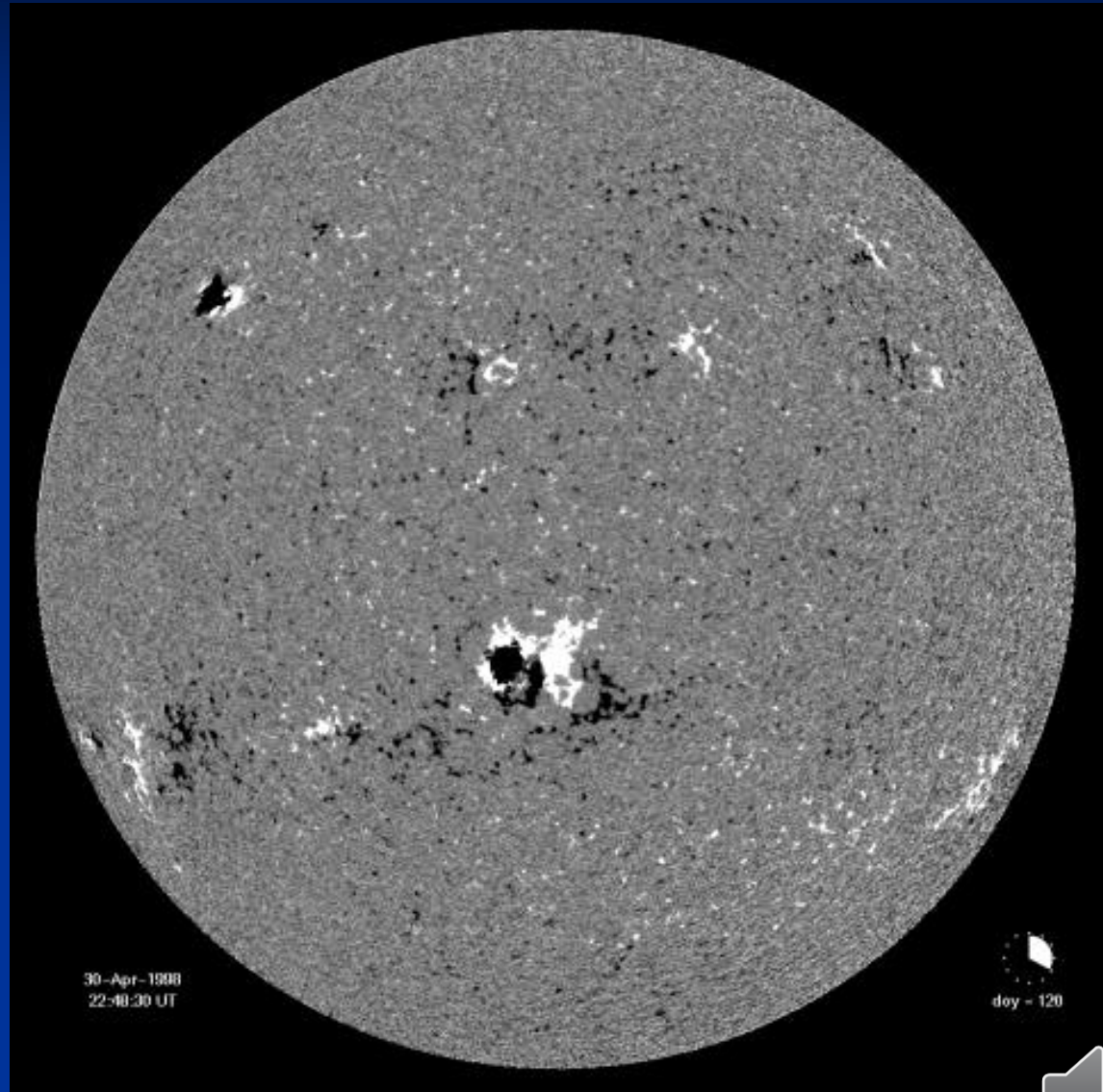
- Une rotation solaire enregistrée par SOHO/MDI
- Intensité

Magnétogramme



Les taches solaires: "hiérarchie" des champs

- SOHO/MDI: mai 1998
- Groupes "jeunes":
 - Champ compact
- Groupes "anciens":
 - Champ fragmenté
 - Flux dispersé
- Champs "résiduels":
 - Vastes zones à polarités dominantes opposées
 - Ligne neutre diagonale
- Faible champ global dipolaire (10^{-4} T) qui s'inverse avec le cycle de Hale (22 ans)



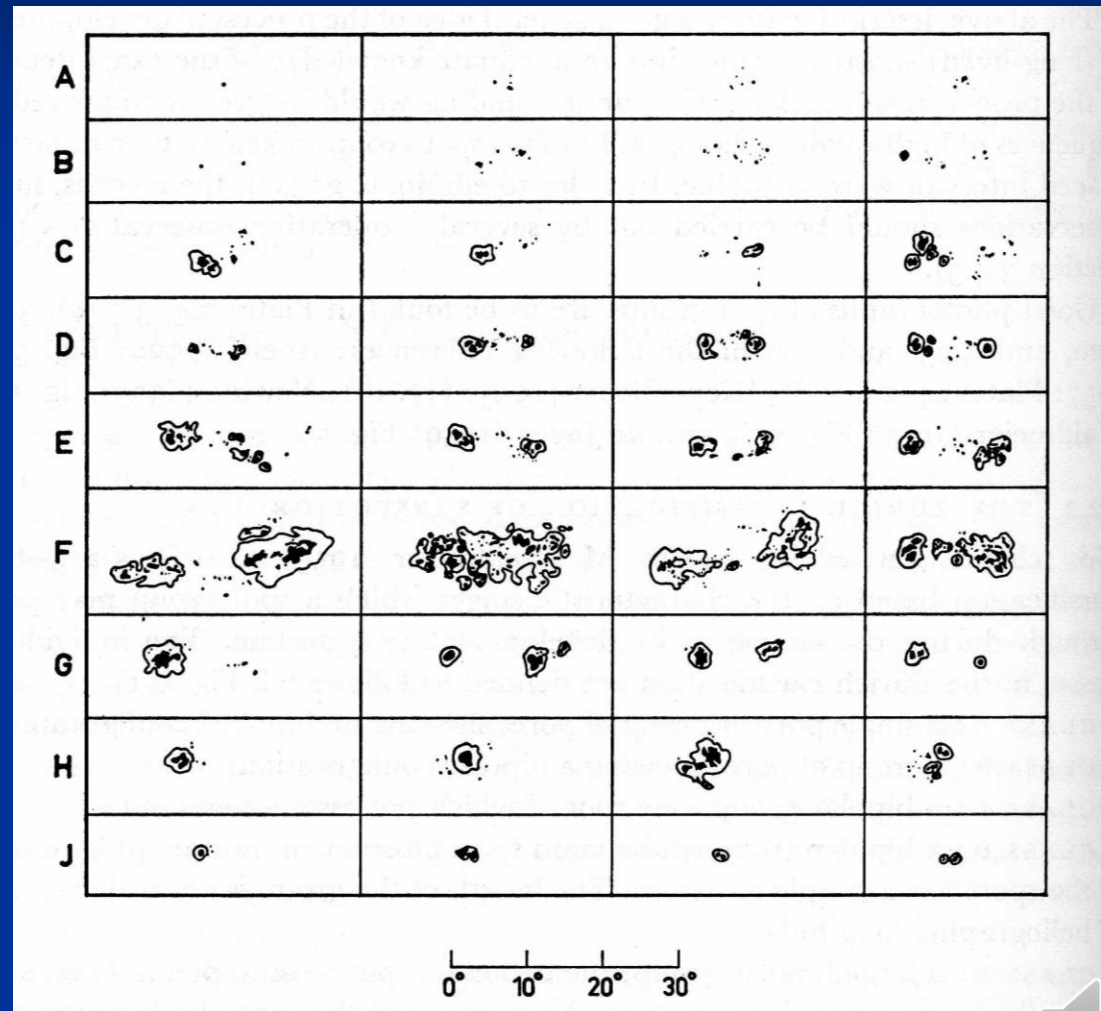
Les taches solaires: classification de Zurich

■ Basé sur un scénario typique d'évolution (Waldmeier)

- **A:** tache ponctuelle sans pénombre (apparition)
- **B:** groupe dipolaire symétrique
- **C,D:** groupes dipolaire avec pénombre de plus en plus développée et asymétrie entre taches principales.
- **E:** grands groupes complexe
- **F:** très grands groupes (développement maximum)
- **G, H, J:** décroissance du groupe jusqu'à une tache isolée avec pénombre (déclin final)

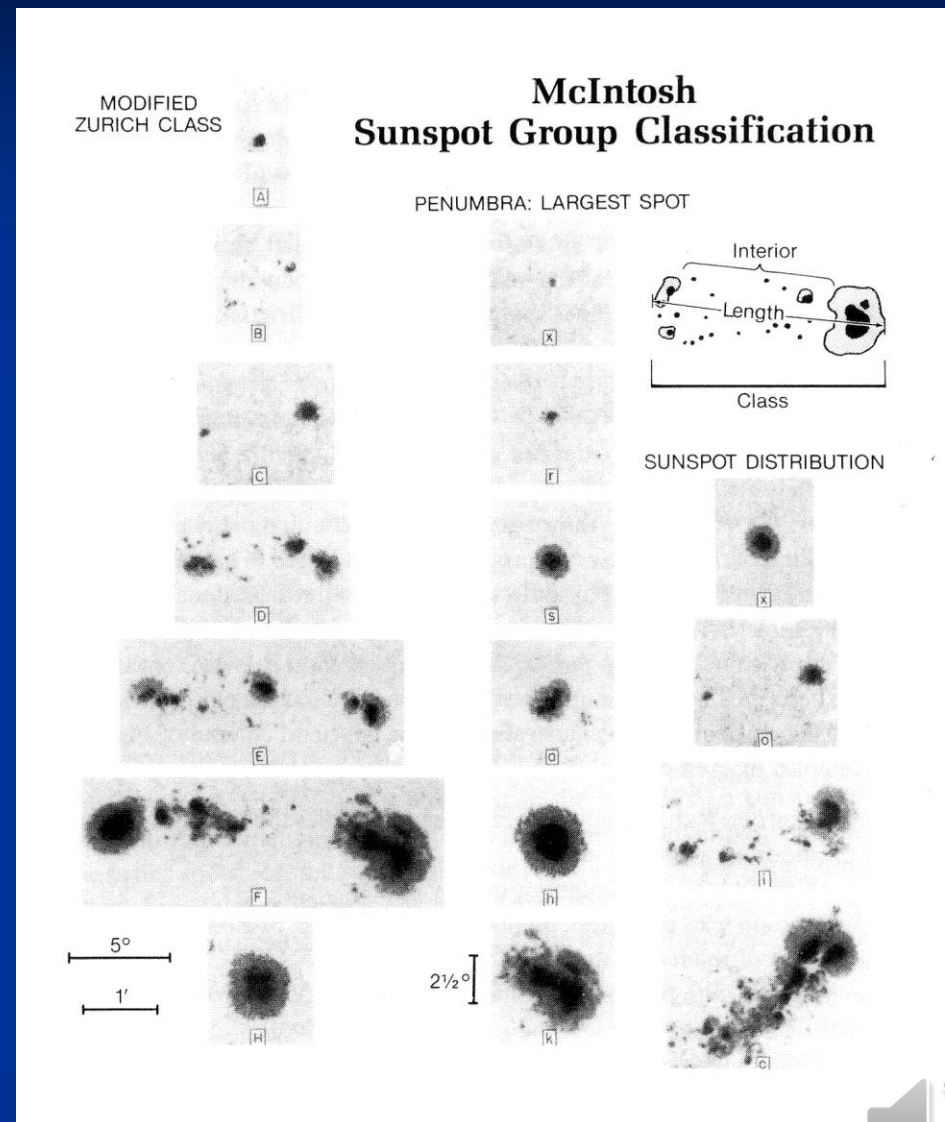
Seuls les groupes les plus importants parcourent tous ces stades. D'autres, plus petits, ne passent que par les stades simples.

Octobre 2017



Les taches solaires: classification de Mc Intosh

- Extension des classes de Zurich
- Type en trois lettres "Zpc":
 - "Z" la classe de Zurich modifiée
 - "p" décrivant la pénombre de la tache principale
 - "c" qui décrit la répartition des taches à l'intérieur du groupe.



Classification magnétique du Mont Wilson

- **Alpha :**
 - groupe unipolaire
 - Correspond aux types A, H
- **Beta :**
 - groupe dipolaire présentant une division simple et nette entre les polarités
 - correspond grosso-modo à B, C et F évolué
- **Beta-Gamma :**
 - groupe bipolaire dans lequel il est impossible de tracer une ligne continue entre les polarités opposées (présence de polarités "parasites")
 - correspond grosso-modo à D, E.
- **Gamma :**
 - Région complexe avec distribution irrégulière de polarités opposées, ne permettant pas de le classer comme bipolaire
 - Type F en général.
- **Delta** (qualificatif pouvant s'ajouter aux précédents):
 - groupe à configuration magnétique complexe avec en outre des ombres de polarités opposées, séparées de moins de 2° dans une même pénombre
 - Types E et F peu évolué

BIPOLAR GROUPS	β	
	βp	
	βf	
	$\beta\gamma$	
UNIPOLAR GROUPS	α	
	αp	
	αf	
COMPLEX GROUPS	γ	
	WEST	EAST

Fig. 6.4. The magnetic classification of sunspot groups. 'N' and 'S' indicate north and south polarities respectively. The shaded areas represent K faculae.

Taches solaires et rotation différentielle

- Taches: meilleurs traceurs de la rotation mais:
 - Disponibles seulement pour les latitudes de 0 à 40°
 - Rotation plus rapide pour les groupes "jeunes"
- Loi de rotation déduite des taches (rotation sidérale):

$$\omega = 14,38^\circ - 2,7^\circ \sin^2 \varphi$$

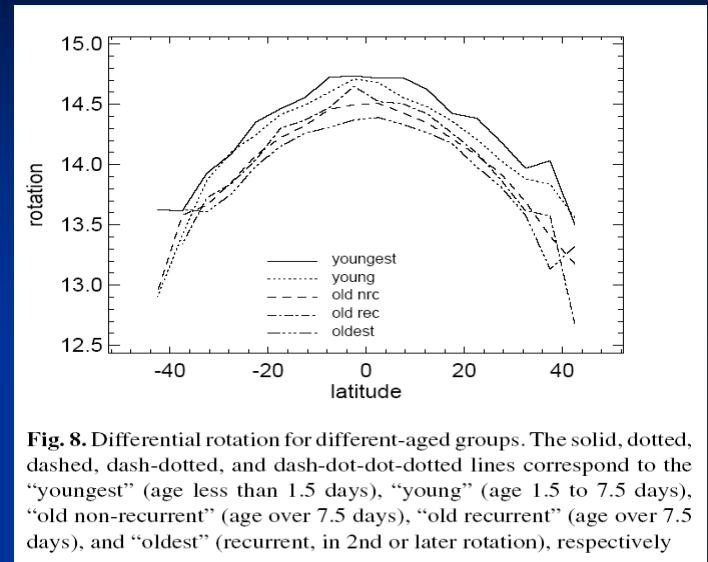
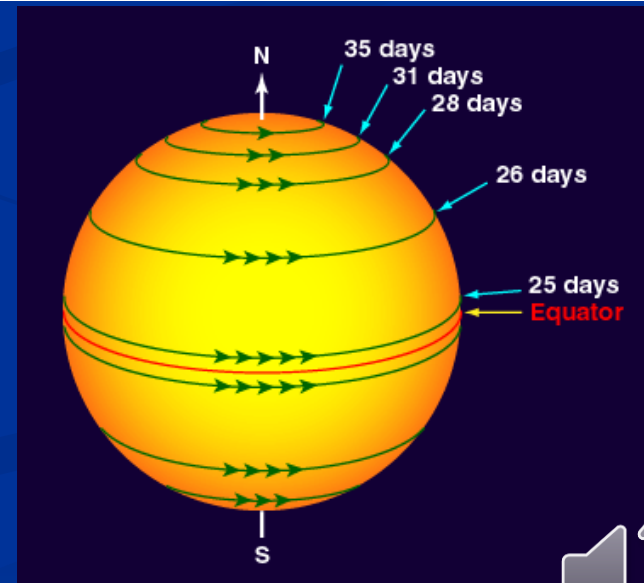
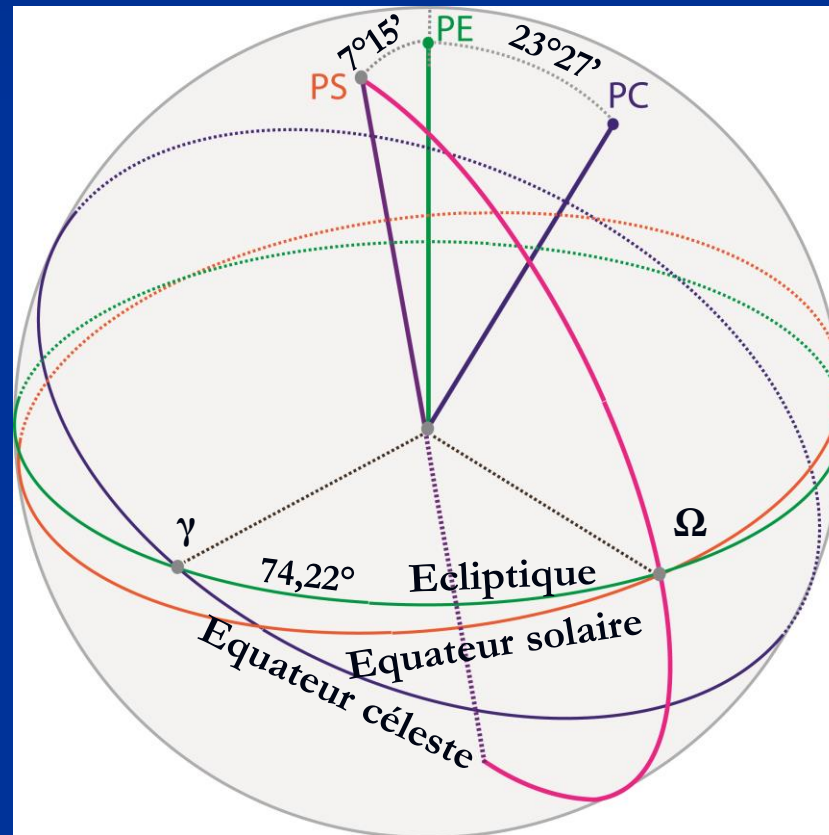


Fig. 8. Differential rotation for different-aged groups. The solid, dotted, dashed, dash-dotted, and dash-dot-dot-dotted lines correspond to the "youngest" (age less than 1.5 days), "young" (age 1.5 to 7.5 days), "old non-recurrent" (age over 7.5 days), "old recurrent" (age over 7.5 days), and "oldest" (recurrent, in 2nd or later rotation), respectively



Rotation solaire et coordonnées héliographiques

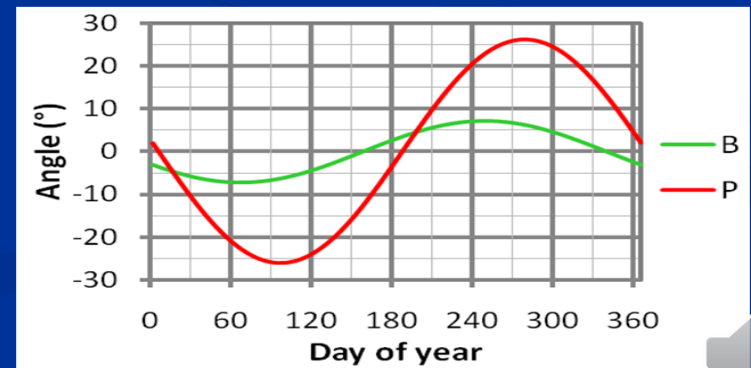
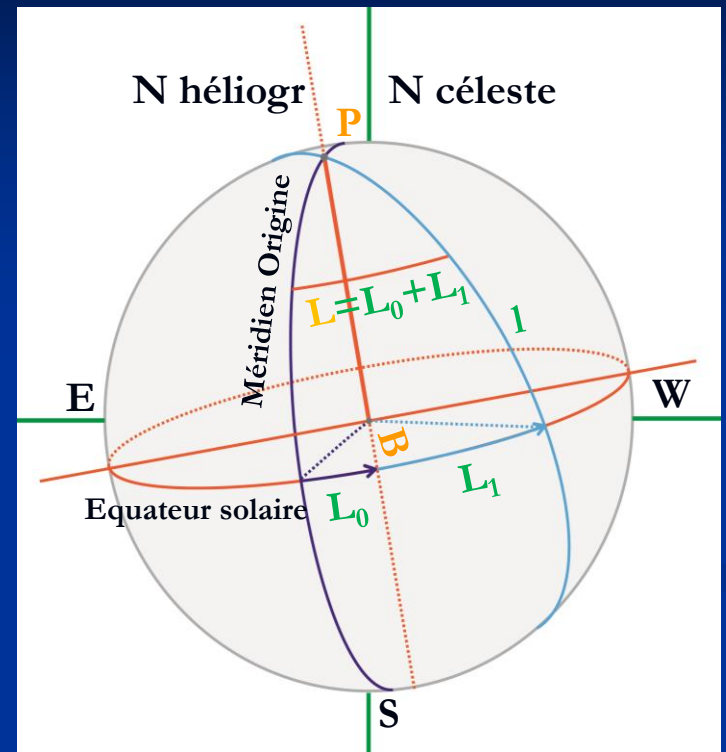
- Axe solaire incliné par rapport à l'écliptique:
 - Inclinaison: $7^{\circ} 15'$
 - Nœud ascendant: $74^{\circ} 22' + 84' T$ (siècles à partir de 1900)



Rotation solaire et coordonnées héliographiques

- Combinaison avec l'inclinaison de l'écliptique avec l'équateur céleste (inclinaison de l'axe de la Terre sur l'écliptique: $23^{\circ} 27'$):
- Angle P (angle de position du Pôle Nord géographique Solaire)
 - Compté dans le sens trigonométrique: $0^{\circ}=\text{N}$, $90^{\circ}=\text{E}$, $180^{\circ}=\text{S}$, $270^{\circ}=\text{W}$
 - Varie de $-26,3$ à $+26,3^{\circ}$ au cours de l'année
- Angle B (latitude héliographique du centre du disque solaire, point sub-terrestre):
 - Positif quand le pôle Nord solaire est incliné vers la Terre
 - Oscille de $-7^{\circ}15'$ (mars) à $+7^{\circ}15'$ (sept.) au cours de l'année

➔ *Vue très limitée des pôles solaires depuis la Terre*

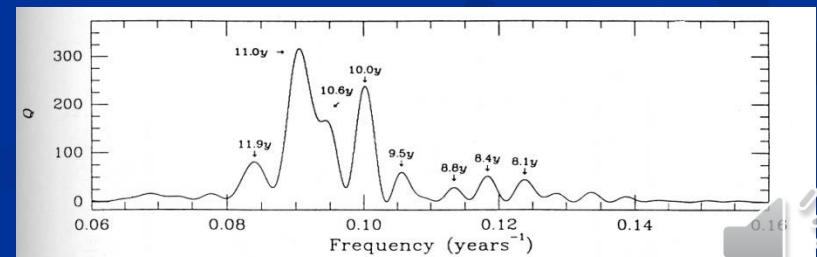
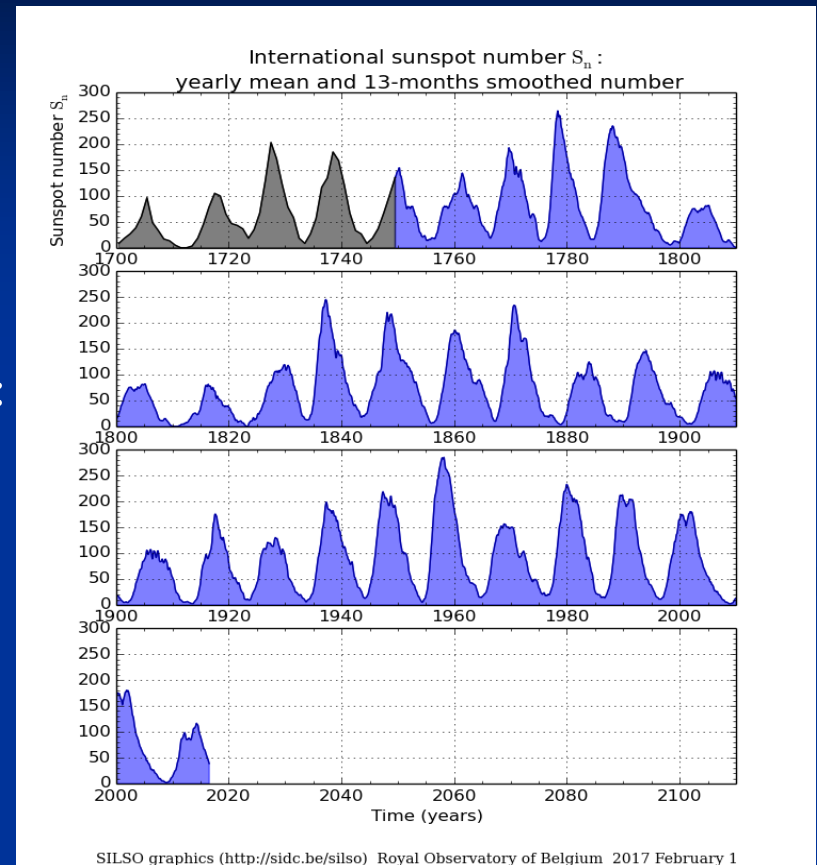


Systeme de Carrington

- En 1854, Carrington introduit un référentiel pour définir les longitudes héliographiques et les rotation solaires:
 - **Période de rotation sidérale: 25,38 j**
 - Correspond à la **rotation des taches à la latitude de 16°**
 - Longitude du méridien central: $-13,2^\circ$ / jour
 - **Période synodique moyenne: 27,2753 j**
 - Méridien d'origine:
 - Méridien passant au nœud ascendant le 1^{er} janvier 1854 à 12h00 TU
 - **Rotations de Carrington:**
 - $N^\circ 1$ fixée arbitrairement au 9 novembre 1853
 - Exemple: 10,29 février 2009 = début de la rotation $n^\circ 2080$

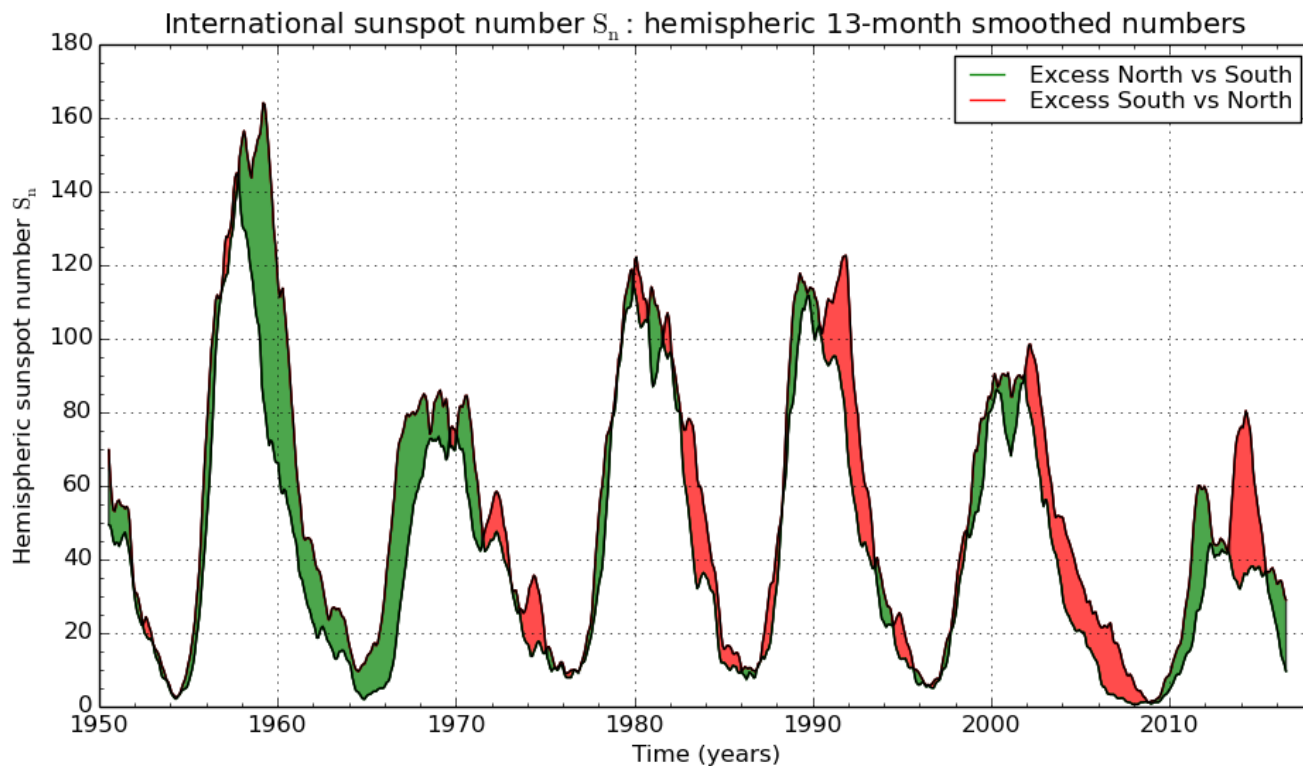
Taches solaires et cycle d'activité

- Le nombre des taches et des groupes varie sur un cycle d'amplitude et de période variable d'environ 11 ans:
- Périodes observées: 8 à 14 ans
- Montée rapide en 4 ans
- Descente de durée moyenne de 7 ans:
- Des modulations du cycle semblent exister sur des périodes plus longues (80 ans, 100 ans, etc.)



Taches et cycle solaire: écarts Nord-Sud

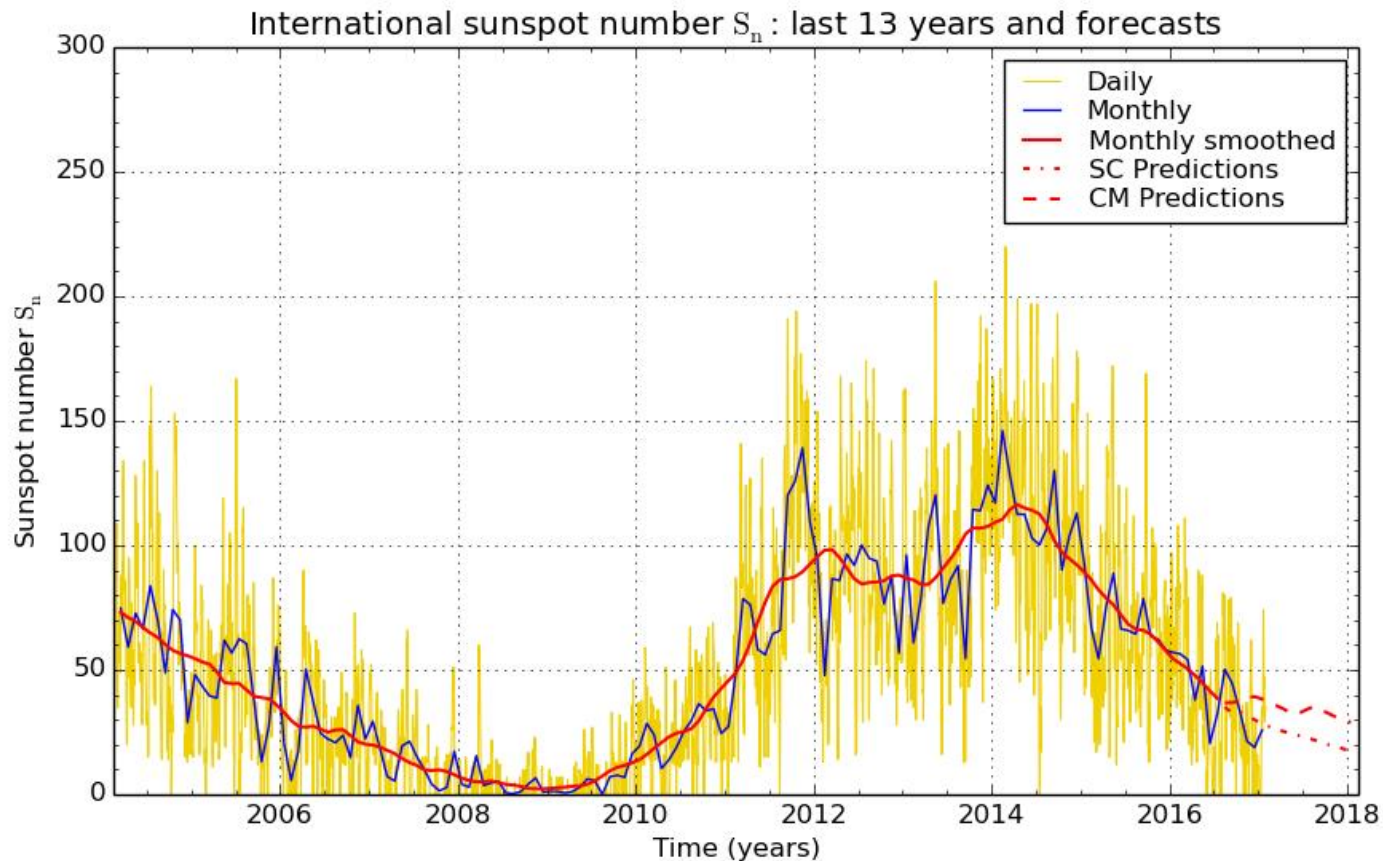
- Évolution différente des deux hémisphères:
 - Déphasage variable de max 1,8 ans.
 - Un couplage N-S semble exister: pas de dérive séculaire systématique



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2017 February 1

Taches et cycle solaire: cycles courts et longs

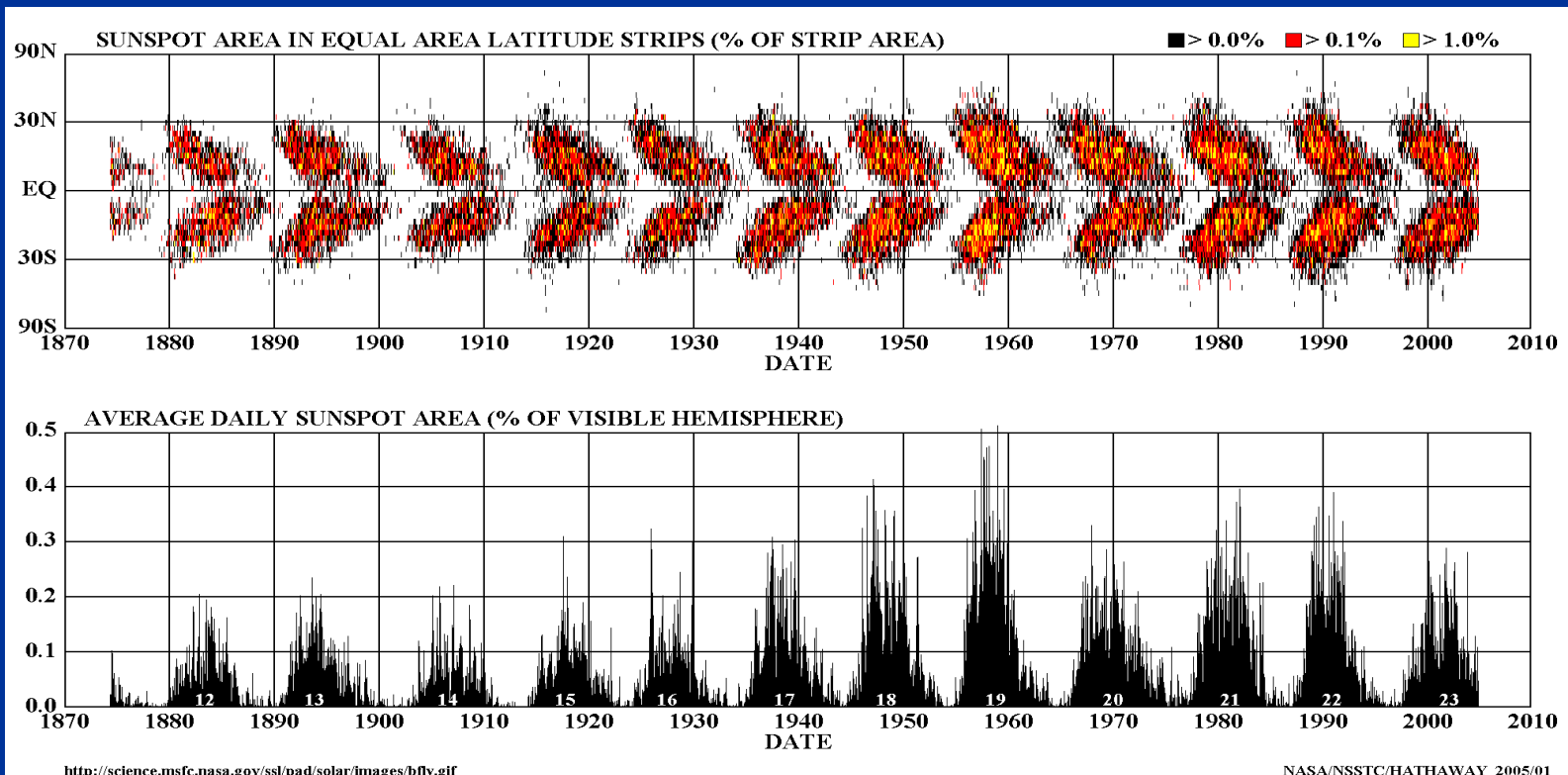
- Fluctuations à court terme de l'indice R_i (International Sunspot Index):
 - Principalement, modulation par la rotation (répartition inégale des centres d'activité, longitudes actives)



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2017 February 1

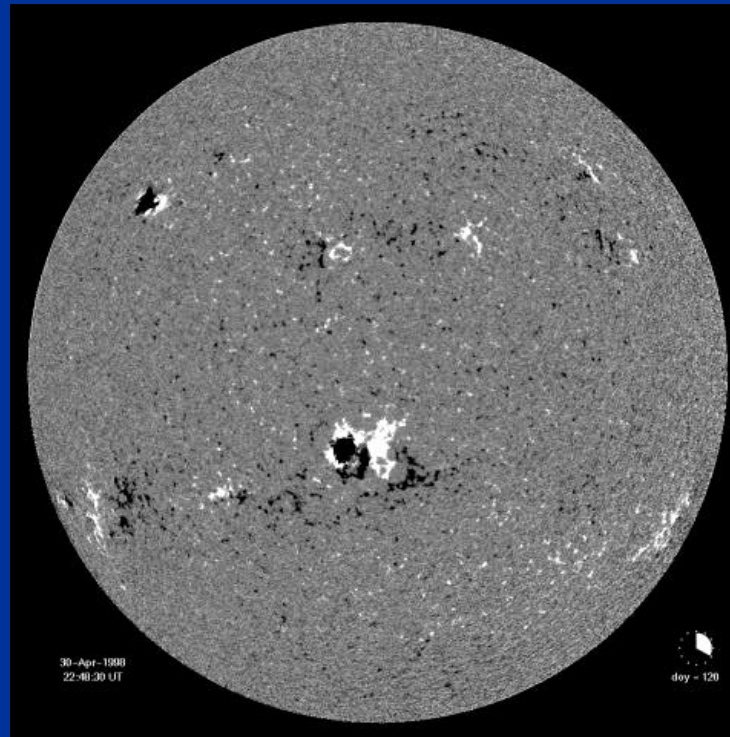
Taches et cycle: dérive en latitude ("Papillon")

- Dérive des latitudes actives vers l'équateur au cours du cycle:
 - Premières taches d'un cycle à environ 30° de latitude
 - Au maximum du cycle: latitude moyenne de 15°
 - Dernières taches d'un cycle à $< 5^\circ$ de l'équateur (taches rares à 0°)
 - Les taches de deux cycles coexistent pendant environ un an lors du minimum d'activité solaire

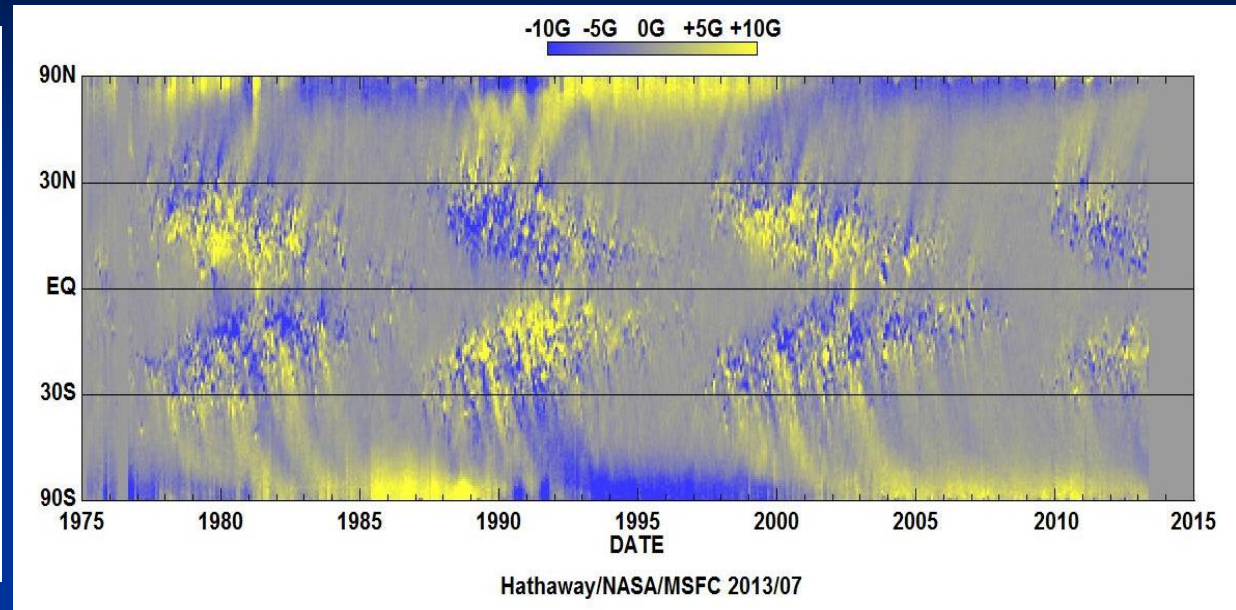
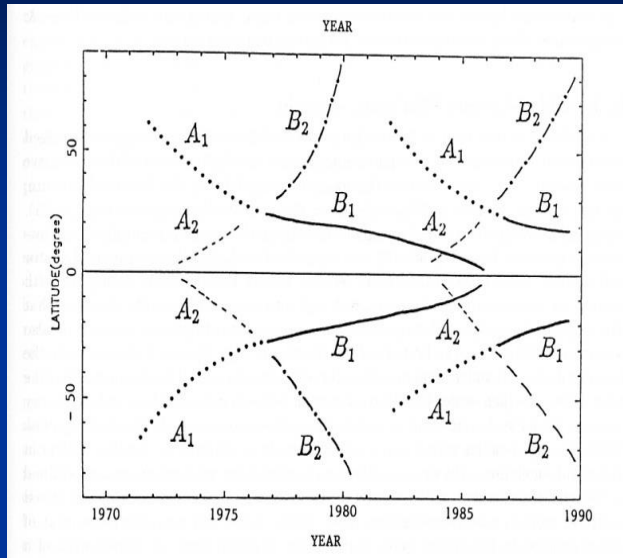


Cycle magnétique de Hale

- Polarité identique pour tous les groupes d'un hémisphère:
 - Tache de tête (W) de polarité N (ou S) et tache de queue (E) de polarité S (ou N)
- Polarité opposée des groupes dans les deux hémisphères:
 - Ordre N-S et S-N
- Inversion des polarités d'un cycle solaire au suivant:
 - Durée réelle d'un cycle= 22 ans (cycle de Hale)

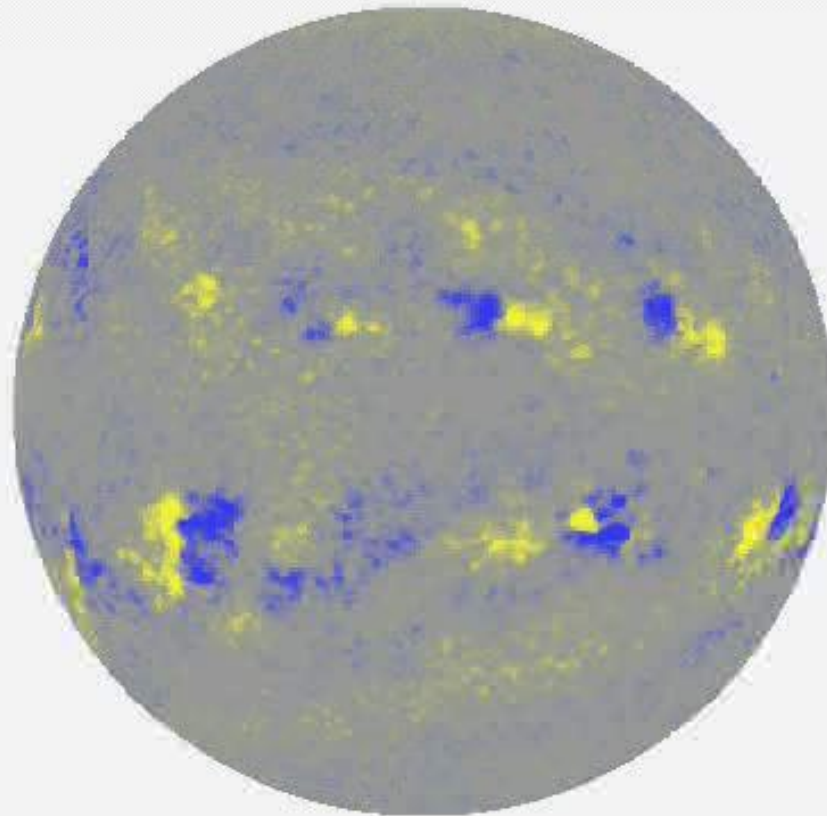


Migrations du flux magnétique



- 2 cycles magnétiques coexistent à des latitudes différentes (branches B1 & A1), dont un seul produit des champs magnétiques intenses (B1: taches).
- Migration d'ensemble des champs magnétiques faibles, vestiges des régions actives, vers les pôles:
 - Autres traceurs: régions éphémères, filaments
 - Vitesse: 20m/s
 - Contribue à la reconstitution du champ global dipolaire
 - Inversion du champ dipolaire au moment du maximum d'activité

Anatomie du cycle magnétique

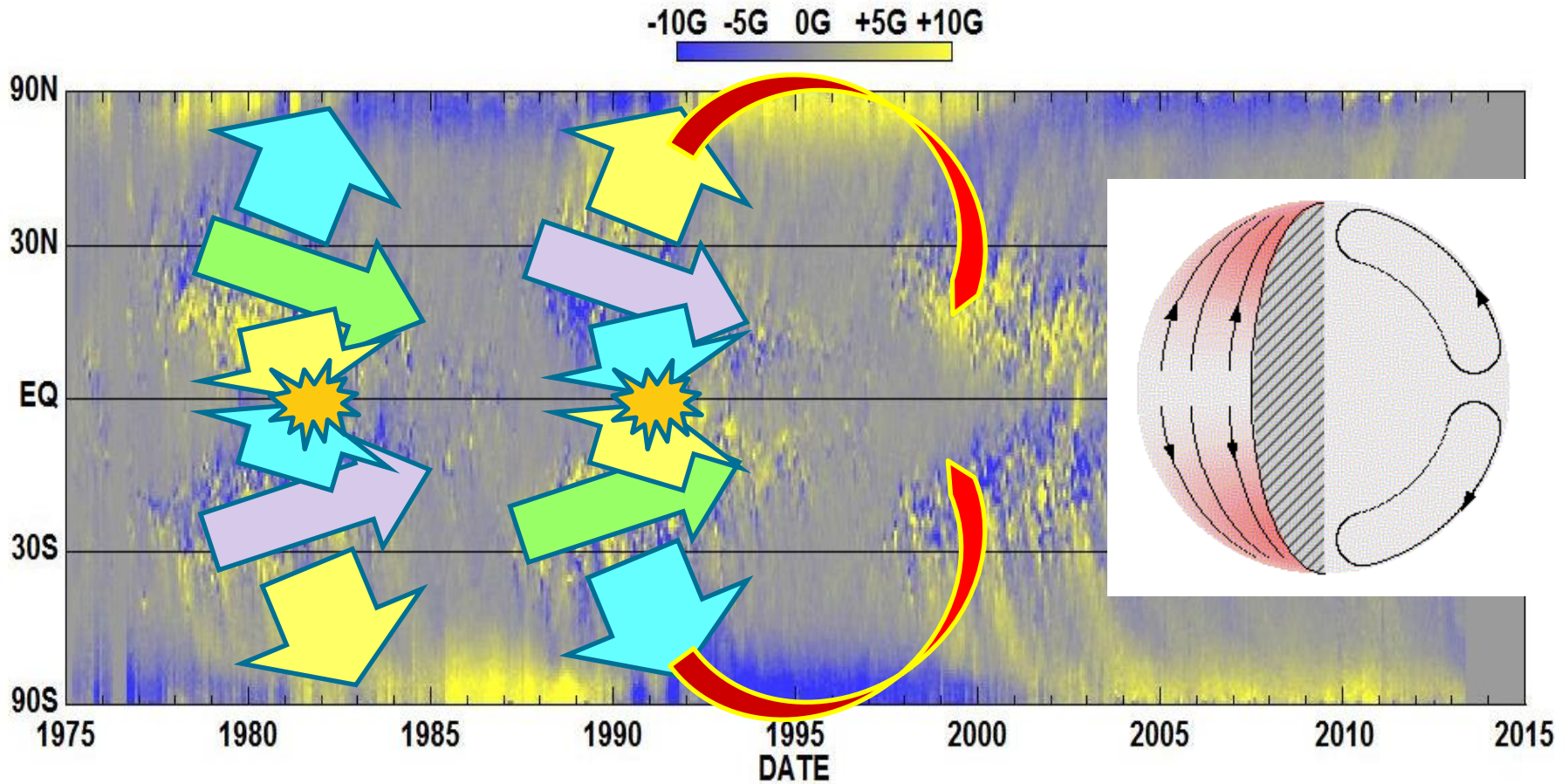


*D. Hathaway
(NASA)*

Octobre 2017

Cours ORB Partie 1

D'un cycle à l'autre: migrations et alternances



Hathaway/NASA/MSFC 2013/07



Systeme non-lineaire et retroactions

- Intuitivement, soit un mouvement d'ensemble du plasma à vitesse \mathbf{v} en présence d'un champ magnétique \mathbf{B} :

- Induit un champ électrique:
- Qui produit un courant (Loi d'Ohm):
- Ce courant induit un champ magnétique (Loi d'Ampère):
- La variation de B produit un champ électrique: (Loi de Faraday) +
- Le champ B produit une force de Lorentz: qui s'oppose à la force qui gouverne le mouvement \mathbf{v} .

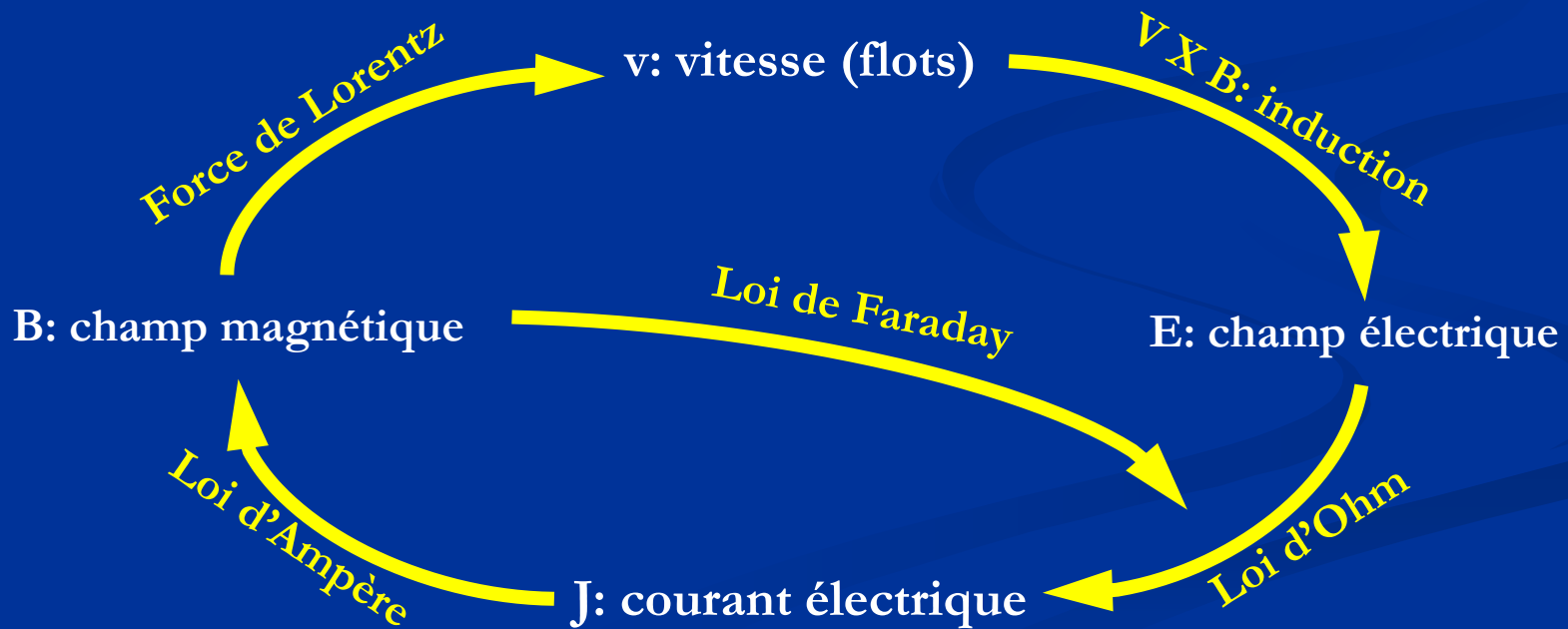
$$\mathbf{E}_i = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}_i$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} \mu$$

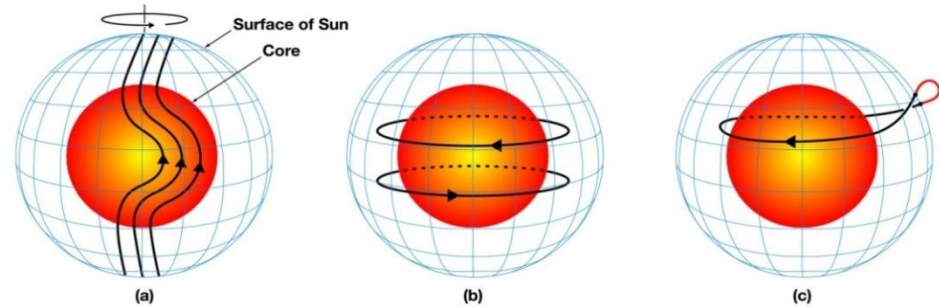
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$



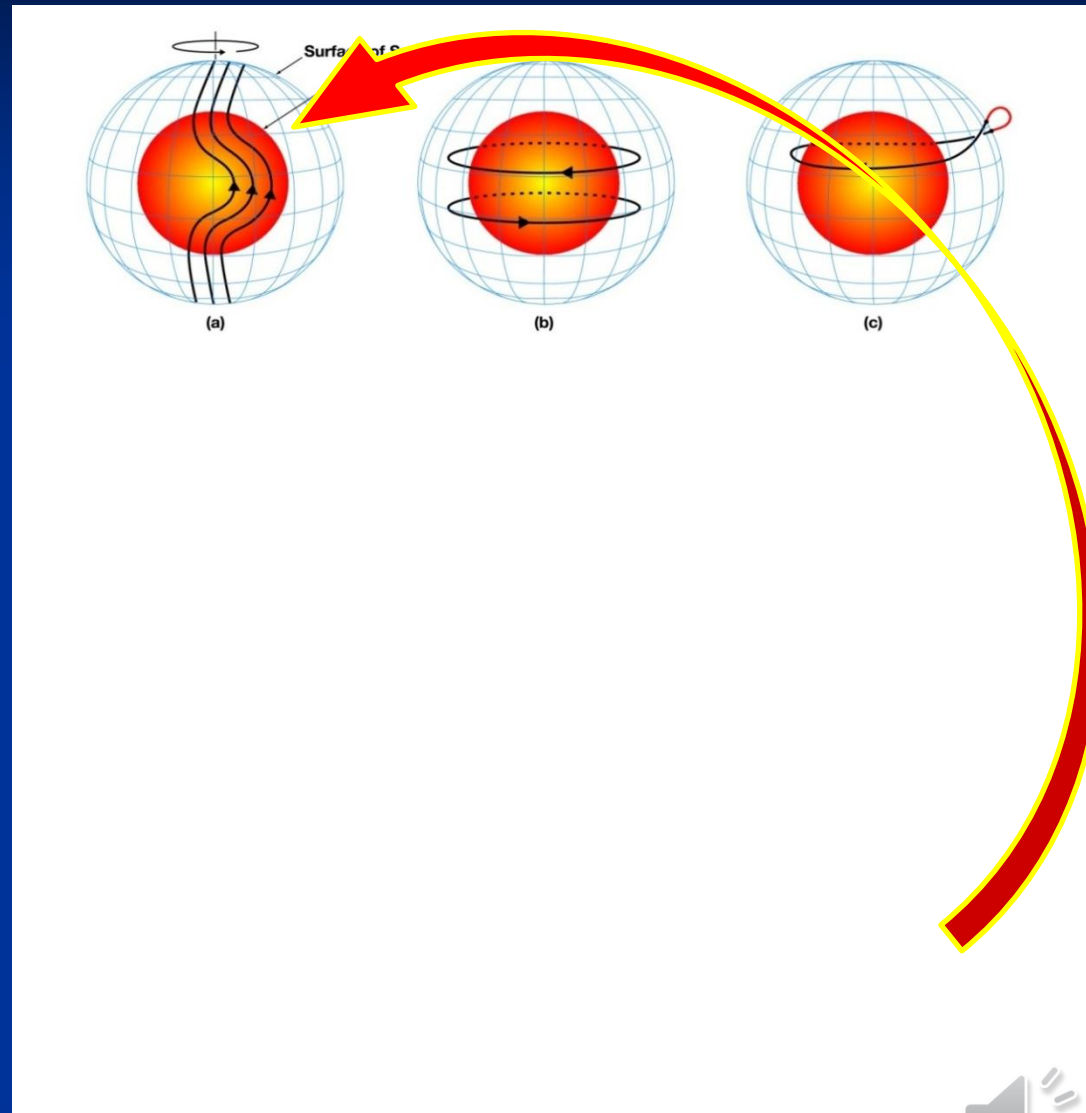
La dynamo solaire

- Le champ poloidal (dipolaire) est étiré et enroulé par la rotation différentielle > amplification (effet Ω).
 - Enroulement d'un tour complet en 8 mois
 - Production d'un champ toroïdal de direction opposée de part et d'autre de l'équateur
- Limite à l'amplification du champ:
 - Énergie magnétique < énergie cinétique du plasma
 - Au-delà, contre réaction sur les mouvements turbulents à petite échelle.
 - Champ maximum: env. 10000 G (1T)



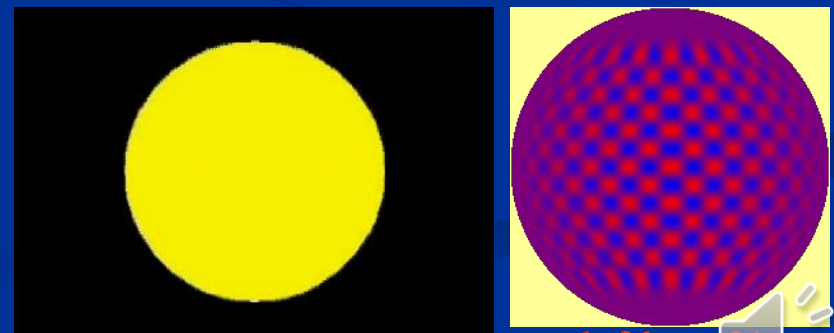
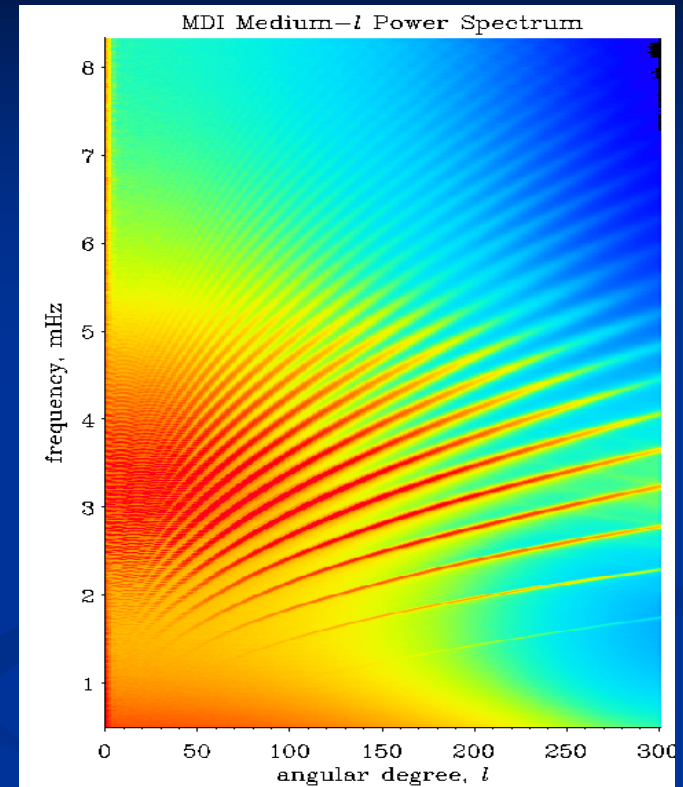
La dynamo solaire

- Lorsque la pression magnétique $B^2/2\mu_0$ devient suffisante, ascension d'une boucle vers la surface (effet α)
- Au cours de son ascension, la boucle subit une rotation par la force de Coriolis:
 - Inclinaison du dipôle par rapport à l'équateur (sens opposé dans les deux hémisphères)
 - Hélicité du champ émergent $\vec{v}_c \cdot \nabla \times \vec{v}_c$ (énergie potentielle)
- Au cours du cycle, les boucles émergentes reforment par reconnexion et fragmentation le champ dipolaire global:
 - ➔ Reconstitution du champ poloidal de départ



Localisation de la dynamo: hélioséismologie

- Sondage de l'intérieur solaire par **hélioséismologie**:
 - Modes p: propagation des modes acoustiques sous la surface: $f=3\text{mHz}$, $P=5\text{ min}$ (2 - 20 min)
 - Analyse des modes résonants:
 - Levée de dégénérescence des modes d'ordre azimutal différent due à la rotation
 - Les écarts de fréquence donnent la vitesse.
 - Mesures des vitesses Doppler ou de la modulation de l'intensité en surface (SOHO/MDI, Réseau GONG)
 - Processus d'inversion à partir de milliers de modes mesurés
 - Cartographie selon r et latitude



Rotation interne: la tachocline

- La rotation différentielle de surface se prolonge jusqu'à la base de la couche convective:
 - Rotation légèrement plus rapide juste sous la surface
- Rotation "solide" sous la couche convective (zone radiative):
 - Vitesse au sommet de la zone radiative \sim vitesse de surface à latitude moyenne
 - Vitesse croissante jusqu'au centre
- Zone de cisaillement juste sous la base de la couche convective: **la tachocline**
 - Épaisseur: $< 0,1 R_s$
 - Gradient de vitesse maximum dans cette couche
 - Site probable de la dynamo solaire

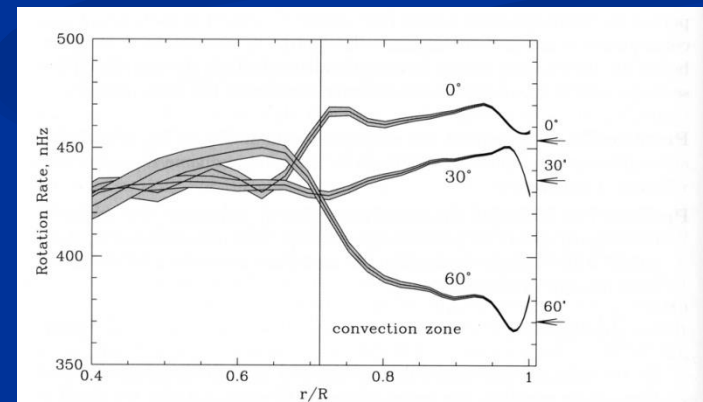
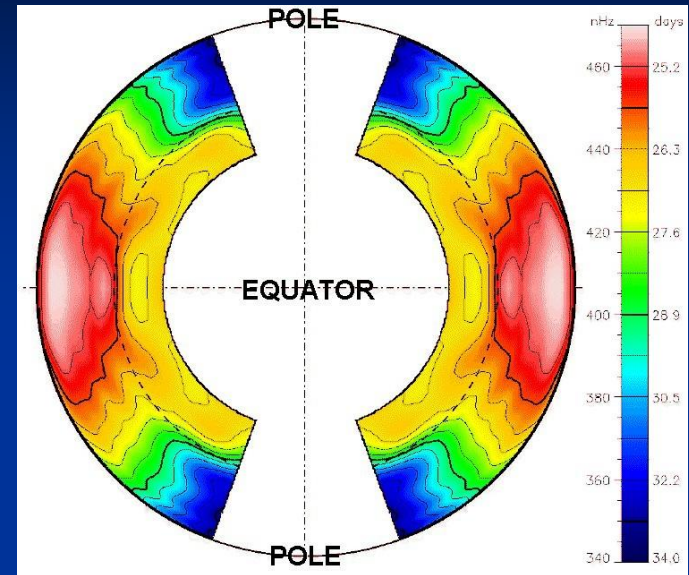
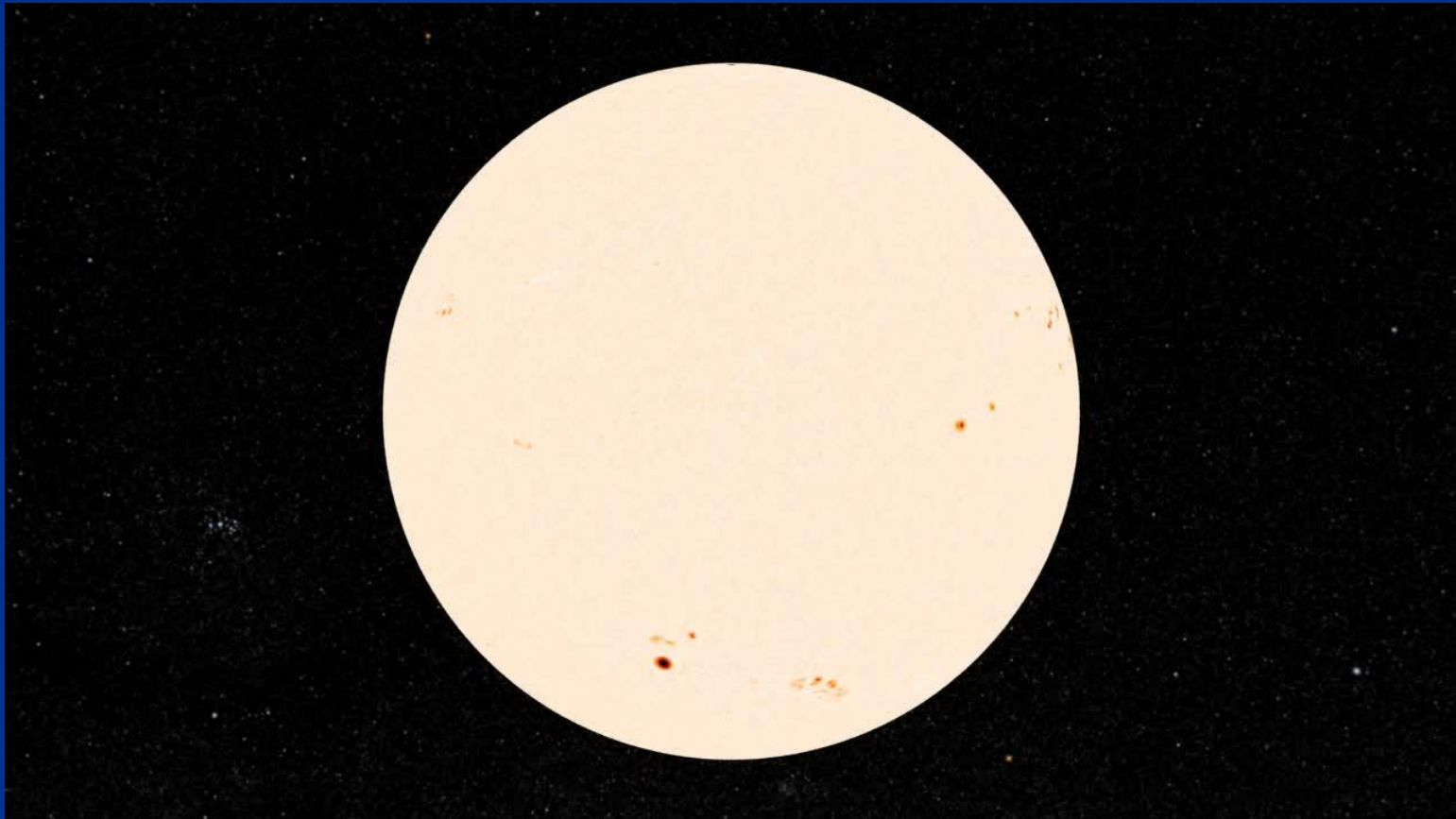


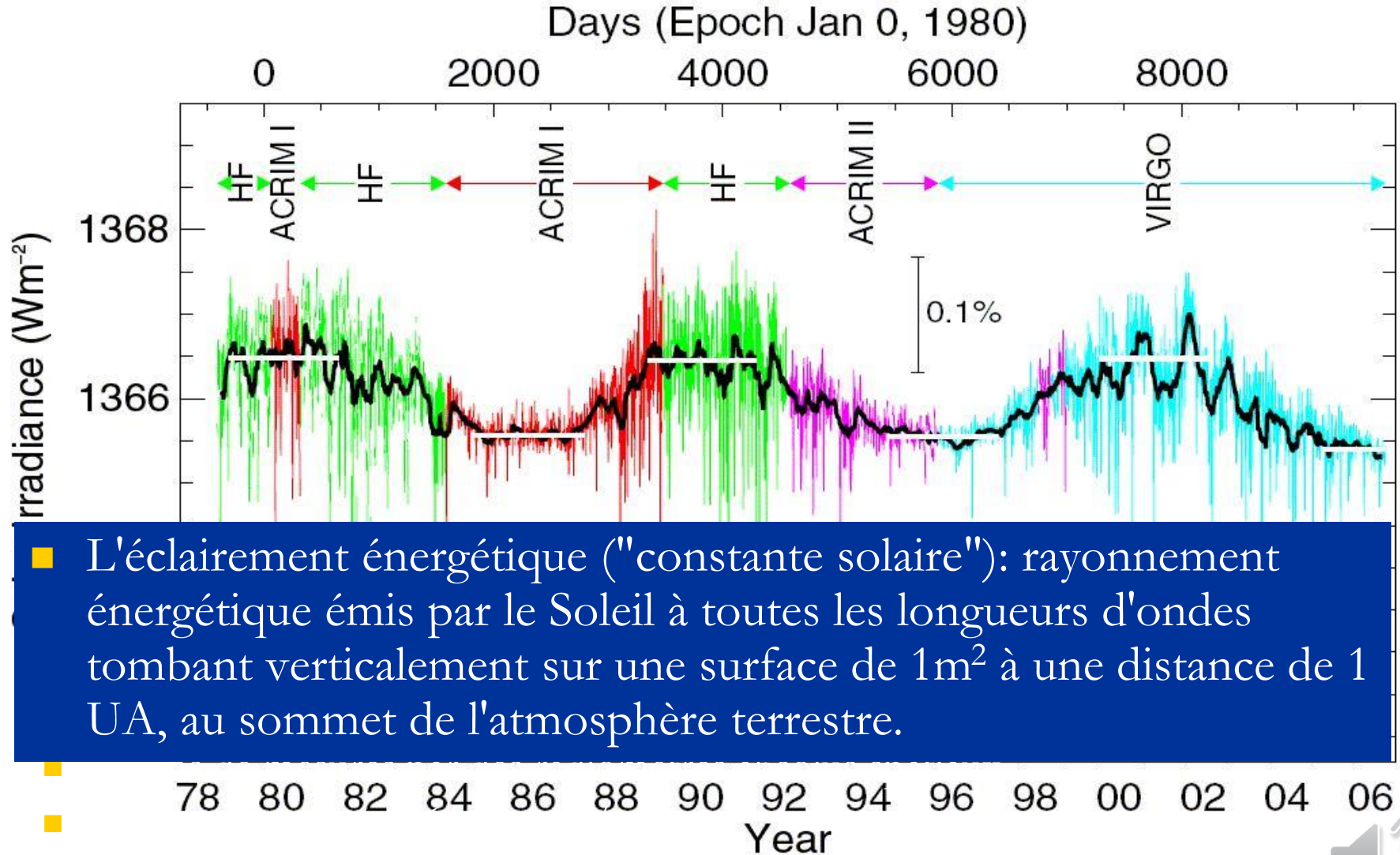
Fig. 7.4. Solar rotation rate $\nu_{\text{rot}} = \Omega/2\pi$, as a function of r , for three heliographic latitudes. An inversion of data obtained with the Michelson Doppler Imager on SOHO. The vertical line marks the base of the convection zone; arrows indicate the rate measured spectroscopically at the surface. From Kosovichev et al. (1997)

Dynamo solaire: une nouvelle generation de modèles

- Les modèles physiques actuels sont capables de reproduire l'évolution cyclique de la dynamo solaire
- Compte tenu des vitesses de circulation mesurées et des dimensions connues du Soleil, ils donnent une période de l'ordre de 11 ans



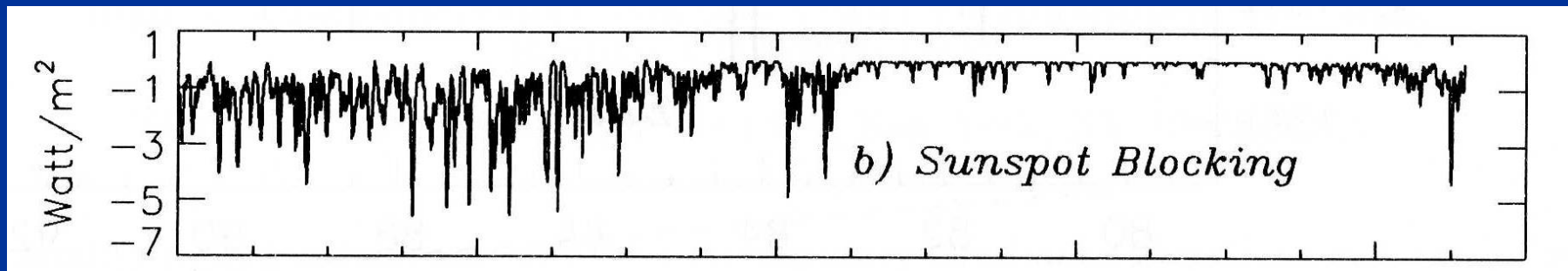
Éclairement énergétique solaire



- L'éclairement énergétique ("constante solaire"): rayonnement énergétique émis par le Soleil à toutes les longueurs d'ondes tombant verticalement sur une surface de $1m^2$ à une distance de 1 UA, au sommet de l'atmosphère terrestre.

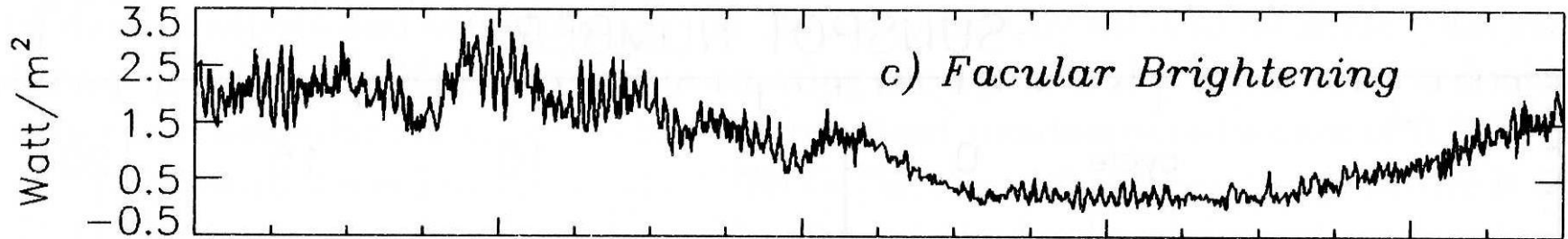
Éclairement énergétique: variations avec le cycle solaire

- Variation totale au cours du cycle:
 - Amplitude 0,1%
 - Maximum d'éclairement au maximum du cycle



- Blocage par les taches:
 - Fluctuation négatives sur de courtes durées (quelques jours)
 - Amplitude: typ. 0,3 %, max. 1%

Éclairement énergétique: variations avec le cycle solaire



- Excès de rayonnement lié aux facules:
 - Peut dépasser le déficit des taches (périodes de faible activité): 0,3%
 - Décalage dans le temps (retard du développement des plages faculaires relativement aux taches)
 - Indication du stockage temporaire de l'énergie bloquée par les taches.

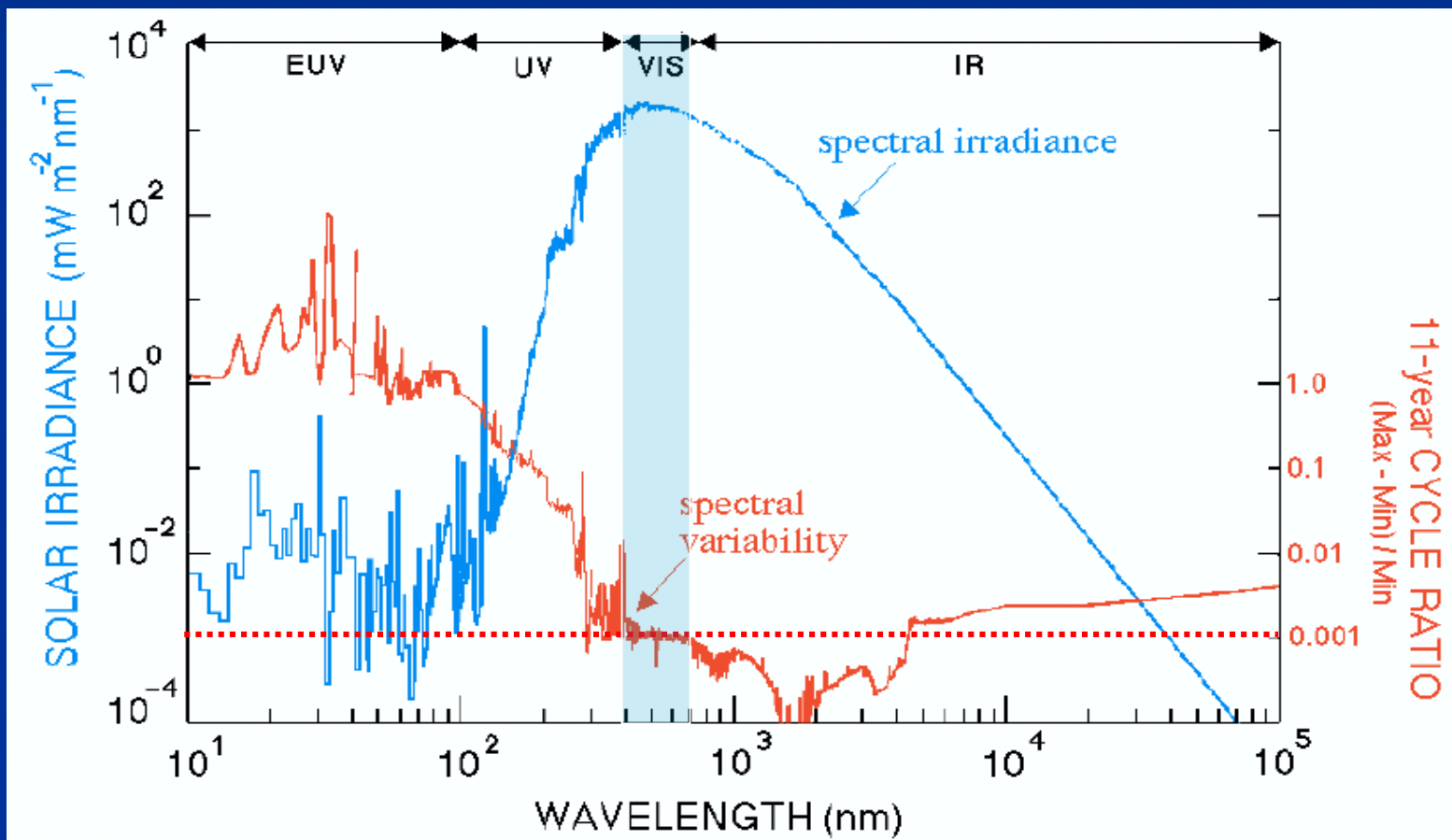
➔ > 95% des variations s'expliquent par l'activité magnétique (taches, plages-facules)

- les résidus restent inexplicables: stockage, soleil calme (réseau chromosphérique), UV proche ?

■ *Synthèse des mesures: Fröhlich, 2000*

Éclairement spectral et sa variation

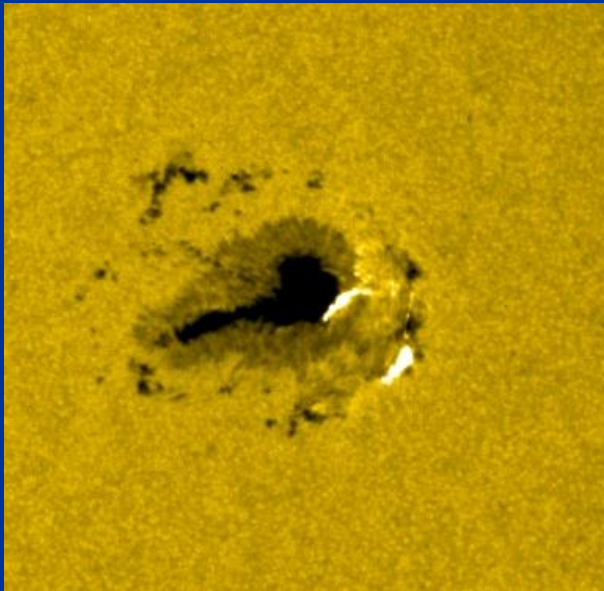
- Variabilité très élevée en dessous de 320 nm (facteurs 10 à 1000)
 - 2% du rayonnement total
 - Rayonnement très important pour l'aéronomie



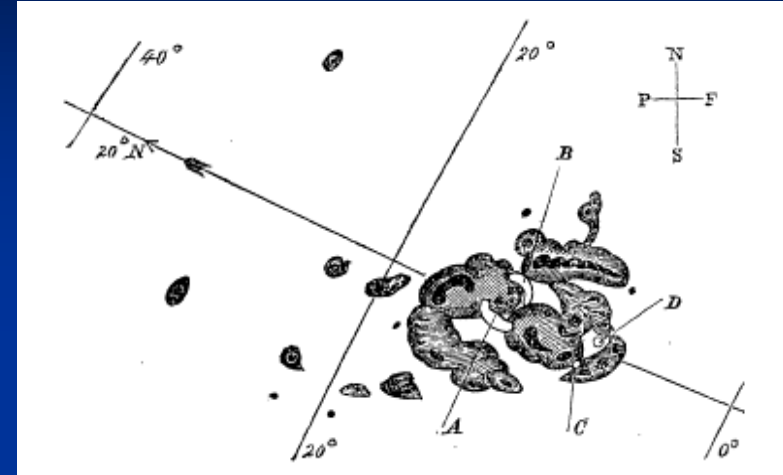
Éruptions solaires

- Premières observations d'éruptions au milieu du 19^{ème} siècle:
 - Éruptions en lumière blanche
 - Phénomène rare: seules les éruptions les plus intenses sont visibles au niveau de la photosphère

➔ Source principale des éruptions dans l'atmosphère externe (**chromosphère, couronne**)



Dulk et al. 1985



Carrington flare: 1^{er} septembre 1859