

The Sun

Part 2 : Chromosphere and transition region

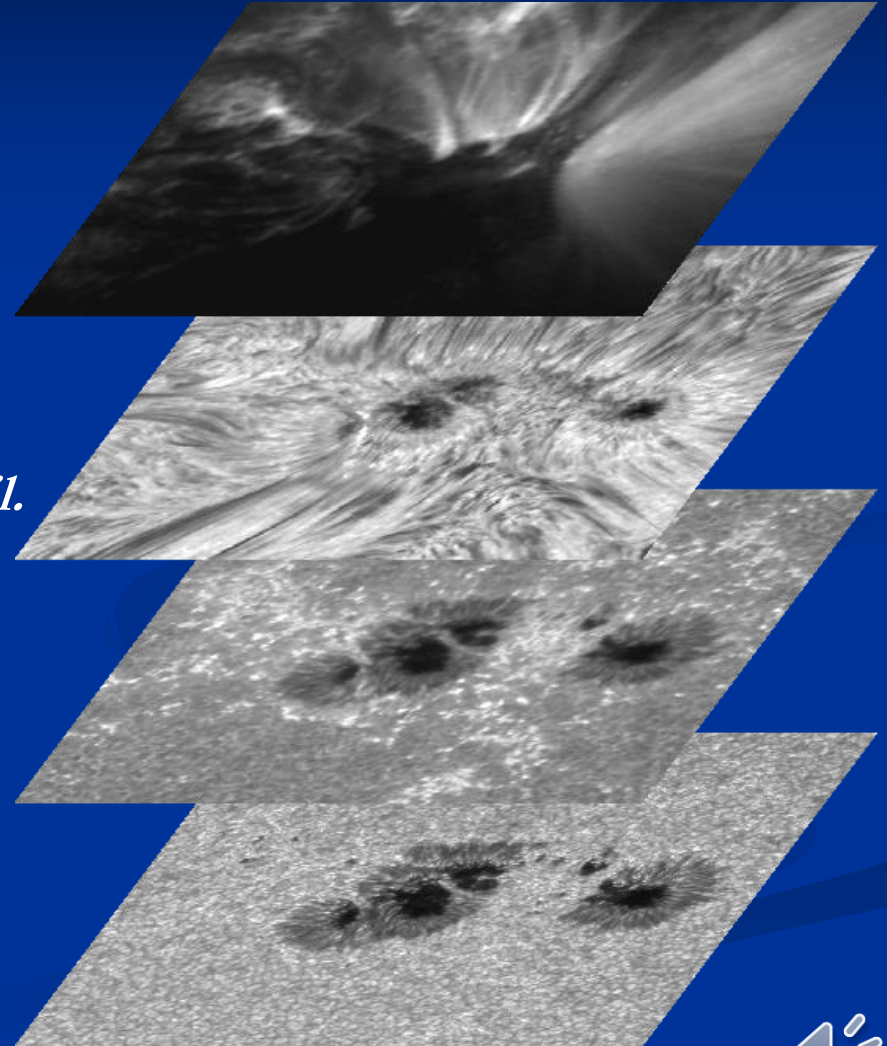
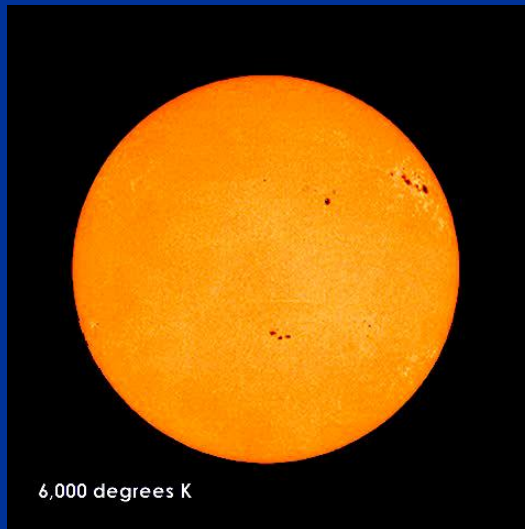
Frédéric Clette

ROB



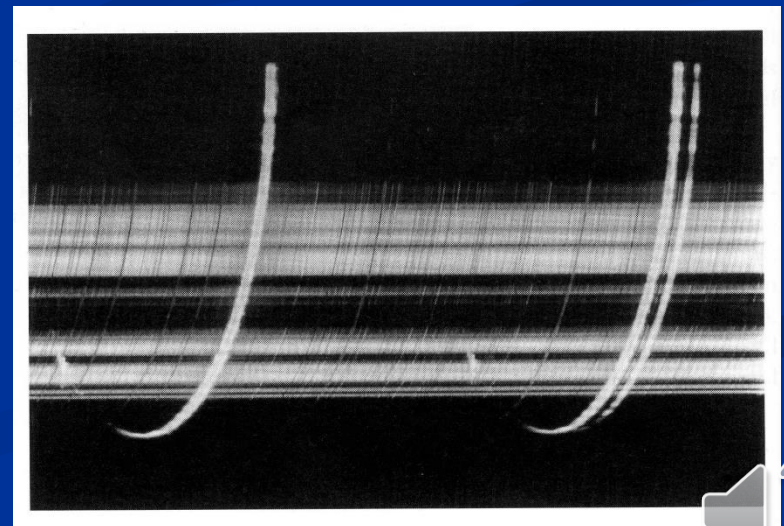
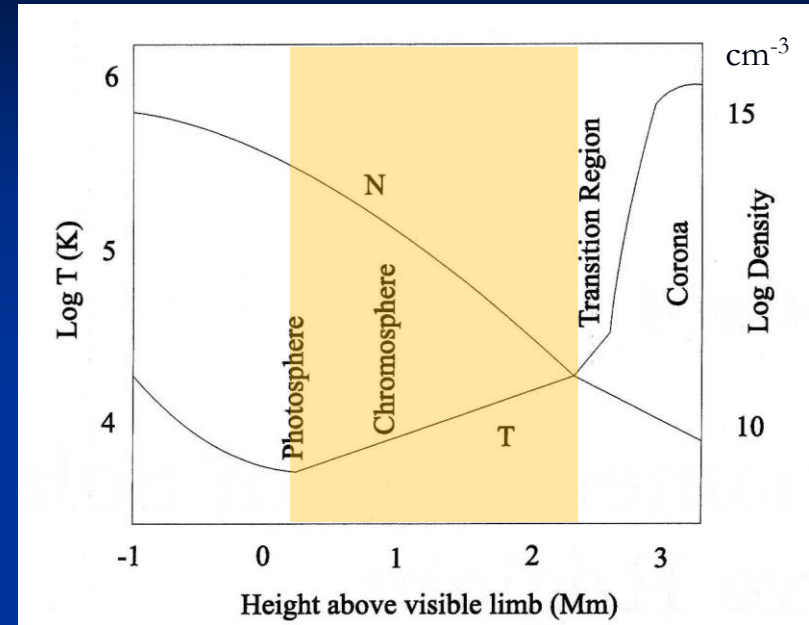
Atmosphère solaire: les diverses couches

- 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.***



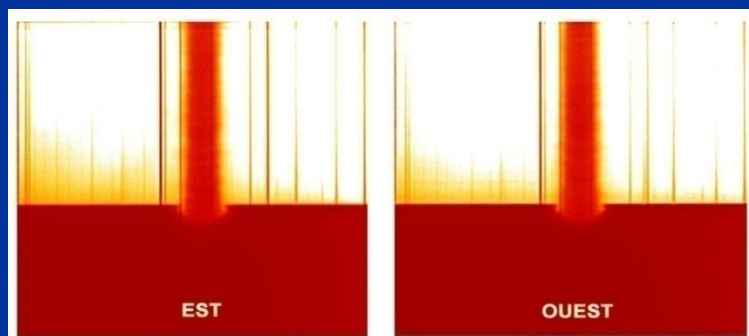
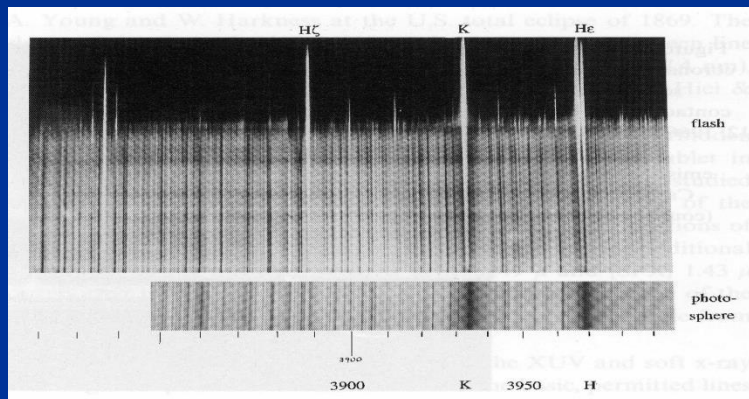
Atmosphère calme: la chromosphère

- Couche située au-dessus de la photosphère:
 - Au-dessus du minimum de température (gradient T croissant)
 - Densité rapidement décroissante
- Visible principalement en radiation monochromatique:
 - Spectre constitué de raies d'émission sans continuum (couche d'inversion): "spectre éclair" observé lors des éclipses
 - La raie dominante dans le visible est la raie $H\alpha$ (série de Balmer) à 656,3nm:
 - Couleur rouge dominante d'où le nom "sphère de couleur"



La chromosphère: raies d'émission

- Raies d'émission principales situées dans le visible et l'ultraviolet ($\lambda > 110\text{nm}$)
- Disparition quasi complète de l'absorption continue du spectre visible
- Extension verticale: 10000 km



Each spectrum is an average over 160 spectra made at +/- 80 arcsec on July 20, 2000 with the HSG of the NSO/SPO R.B. Dunn VTT

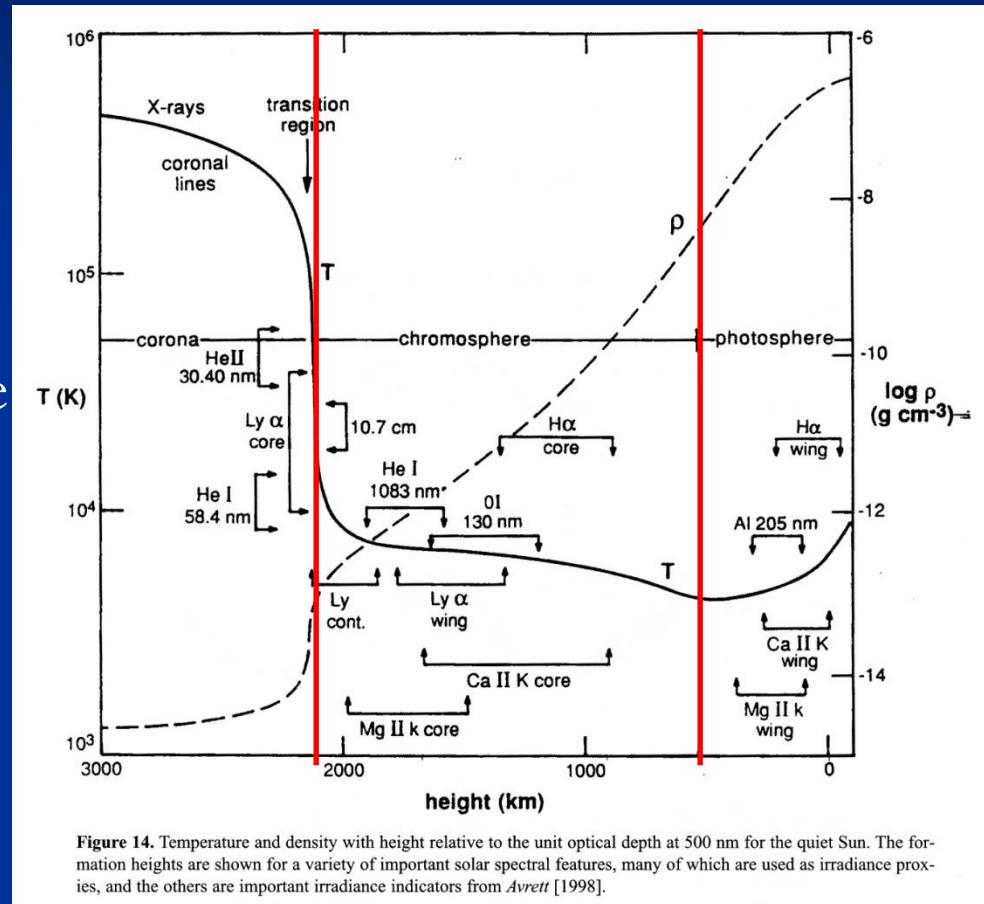
Table 4.1: Prominent chromospheric emission lines

Line	Wavelength
Ly α	1216 Å
Ly β	1026 Å
C I continua	$\leq 1100 \text{ Å}, \leq 1239 \text{ Å}$
Mg II h	2803 Å
Mg II k	2796 Å
Ca II H	3968 Å
Ca II K	3934 Å
He I	4471 Å , 5876 Å
Ca II IR	8498, 8542, 8662 Å
Mg I b _{1,2,3}	b ₂ 5173 Å
Na D _{1,2}	5896, 5890 Å
H α	6563 Å
H β	4861 Å
CO	4.6 μ

La chromosphère: structure verticale

- Milieu très ténu:
 - densité = 10^{10} à 10^{15} atomes/cm³
Soit 5×10^{-14} à 5×10^{-9} g/cm³.
- Milieu très transparent:
 - $\tau = 10^{-2}$ à 10^{-4}
- Augmentation importante de l'échelle de hauteur d'absorption des raies spectrales, H:

$$I = I_0 \exp^{-z/H}$$
 - ~150 km dans la photosphère
 - 200 à 600 km dans la chromosphère



La chromosphère: processus d'émission

- Faible densité, forte transparence:
 - Fonction source dominée par le champ de radiation (excitations radiatives) et faiblement couplée à la température électronique via les rares collisions.
- Structure non-stratifiée:
 - Influence du rayonnement à plus longue distance.
- Plus d'équilibre détaillé entres les transitions radiatives et collisionnelles
 - A l'équilibre, la somme des processus d'excitation doit rester égale à celle de tous les processus de désexcitation pour un niveau d'énergie donné

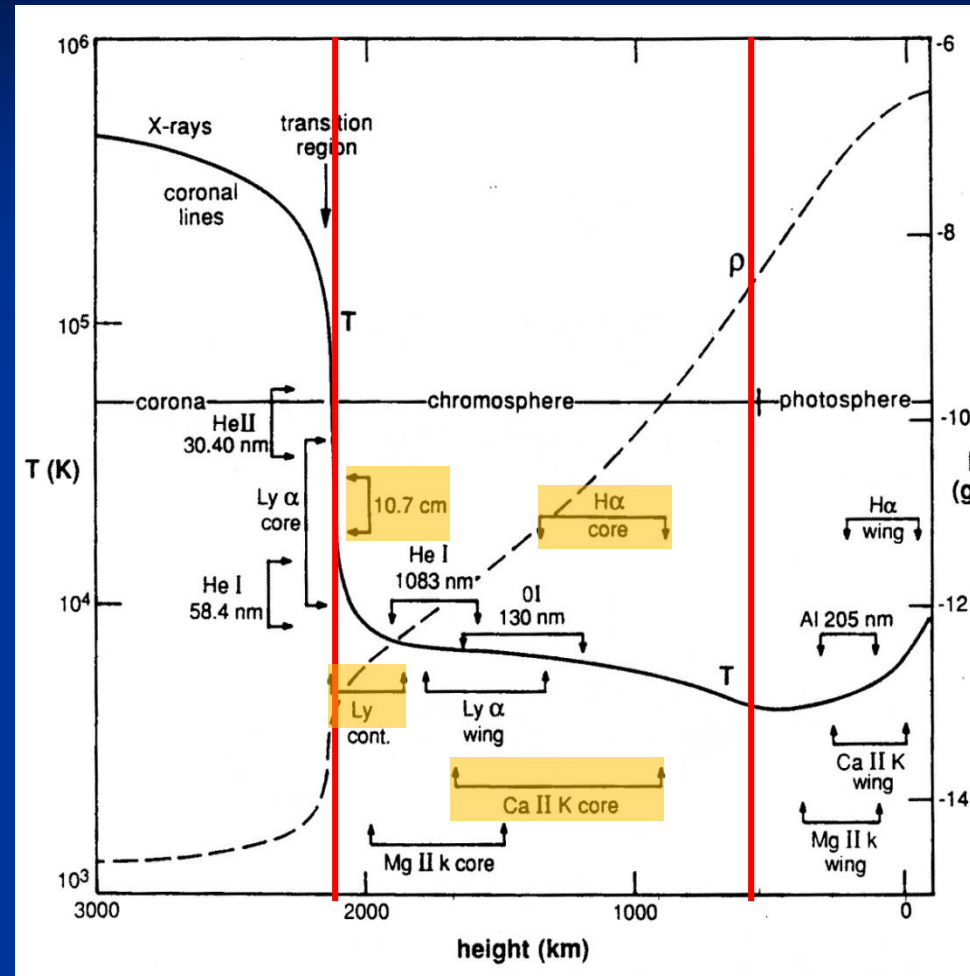
➔ **Equilibre thermodynamique non-local (ETNL).**

- NB: Émission radio chromosphérique (mm, cm): transitions free-free des électrons.



La chromosphère: structure verticale

- Plusieurs gammes d'altitude:
 - **Base de la chromosphère à $h=500\text{km}$ (au-dessus de $\tau=1$):**
 - Minimum de température (4000 K)
 - Altitude de formation du **continuum UV à 160nm et dans l'infrarouge lointain**
 - Montée progressive de la température vers **un plateau à 6000-7000 K:**
 - Raies **CaII**
 - Centre de la raie **H α**
 - Continuum **radio millimétrique**
 - **Montée plus rapide de 8000 K jusqu'à environ 22000 K:**
 - Raie **Ly α**
 - Continuum **radio à 3 cm.**



➔ *L'observation de différentes raies permet de sonder différentes couches de la chromosphère.*

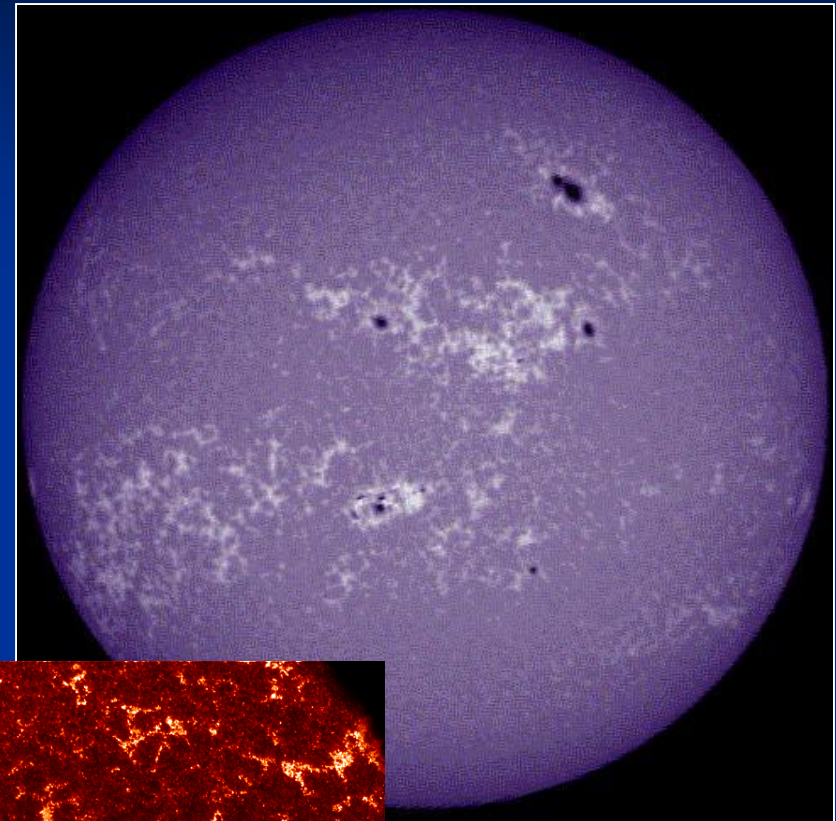


Morphologie globale de la chromosphère

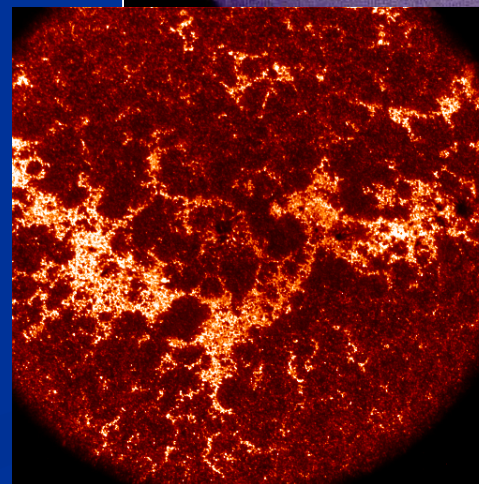


La chromosphère: structure générale

- Milieu beaucoup plus dynamique et hétérogène que la photosphère:
- Variations spatiales et temporelles importantes de l'émission.
- **Réseau chromosphérique:**
 - Échelle correspondant à la **supergranulation**: 20 à 30000km, ~20000 cellules sur tout le Soleil.
 - Renforcement de l'émission au bord des granules, zones de concentration des champs magnétiques (tubes de flux)
 - Empreinte de la convection sous-jacente
- **Plages brillantes:**
 - Autour des régions actives
 - Correspondance avec les facules: plages plus étendues et plus contrastées



CaII K filtergram,
Kitt Peak Obs., USA



TRACE, Ly α

La chromosphère: structure générale

- Raie principale d'observation $H\alpha$:
 - Surveillance des phénomènes éruptifs
- **Filaments et protubérances:**
 - Situées à plus haute altitude (couronne)
 - Protubérances: brillantes au-dessus du limbe
 - Filaments: plus sombres que la chromosphère, vues en silhouette sur le disque

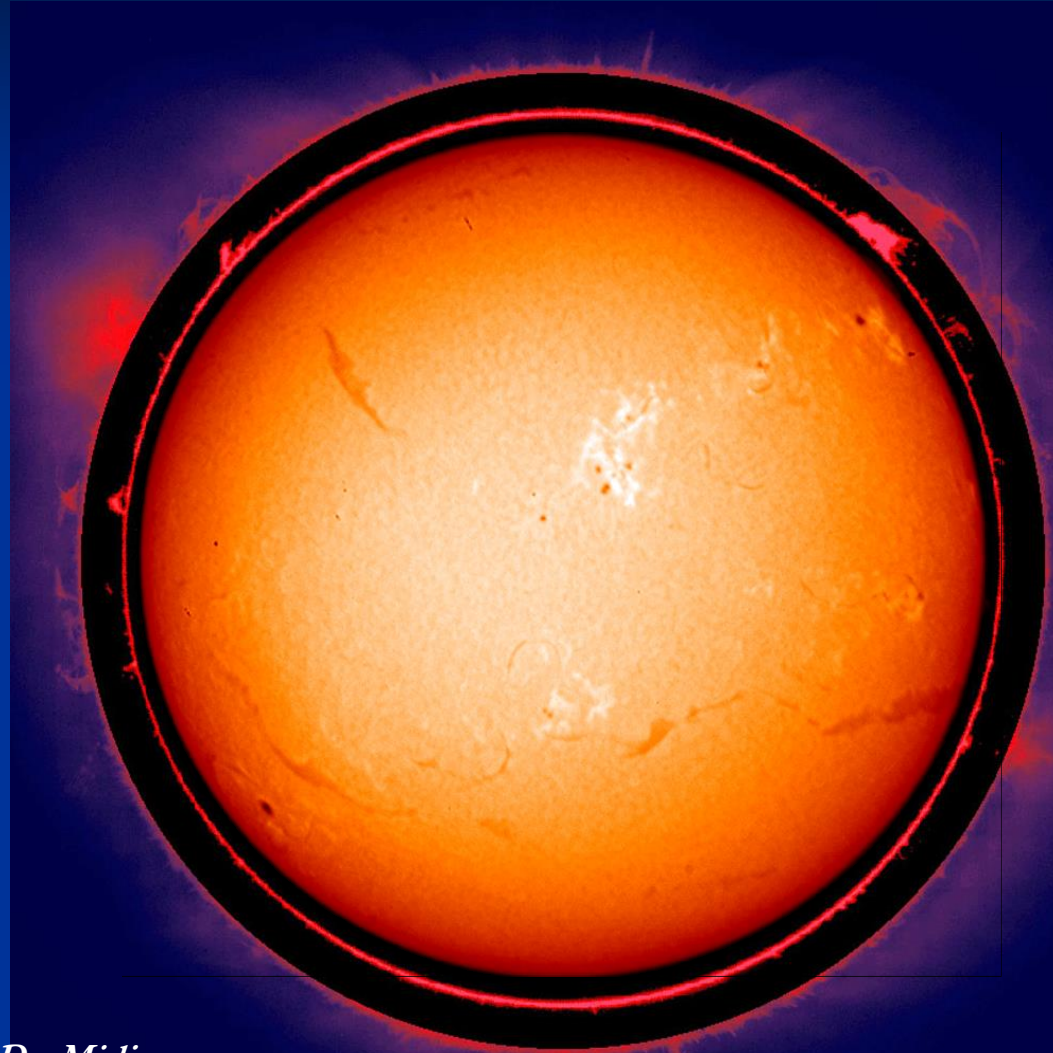
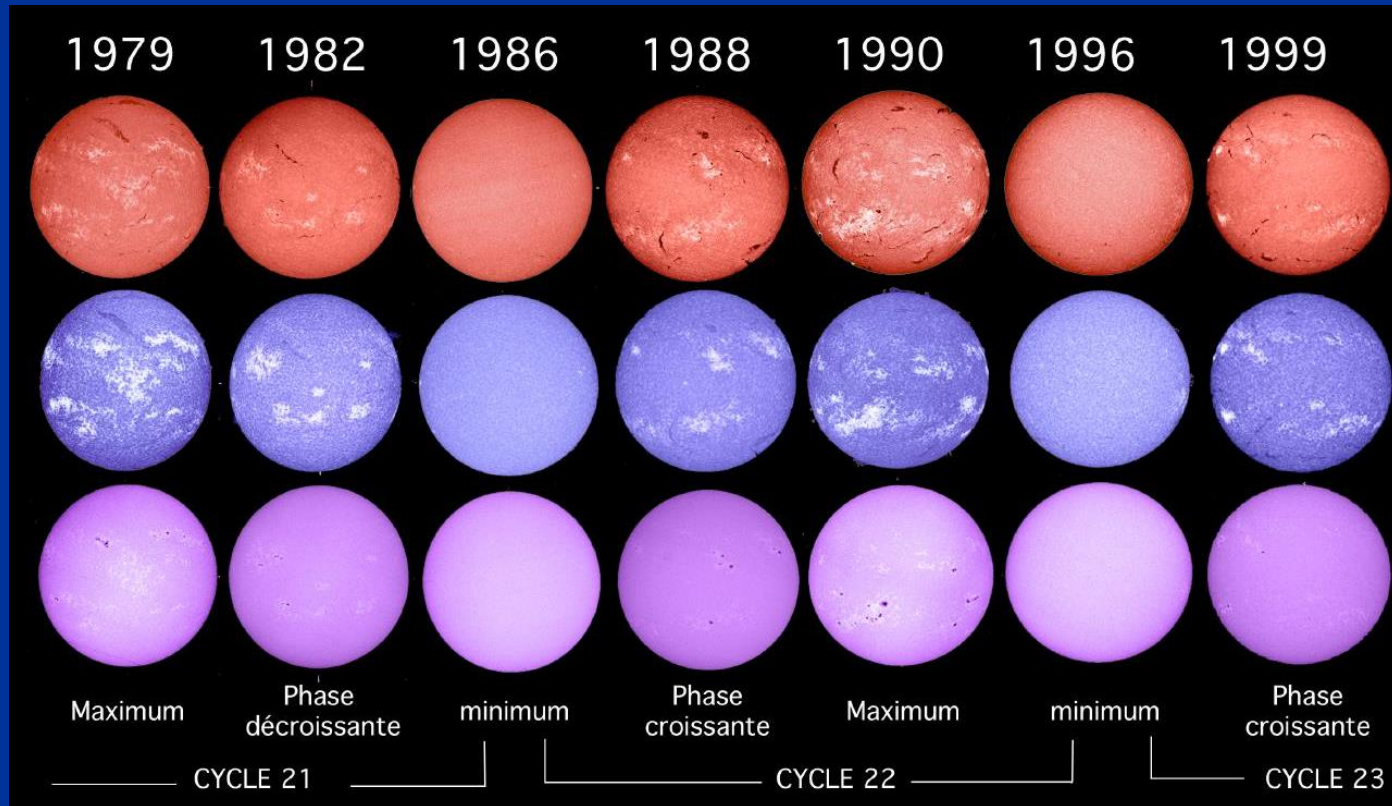
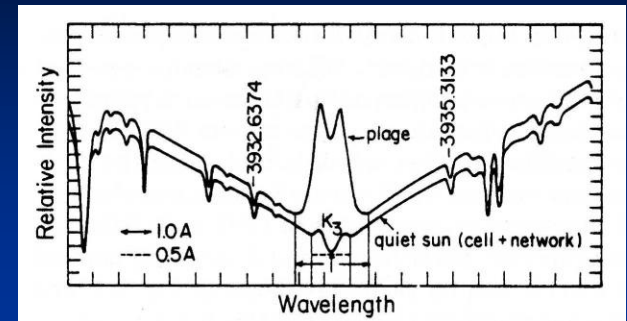


Image extérieure: Coronographe, Obs. Pic-Du-Midi

Image intérieure: $H\alpha$ filtergram, USET, ORB, Bruxelles

Chromosphère: variation avec le cycle solaire

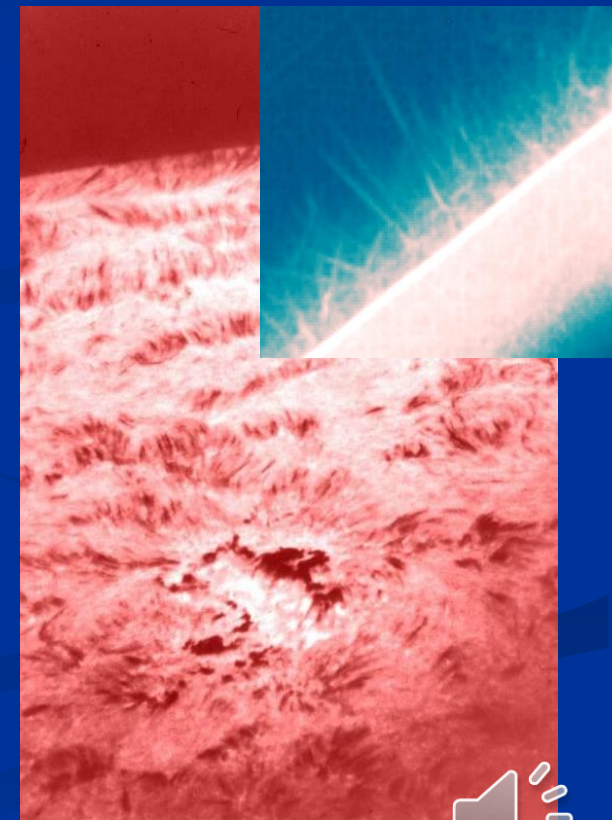
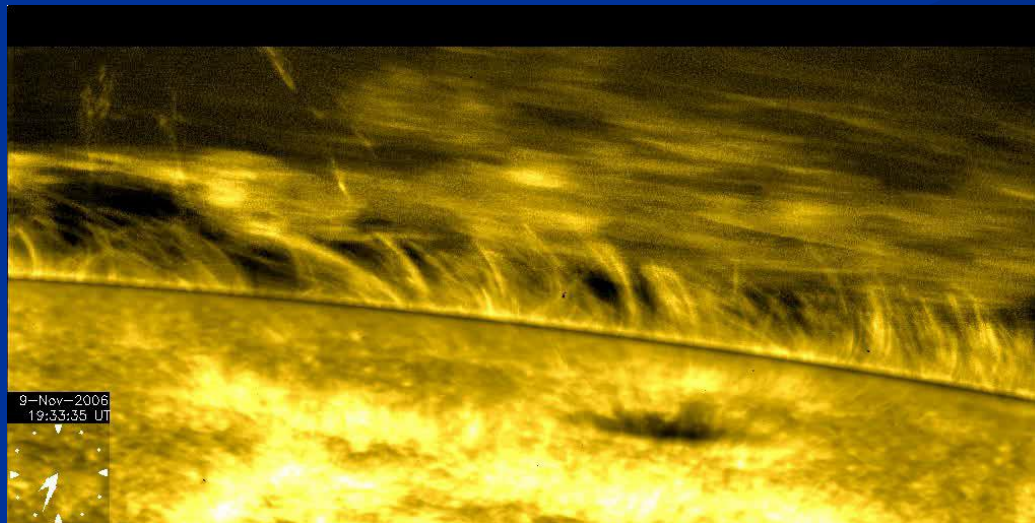
- Intensité globale de la chromosphère directement liées au nombre et à l'étendue des plages chromosphériques
- Pour les autres étoiles, les raies chromosphériques (CaII-K) fournissent l'indicateur principal de la présence d'une activité magnétique



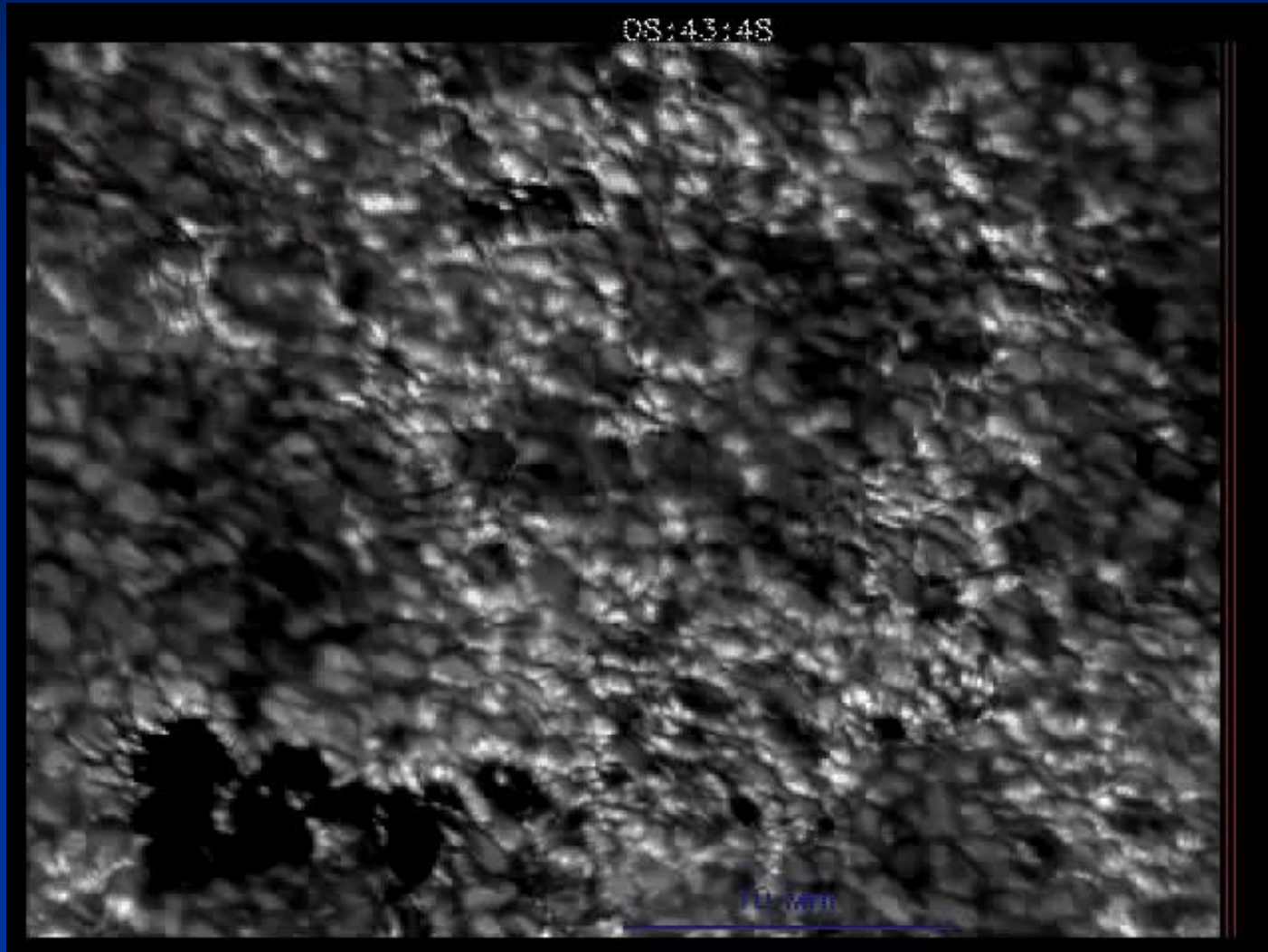
Structure fine: les spicules

- Surface entièrement couverte de structures en brins verticaux (~ 100000 sur tout le Soleil), les spicules:
 - Près du limbe: fibrilles brillantes (spicules)
 - Au centre du disque: taches sombres (mottles)
 - Espace inter-spiculaire chaud (10^6K) et peu dense.
 - Flux de masse: 100 x le flux nécessaire à entretenir le vent solaire
- ➔ Rôle essentiel dans le bilan du flux de masse dans le vent solaire

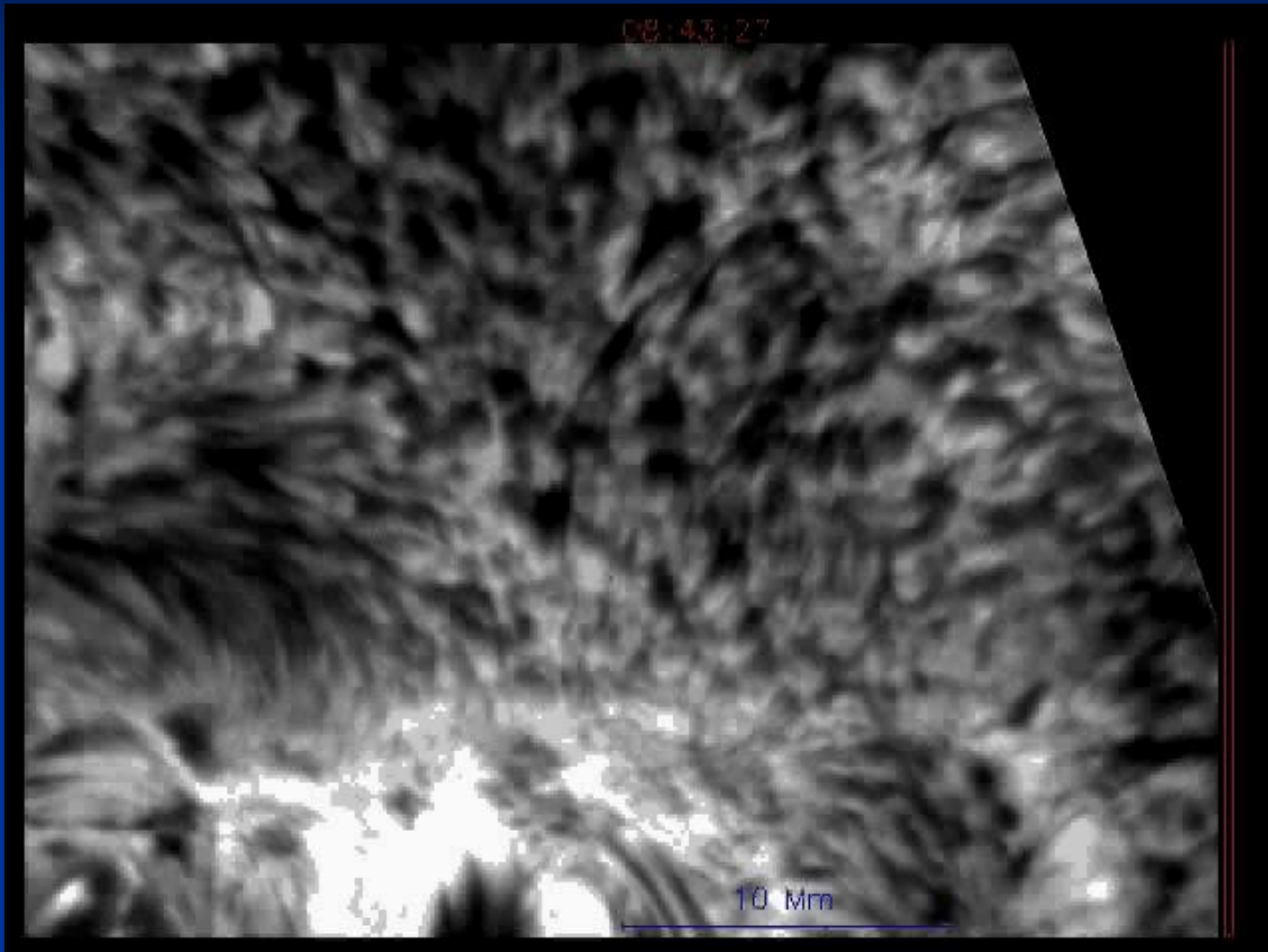
- Température: 4500K
- Hauteur: 5000 à 20000 km
- Section: 500 km
- Vitesse d'éjection: 20 km/s
- Durée de vie: 5 à 10 min



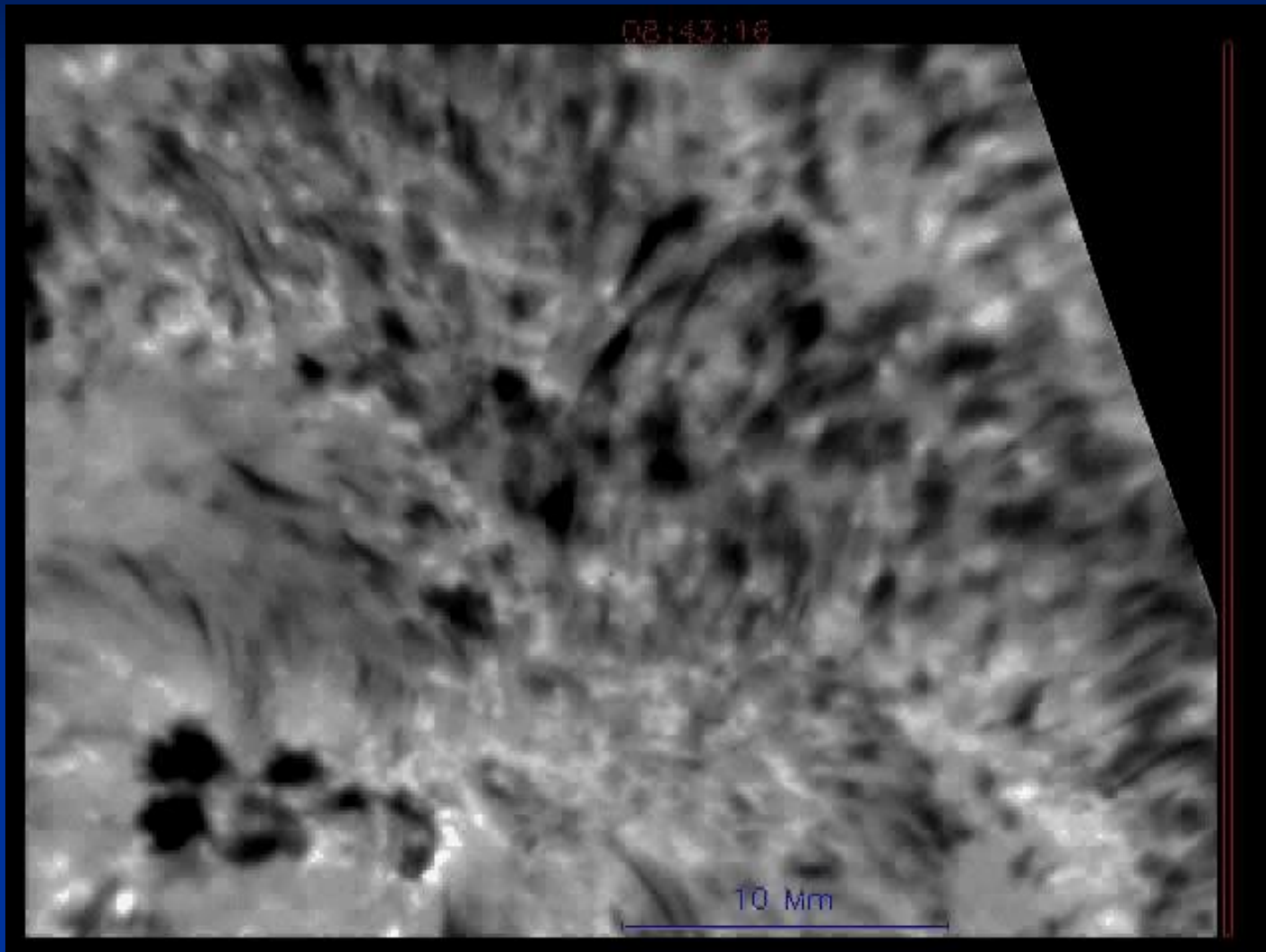
Photosphère (bande G): la source d'énergie



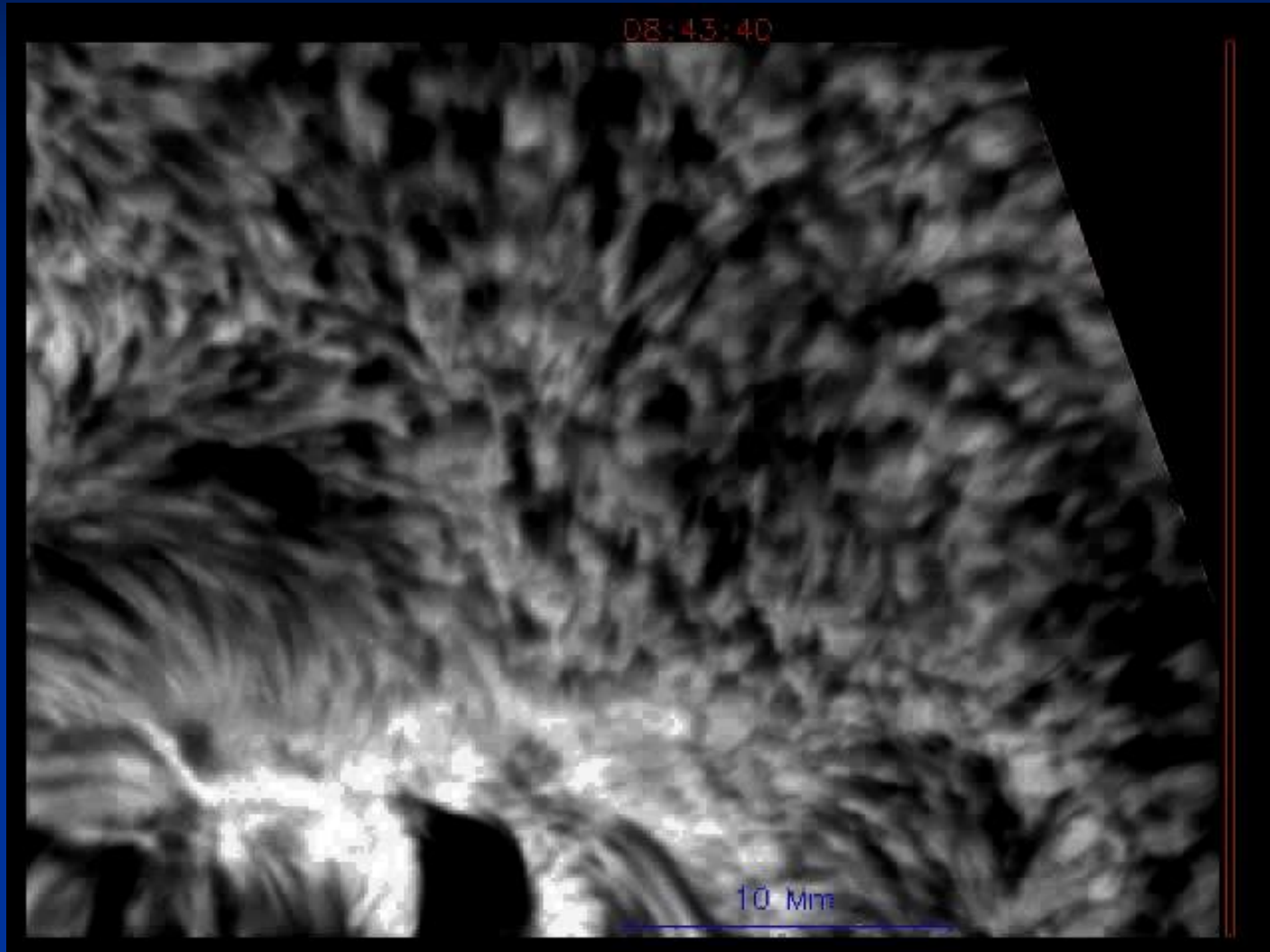
Spicules (Aile de la raie H α : +30 km/s)



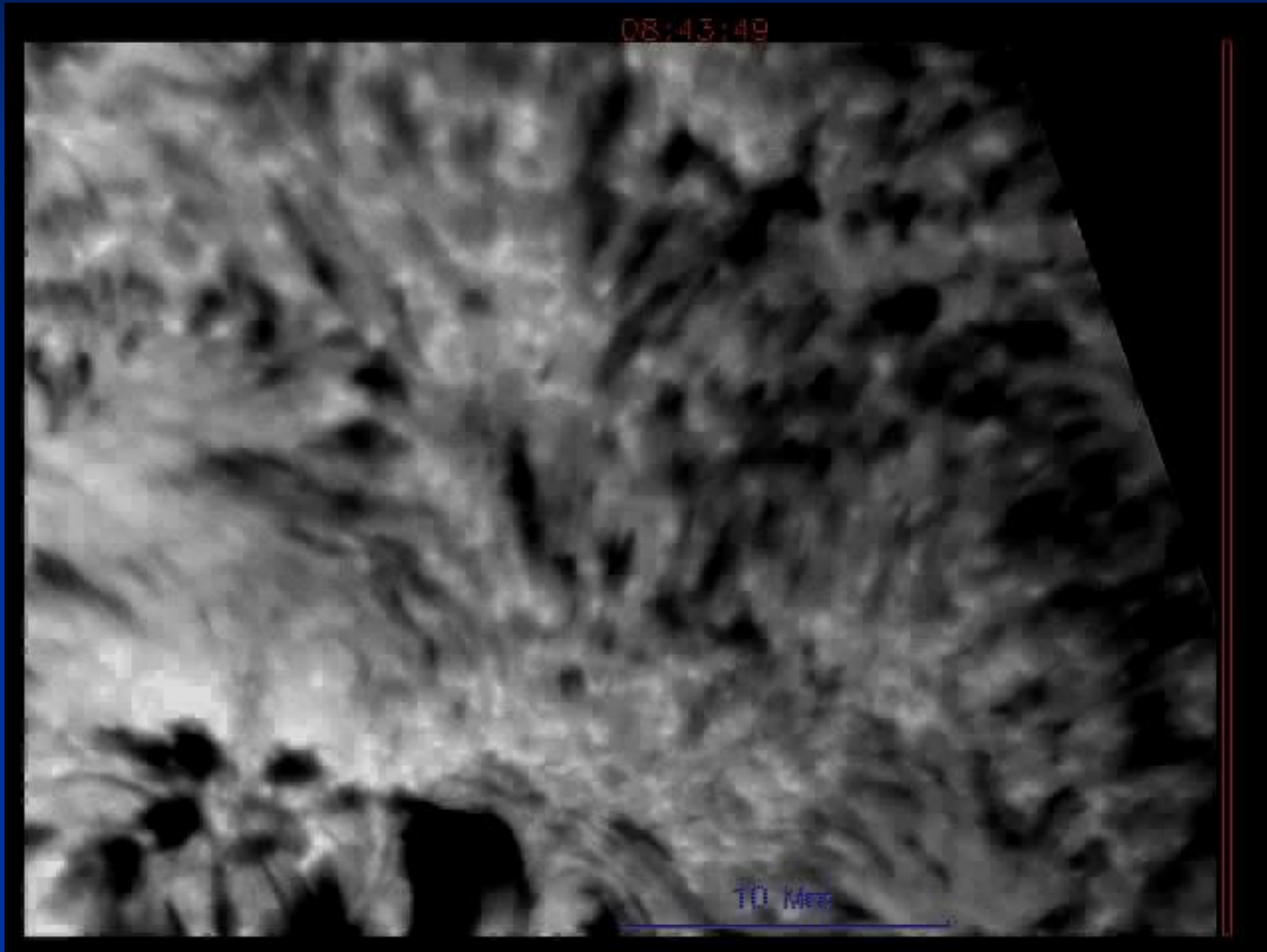
Spicules (Aile de la raie H α : +70 km/s)



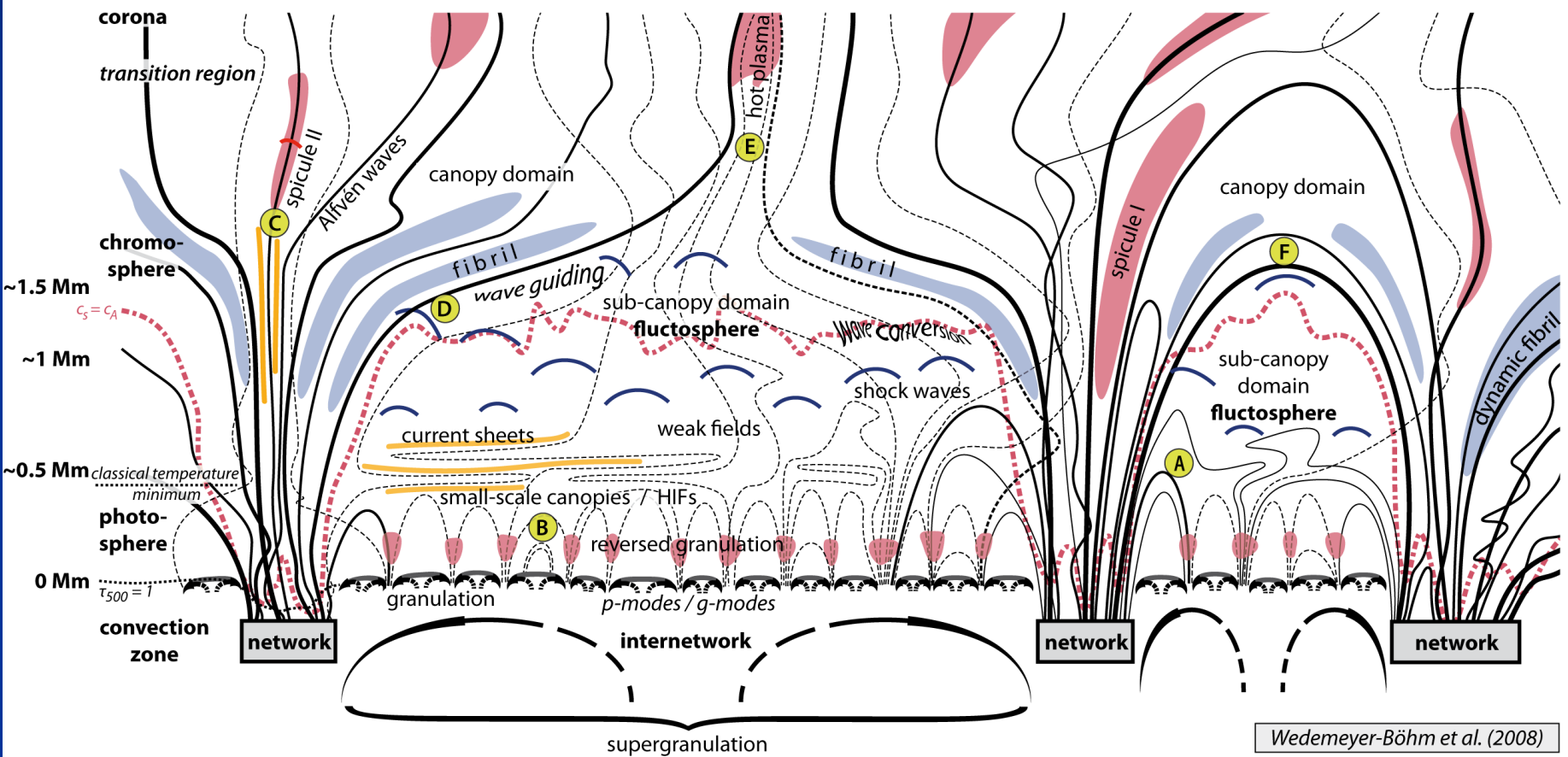
Spicules (Aile de la raie H α : -30 km/s)



Spicules (Aile de la raie H α : -70 km/s)



Structure de la chromosphère



Sources et dissipation d'énergie

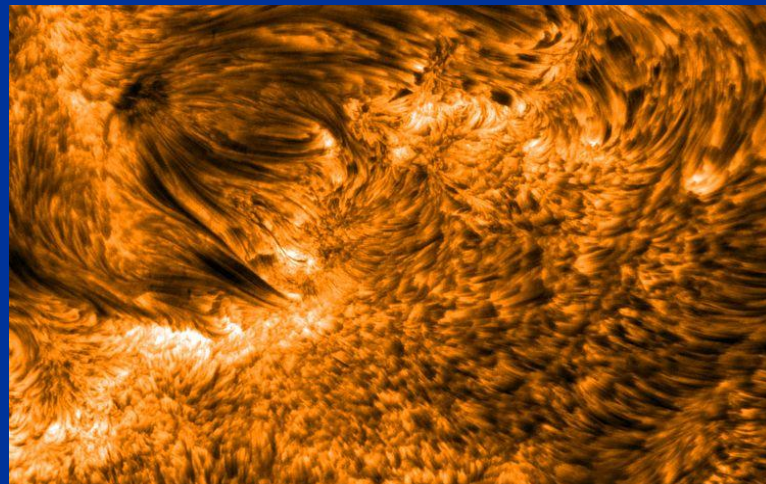


Chromosphère: mécanismes de chauffage

- Dans la photosphère: dissipation de l'énergie convective par le rayonnement
- Dans la chromosphère, diminution brutale de la densité:
 - La dissipation du flux d'énergie ne peut plus se faire par la radiation
 - ➔ **Hausse brutale de la température dans la chromosphère**
- Par la présence de champs magnétiques essentiellement verticaux:
 - Diffusion du plasma le long des lignes du champ
 - Conductivité fortement anisotrope: essentiellement verticale
 - Échanges très limités transversalement au champ magnétique
 - ➔ **Topologie essentiellement verticale (spicules)**

Les deux sources du chauffage

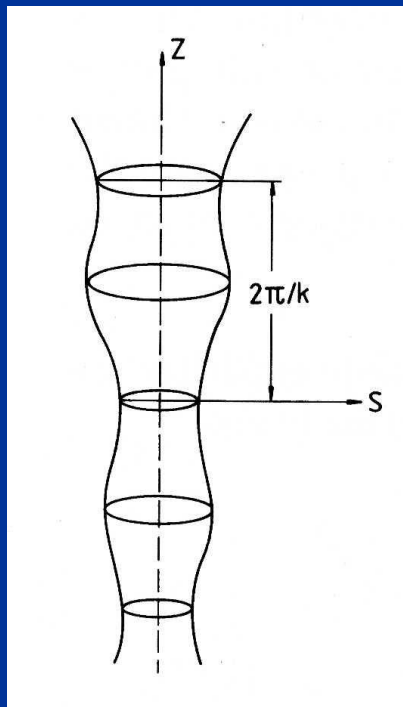
- La **convection turbulente** et les **modes-p** (ondes acoustiques) photosphériques produisent des **ondes acoustiques progressives** (*De Pontieu, Erdélyi & James 2004, Nature 430*):
 - Dissipation d'énergie par **ondes de choc** (gradient de densité décroissante)
 - Source dans l'**intérieur non-magnétisé des supergranules**
- La **convection turbulente** de la photosphère induit des **ondes magnéto-acoustiques** le long des **tubes de flux** :
 - Transport vertical de l'énergie
 - Dissipation d'énergie par **ondes de choc** (gradient de densité décroissante)
 - Source dans le **réseau chromosphérique**
- *Synthèses: Narain & Ulmschneider (1990), Ulmschneider (1996)*



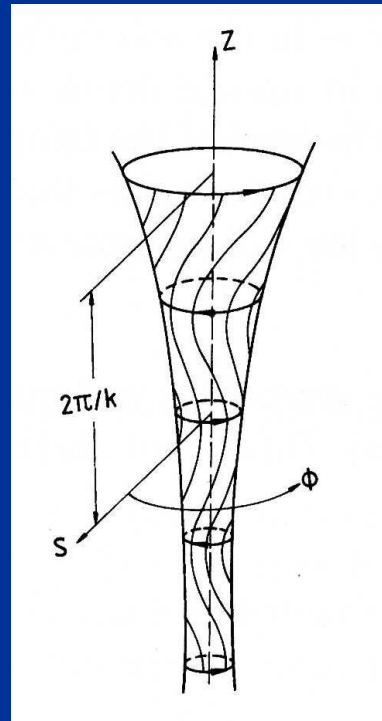
Ondes magnéto-acoustiques

- Excitation par le déplacement latéral des pieds des lignes de force au niveau de la photosphère
- Grande variété d'ondes possibles: modes MHD rapides et lents, ondes d'Alfvén internes et de surface

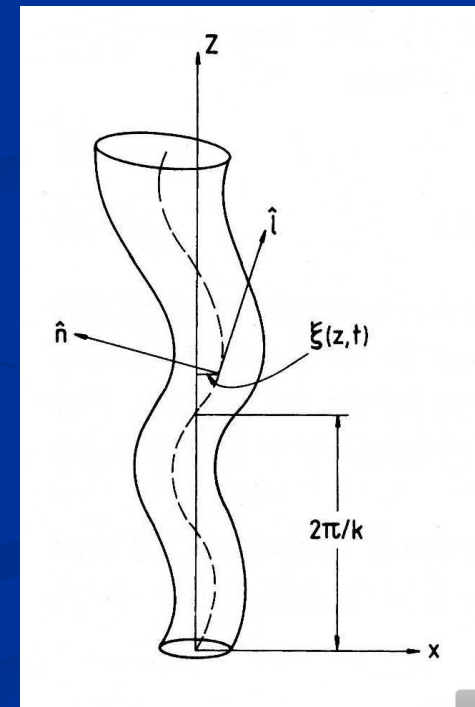
Longitudinale
("sausage")



Alfvén
torsionnelle

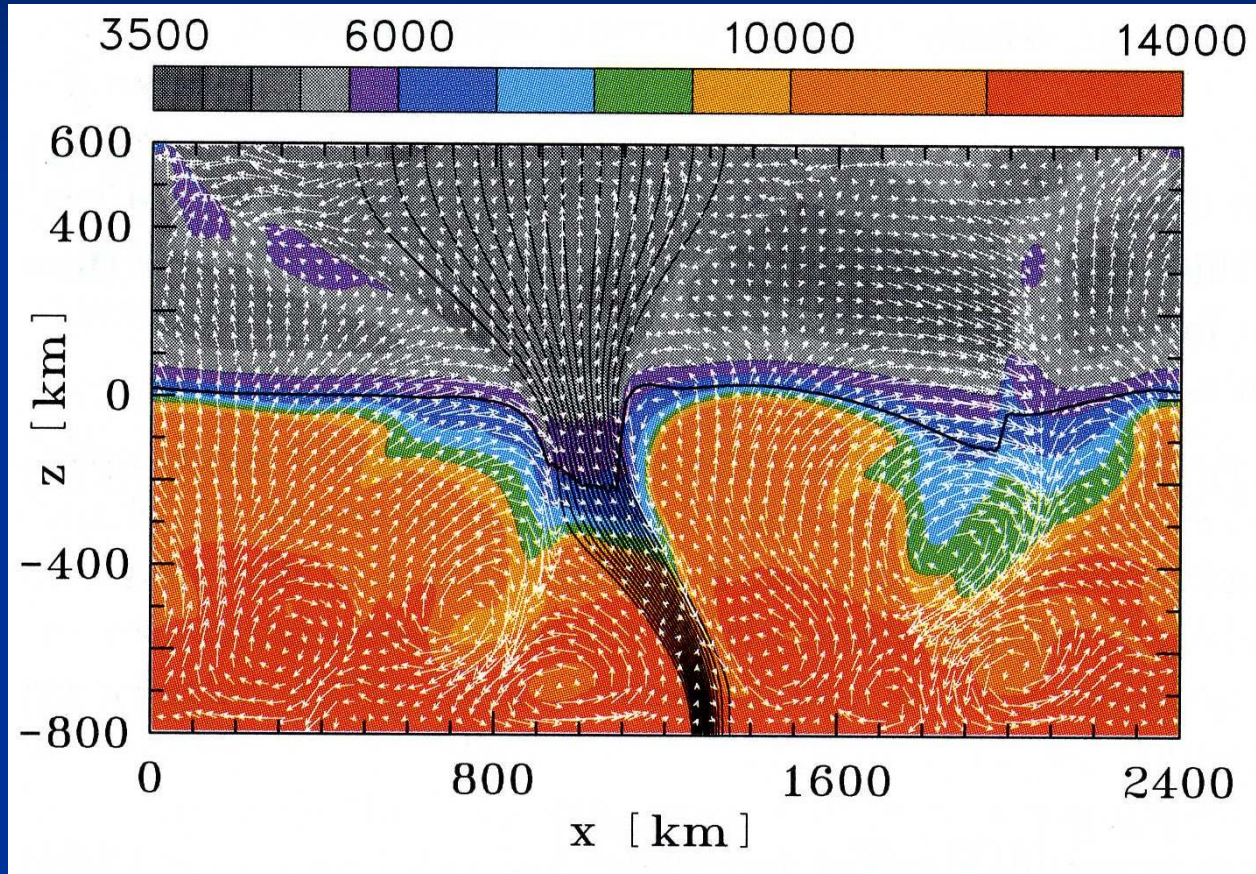


Alfvén
transversale



Dynamique de la magnétoconvection

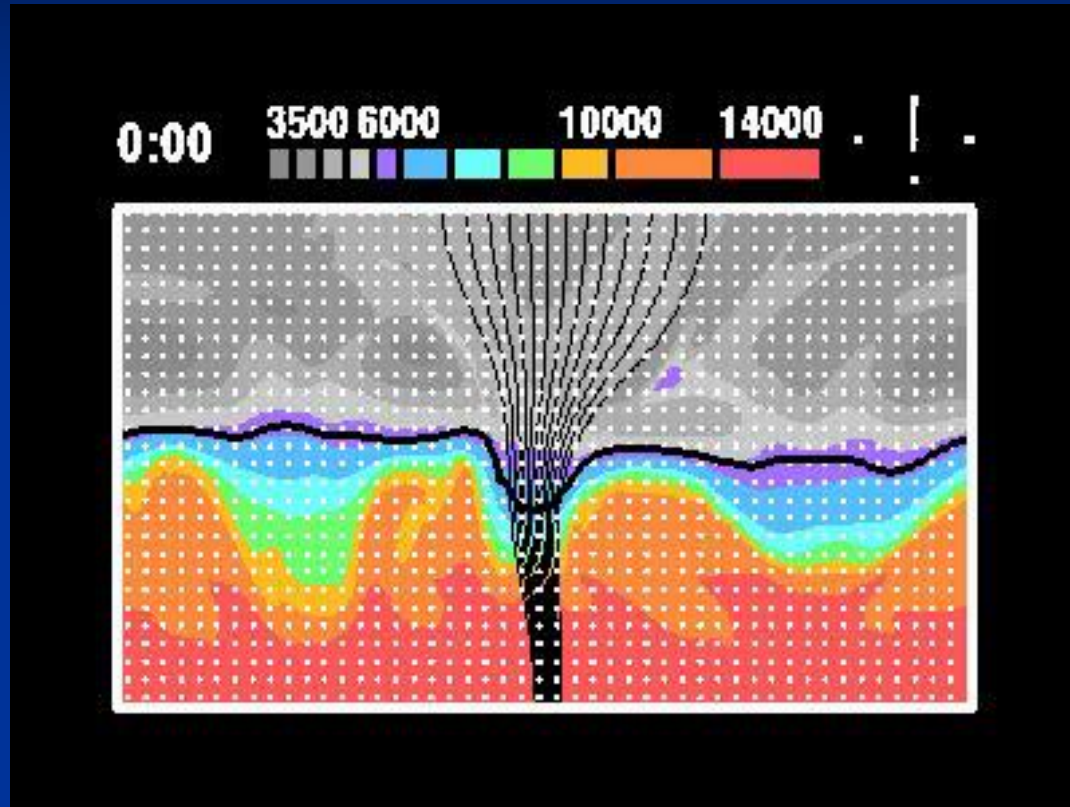
- Modèle MHD bidimensionnel de magnétoconvection (O. Steiner, KIS)



Couleurs: température (K)
Flèches blanches: vitesse du flot

Ligne noire épaisse: niveau $\tau=1$
Points blancs (Film): particules test

Dynamique de la magnétoconvection



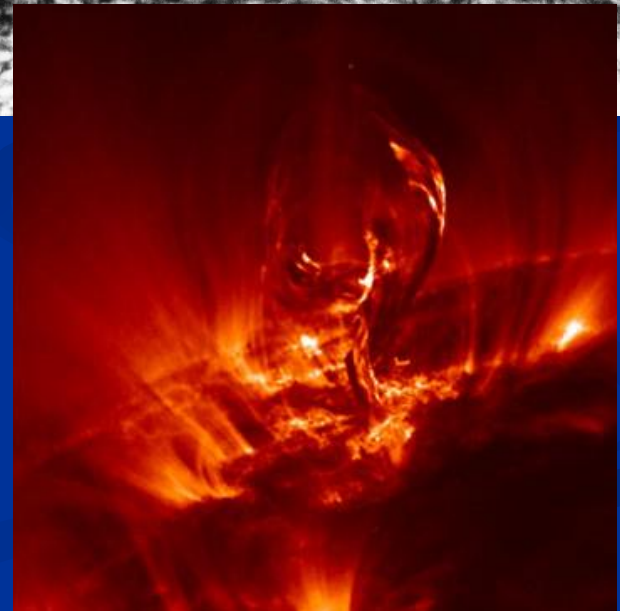
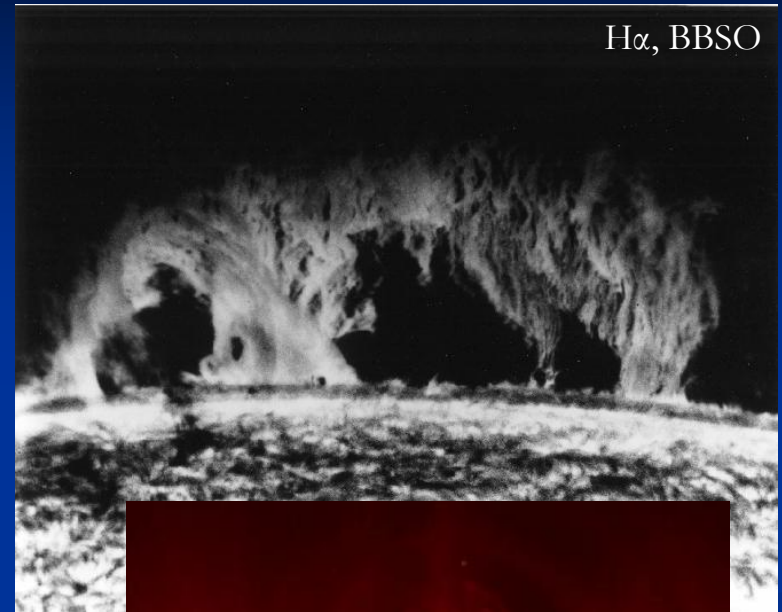
Couleurs: température (K)
Ligne noire épaisse: niveau $\tau=1$
Flèches blanches: vitesse du flot
Points blancs (Film): particules test

Protubérances



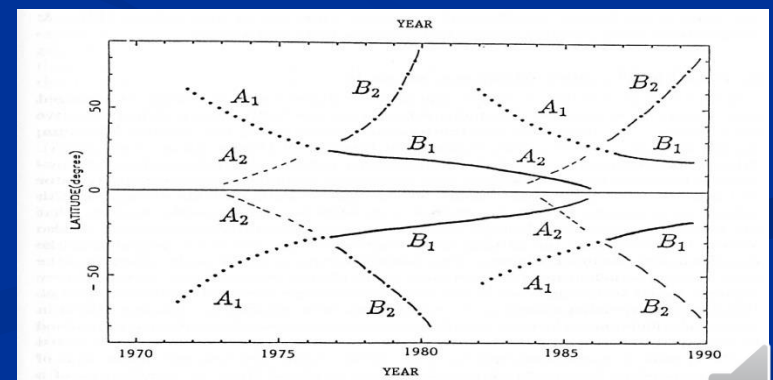
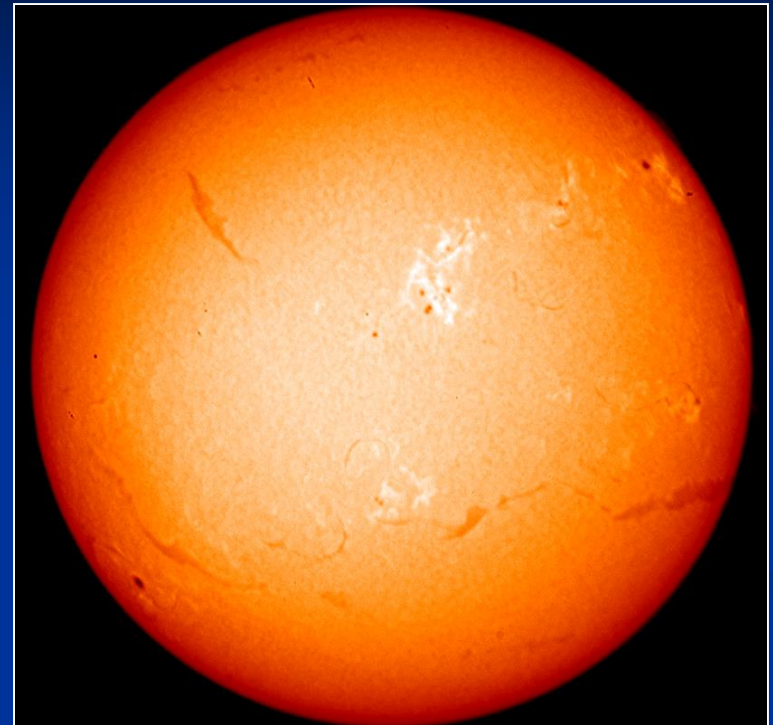
Les protubérances: propriété générales

- Grandes draperies lumineuses suspendues au-dessus de la surface solaire et observées dans les raies chromosphériques:
 - Masses de gaz plus froides et plus denses que la couronne environnante
 - Structures mixtes: coronales et chromosphériques
- Propriétés:
 - Température: 10000 K
 - Densité: 10^{10} à 10^{11} cm^{-3} (500x densité coronale)
 - Hauteur: 20 à 100000 km
 - Épaisseur: 10000 km
 - Longueur: jusqu'à 700000 km (1 R_s)



Les protubérances: propriété générales

- Localisation:
 - Au-dessus des lignes neutres du champ magnétique photosphérique:
 - toutes orientations possibles mais principalement E-W.
 - A la base des grands jets coronaux
- Distribution globale:
 - Protubérances présentes jusqu'aux hautes latitudes (B2): "polar crown filaments" entourant les trous coronaux polaires en phase de minimum d'activité
 - Les filaments permettent de tracer un cycle solaire avant l'apparition des taches du nouveau cycle (A1).



Protubérances: mécanismes de formation

- Matière coronale condensée ou matière d'origine chromosphérique retenue dans les **concavités horizontales d'une arcade magnétique**
- Diverses configurations possibles, avec des points communs:
 - **Arcade magnétique** surplombant une ligne neutre
 - Dépression de l'arcade ou **corde de flux torsadée horizontale** bloquée sous l'arcade.
- Formation par une **instabilité thermique** (équilibre entre chauffage et pertes radiatives):
 - La densité coronale augmente et le plasma se refroidit
 - La plasma plus froid peut dissiper plus d'énergie par rayonnement

➔ accélération du refroidissement

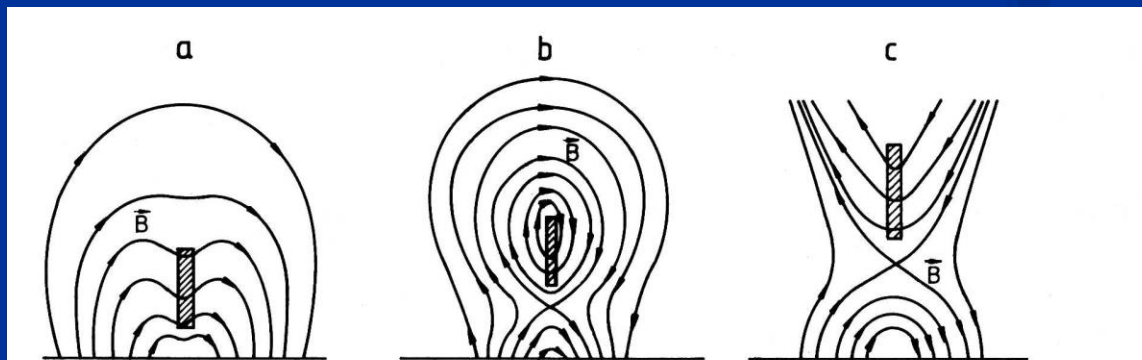
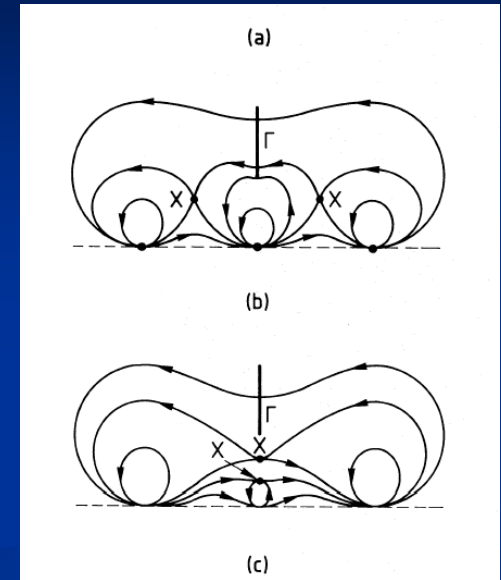
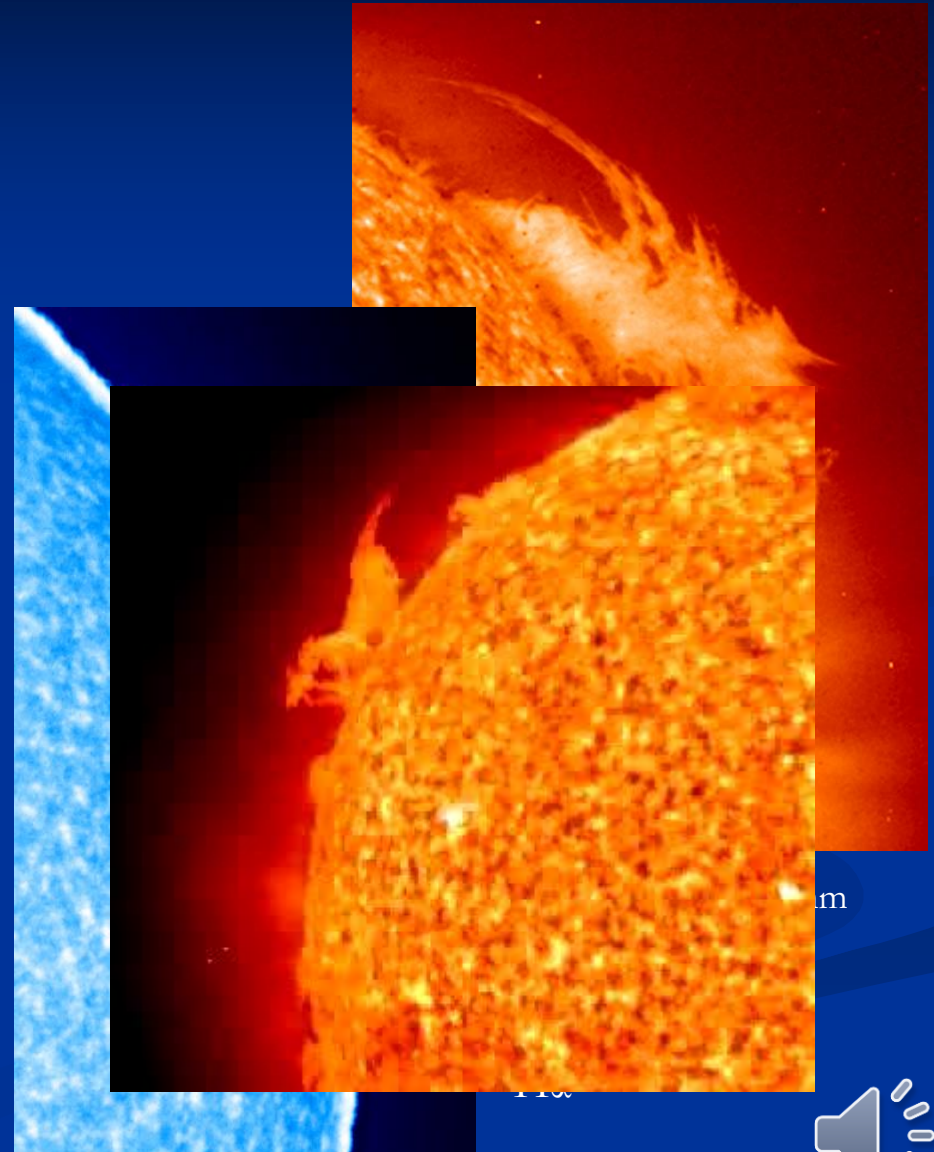


Fig. 9.21. Models for the magnetic support of a prominence (*hatched rectangle*). Adapted from Anzer (1987)



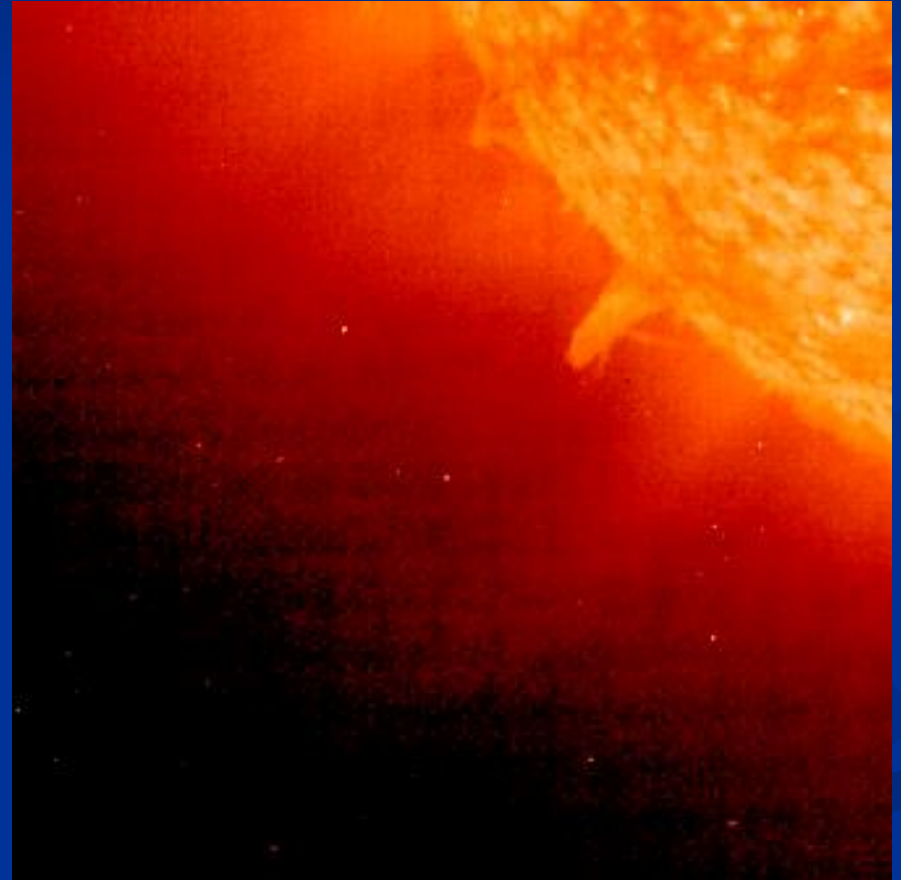
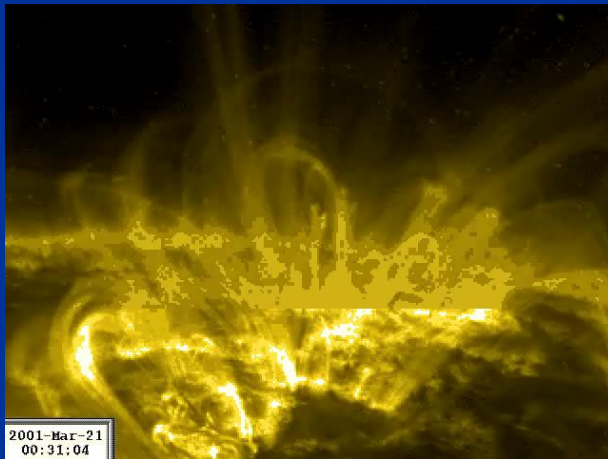
Les protubérances: propriété générales

- Topologie:
 - Arcade
 - "Bavures" ou "barbillons" descendants, reliant l'arcade principale à la chromosphère
 - Fibres torsadées (hélicité magnétique)
- Dynamique:
 - Écoulements plus ou moins continus, souvent descendant vers la surface.
 - Disparitions lentes par fragmentation
 - Éruptions de protubérances



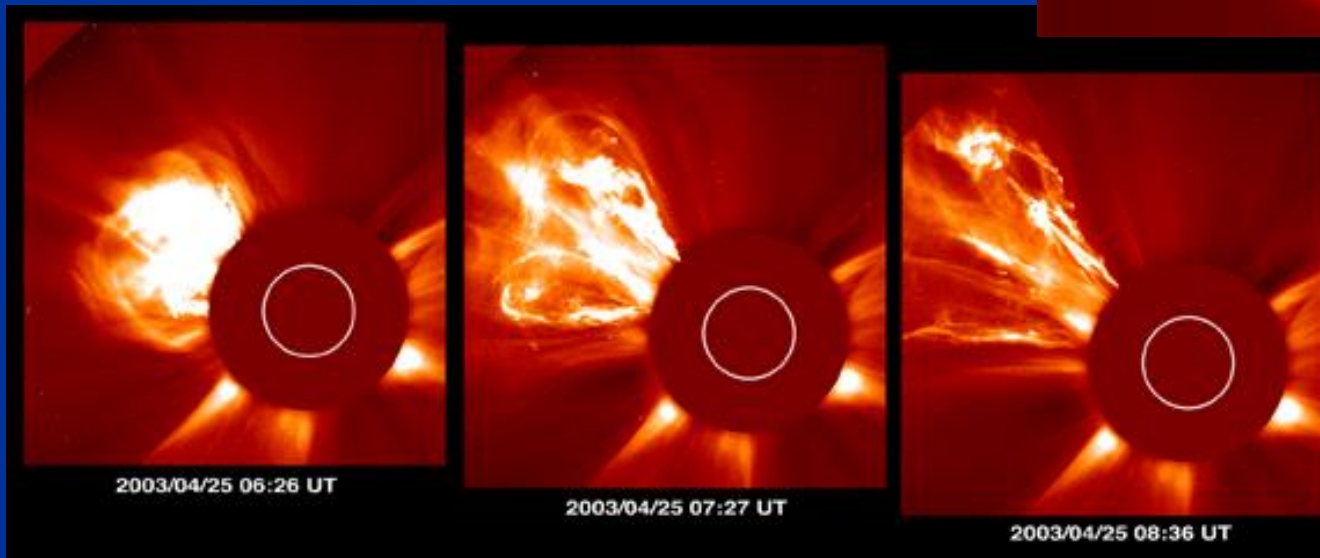
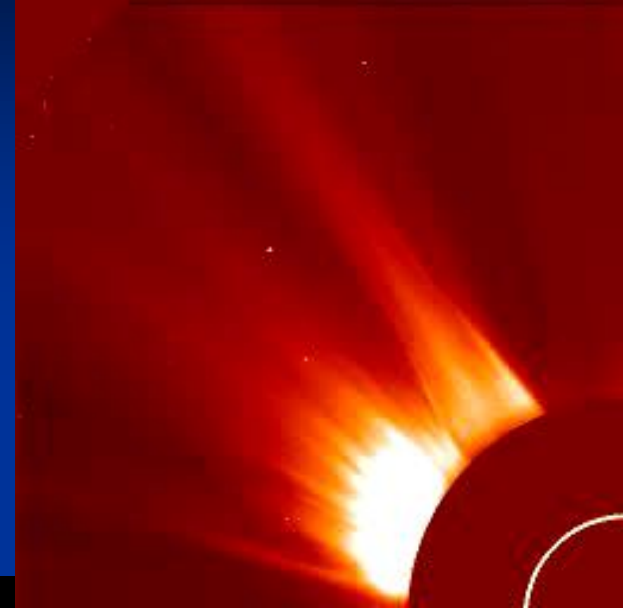
Les protubérances: quiescentes et éruptives

- Protubérances quiescentes: Structure stable durant des jours ou semaines
- Protubérances éruptives:
 - Éjections brutales en moins d'1 h. ("Disparition brusque«)
 - Vitesse: jusqu'à 1000 km/s
 - Le déroulement de l'arcade torsadée suggère la libération d'énergie magnétique potentielle (torsion du champ) au cours de l'éruption.



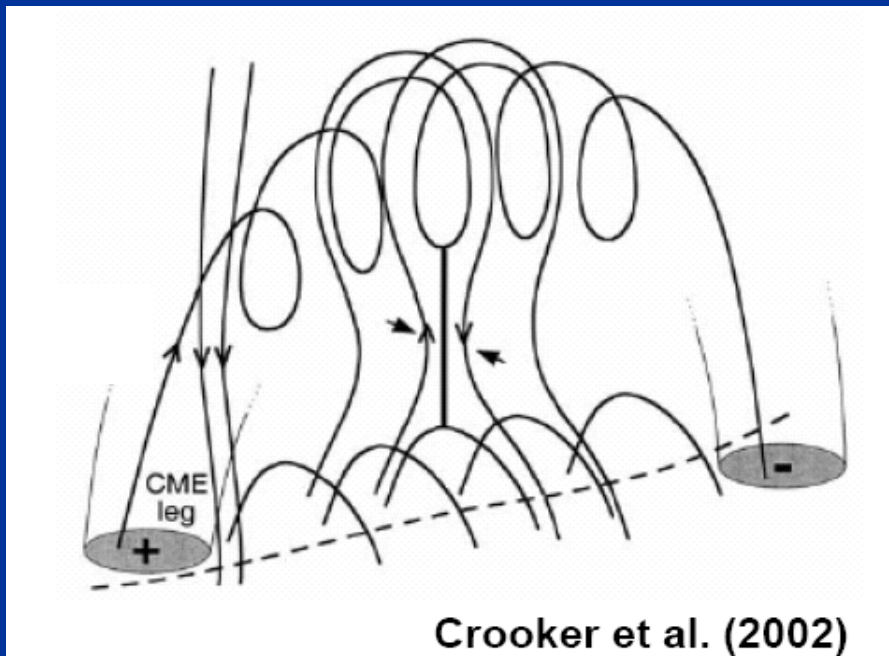
Association protubérances - CMEs

- Eruptions de filaments toujours associées aux éjections de masse coronales (CME):
 - Ejecta inclus dans la cavité du CME
- Deux types:
 - Dans les régions actives (éruptions)
 - Hors des régions actives: partout sur le Soleil, sauf dans les régions unipolaires (trous coronaux)

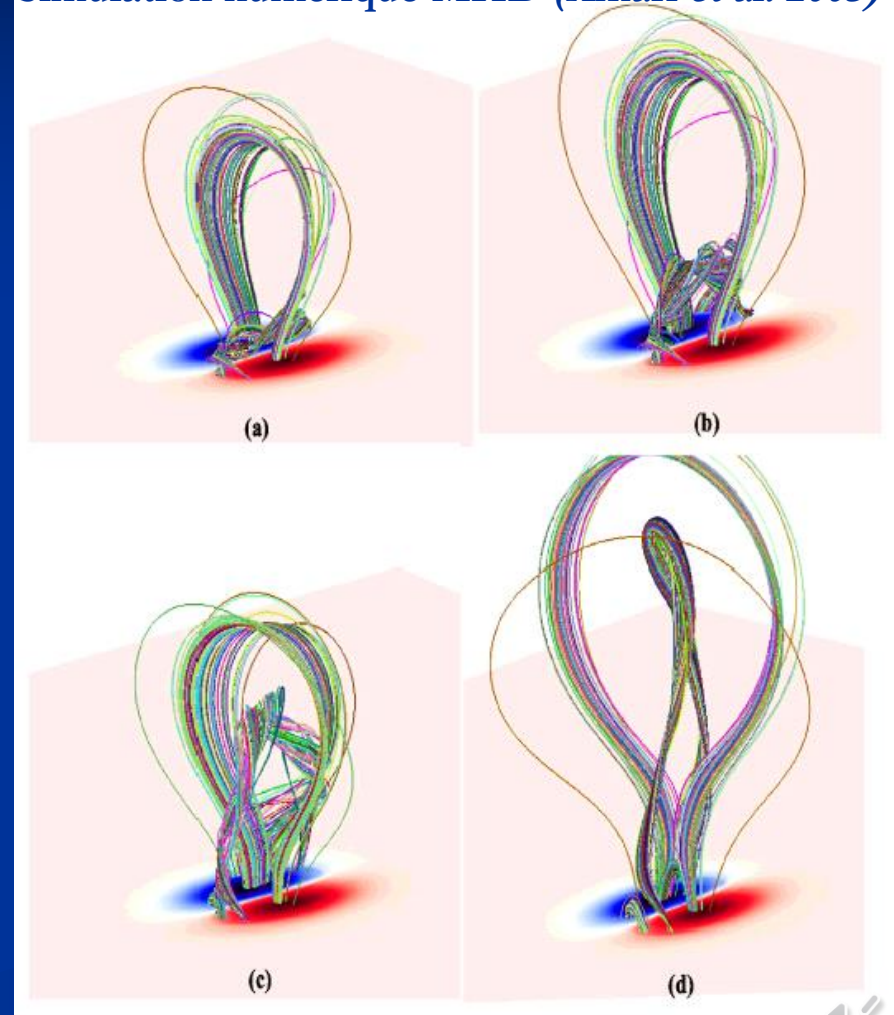


Modèle d'éruption

- Détachement de la corde de flux magnétique:
 - Rupture de l'arcade magnétique surplombante
 - Reconnexion magnétique sous la corde (plasmoïde détaché)
 - Extrémités de la corde restent attachées à la surface



Simulation numérique MHD (*Amari et al. 2003*)



Eruptions solaires



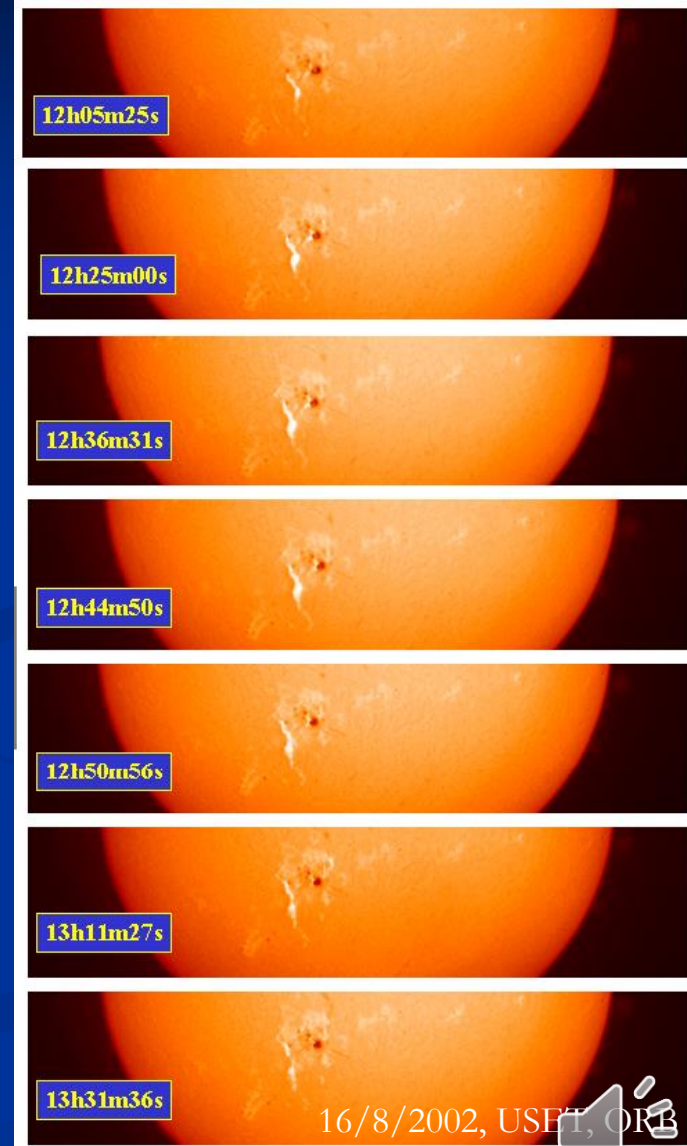
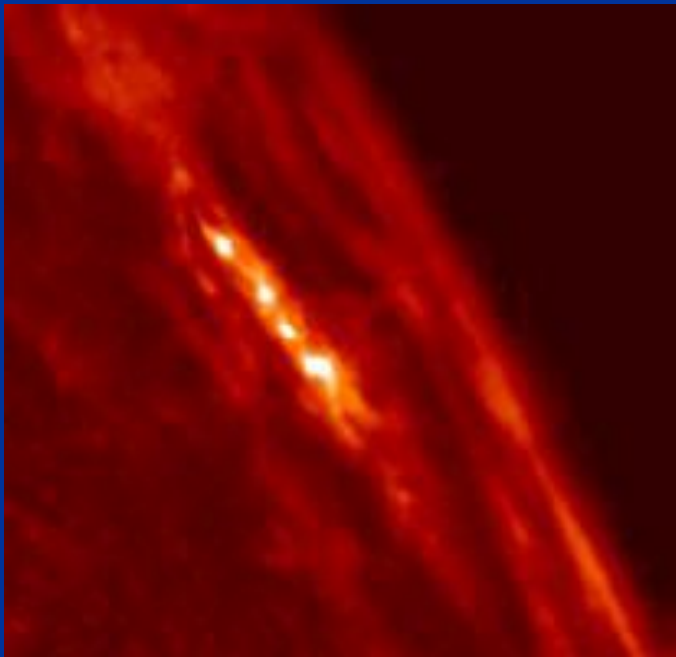
Activité solaire: définition

- *Ensemble des phénomènes de libération impulsive d'énergie dans l'atmosphère solaire produits par l'évolution et la transformation brutale des champs magnétiques émergeant à la surface du Soleil.*
 - Variations impulsionnelles des émissions solaires:
 - Production de **jets de particules** sur une large gamme d'énergie (jusqu'au régime relativiste)
 - **Sursauts intenses de rayonnement** sur tout le spectre électromagnétique, en particulier dans l'UV, les rayons X et gamma, et aux longueurs d'onde radio (centimétrique à décimétrique).
 - L'activité solaire la plus intense est associée aux **régions actives**, où les champs magnétiques sont concentrés: **éruptions solaires**
- ➔ Mécanisme: **reconnexion magnétique**
- Site primaire de la reconnexion situé dans la couronne solaire



Éruptions solaires: morphologie et dynamique

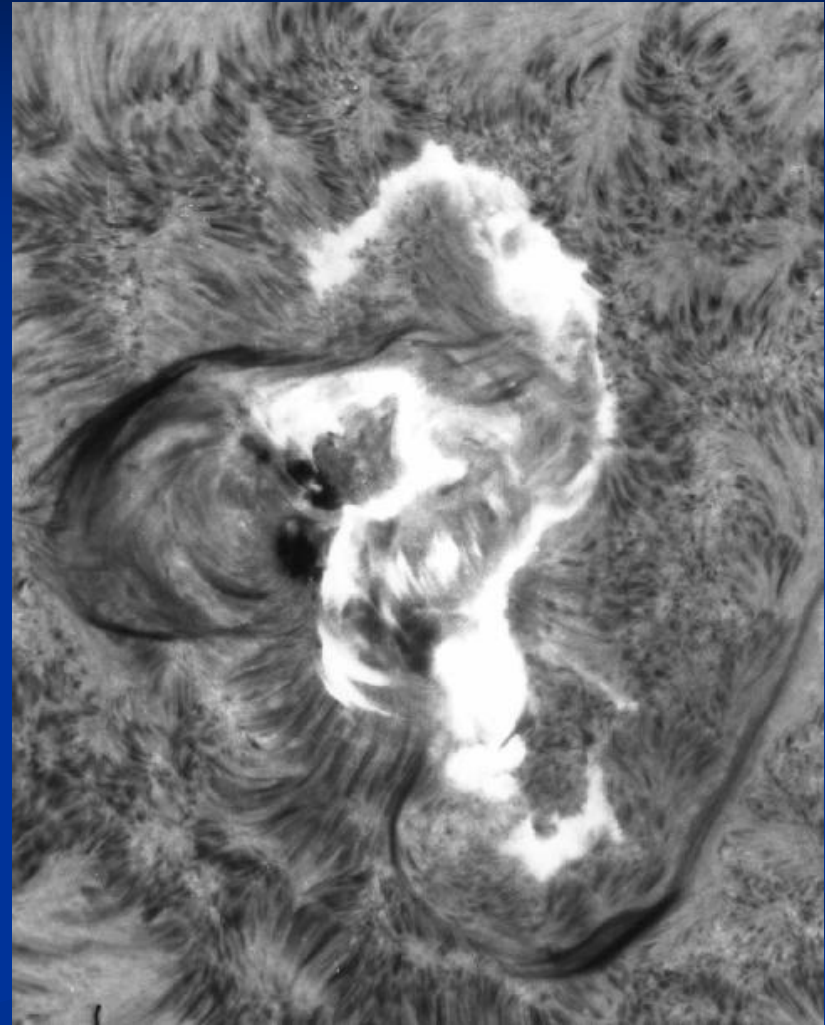
- Émissions principales observées dans la couronne et la chromosphère:
- **Plages brillantes** au voisinage d'une **ligne neutre** à l'intérieur d'un groupe de taches
- **Intensification d'un facteur supérieur à 3 (jusqu'à 10)** par rapport à la chromosphère calme)



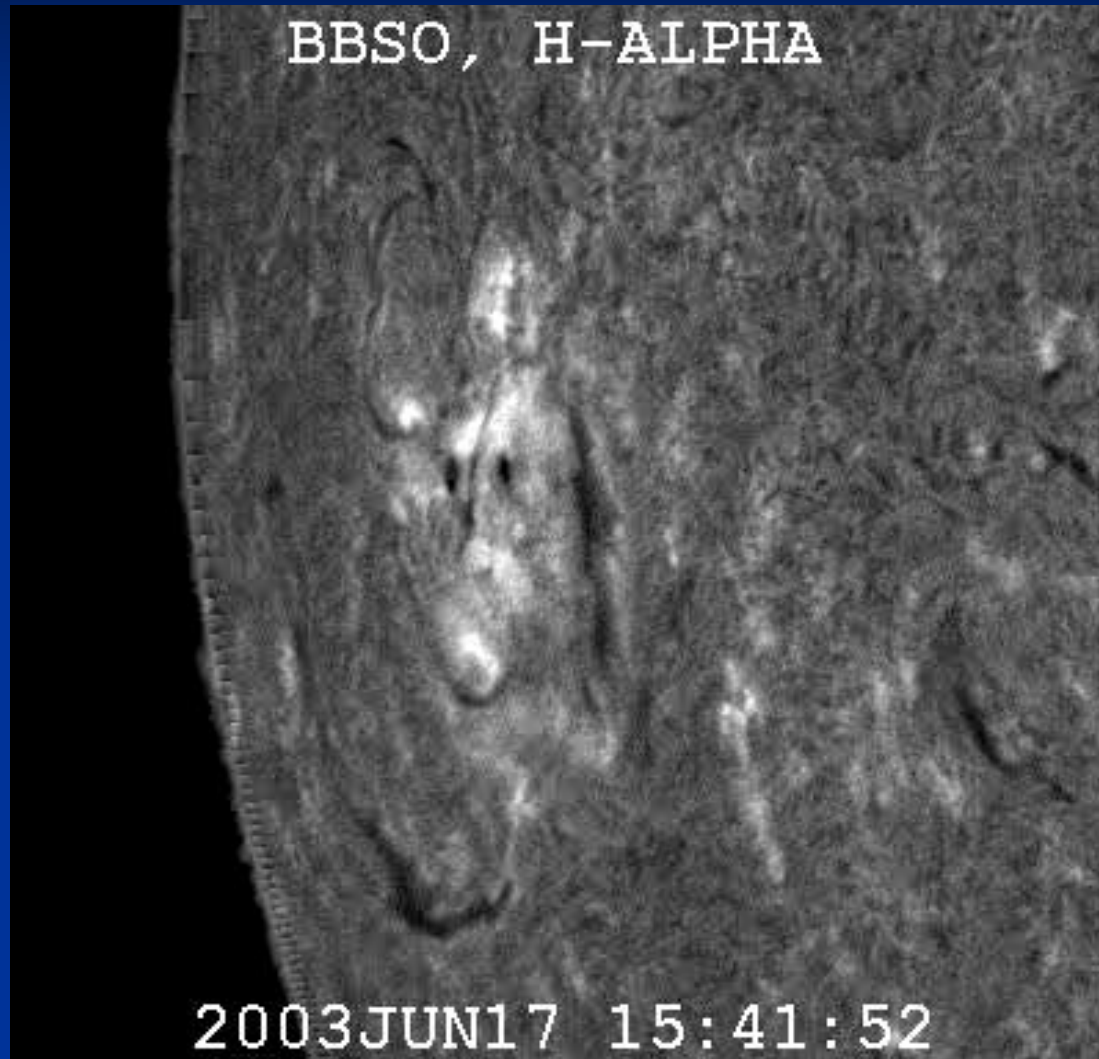
Dynamique: chromosphère

- Apparition fréquente d'un **double ruban brillant** de part et d'autre d'une **ligne neutre magnétique**:
 - Souvent associée à l'éjection d'un filament situé sur cette ligne.
 - Rubans invisibles au limbe: ils se trouvent à **la surface**
 - Juste après le maximum d'intensité, apparition de **boucles reliant les deux rubans** et ancrées dans les rubans, qui constituent les pieds de l'arcade.
 - Ensuite affaiblissement progressif des plages brillantes

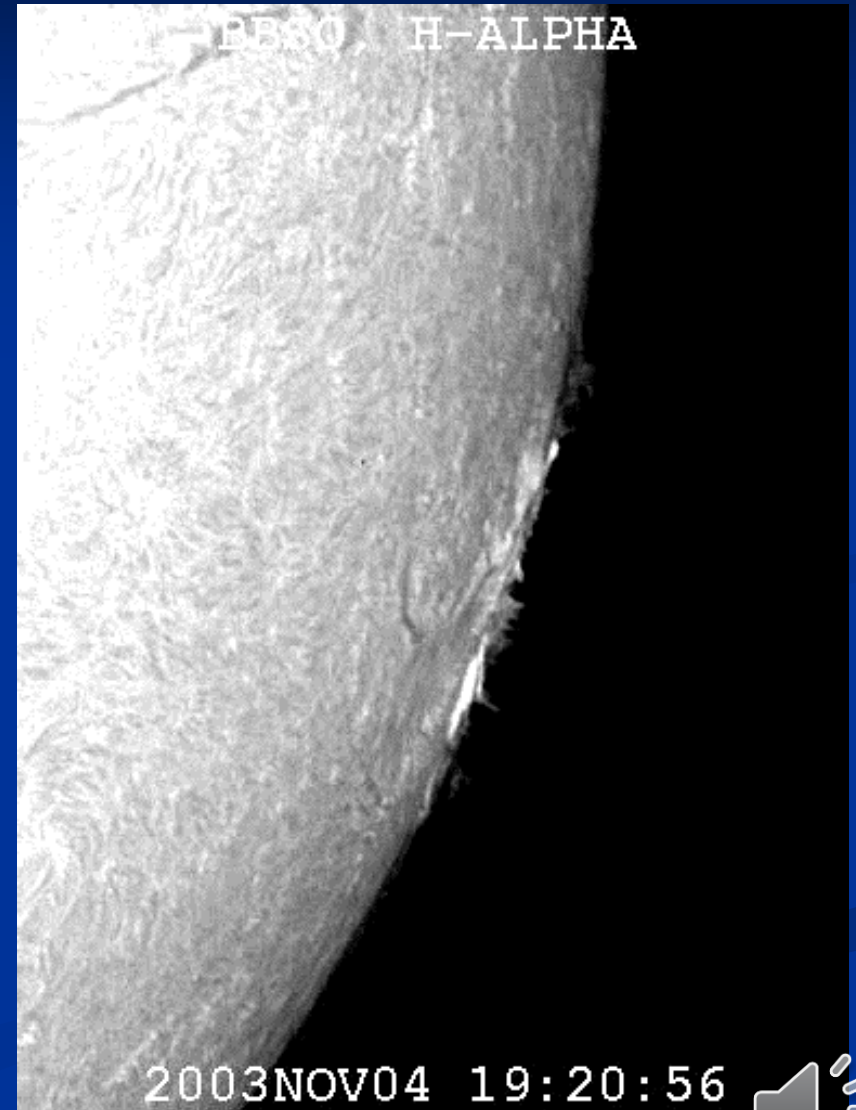
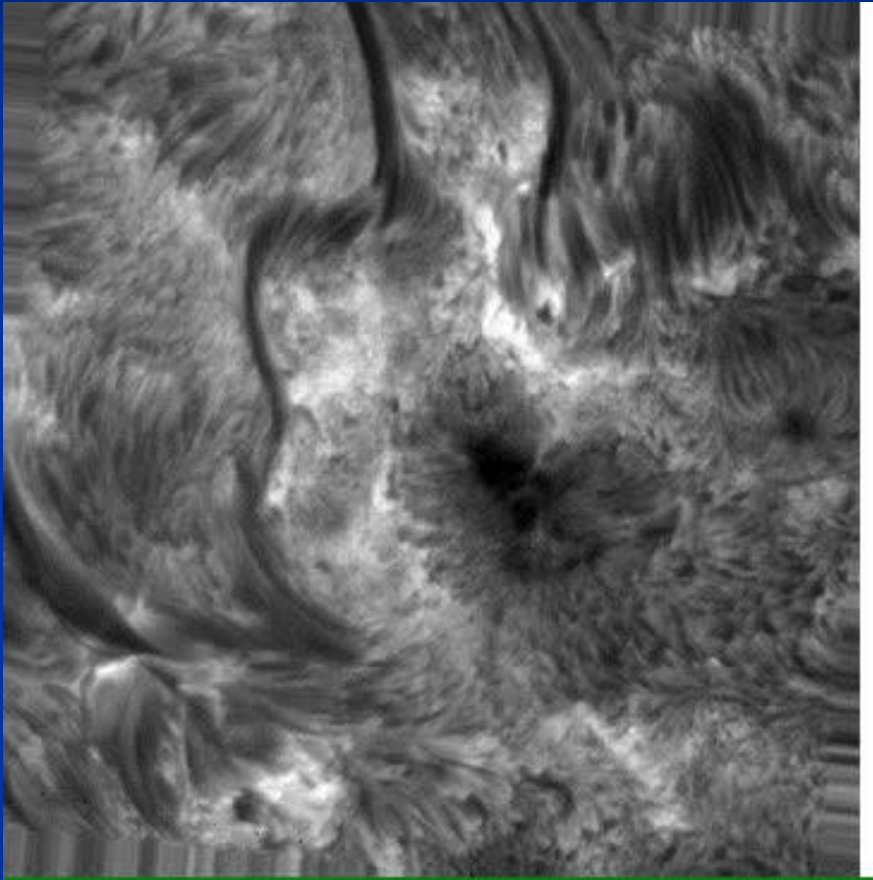
➔ *Eruptions à double ruban*



Eruptions solaires

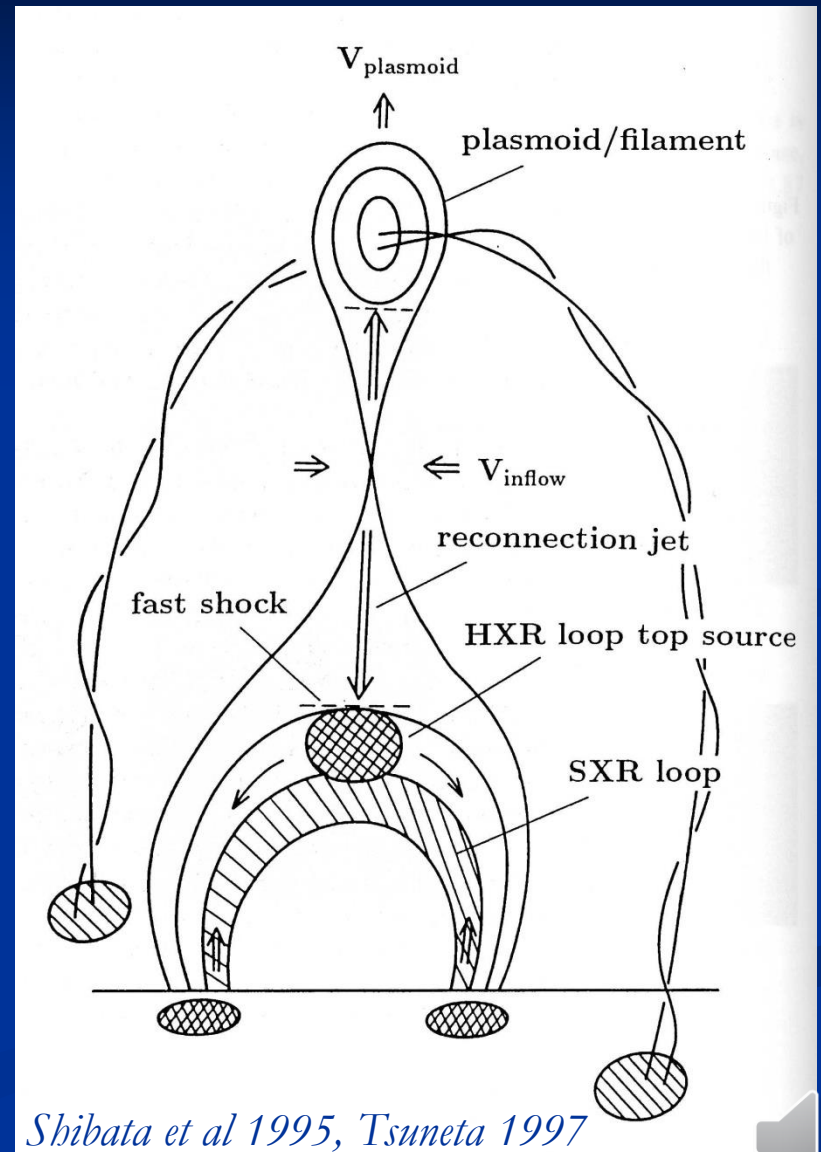


Eruptions solaires



Éruptions solaires: modèle unifié

- Accélération de particules (électrons, protons) au-dessus de l'arcade magnétique:
 - Précipitation des particules à haute énergie le long des boucles de l'arcade
- Collision avec les couches denses de la chromosphère:
 - **Echauffement** du plasma chromosphérique: intensification des raies d'émissions ($H\alpha$, 10^4K)
 - **Dilatation** du plasma et remplissage des arcades magnétiques (**Evaporation chromosphérique**)
- Reconnexion progressive à plus haute altitude:
 - Remplissage de boucles de plus en plus hautes
 - **Ecartement croissant des rubans chromosphériques**



Éruptions solaires: classification

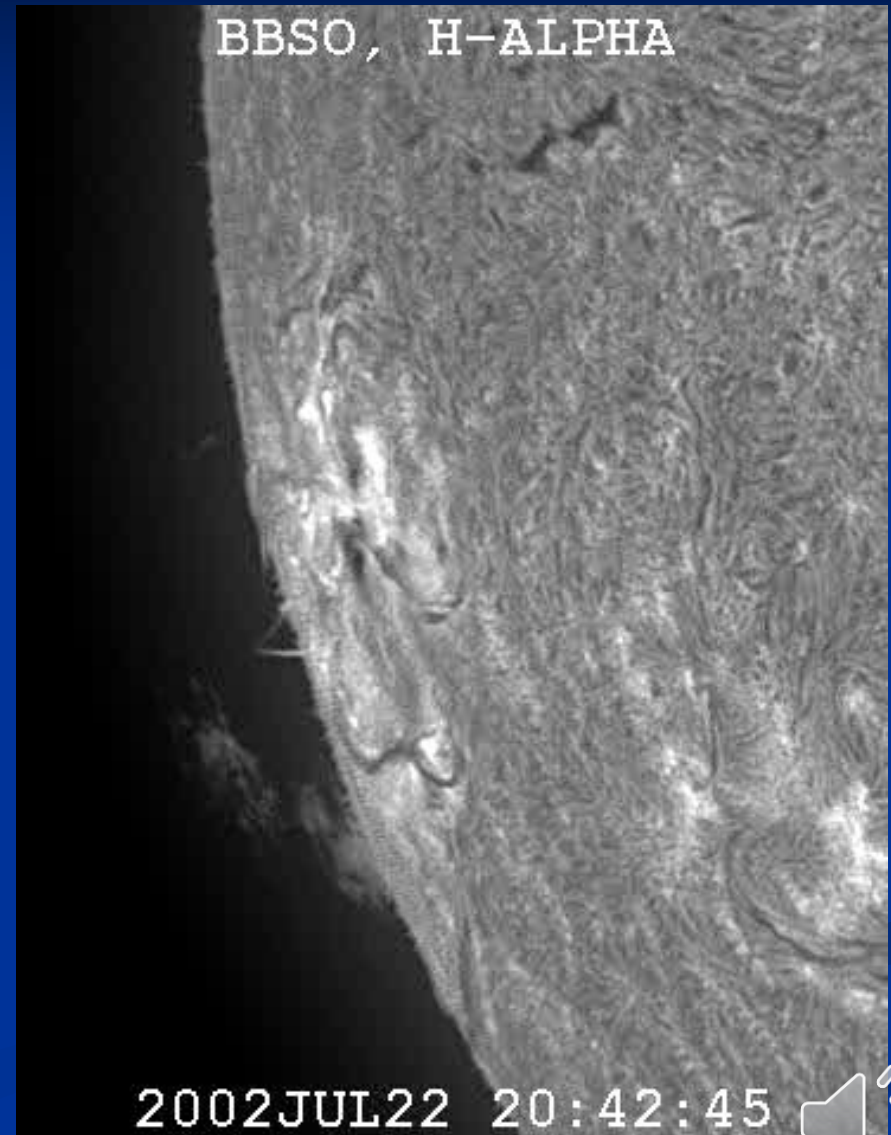
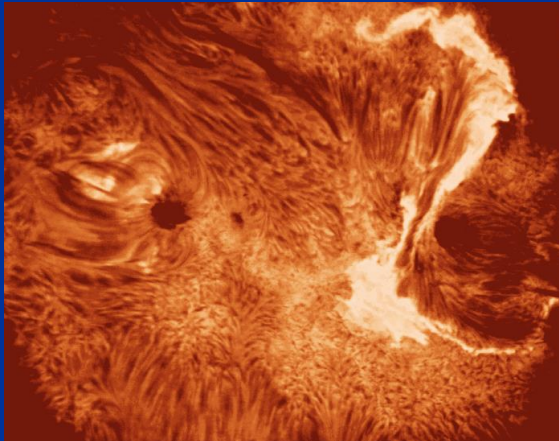
- Classification chromosphérique:
- Echelle la plus ancienne (1957)
- Basée sur l'aire et l'intensité mesurée dans la raie $H\alpha$

Classe $H\alpha$	Surface (10^{-6} hém. Sol.)
S (subflare)	$A < 100$
1	$100 \leq A < 250$
2	$250 \leq A < 600$
3	$600 \leq A < 1200$
4	$A \geq 1200$

Sous-classe	Intensité $H\alpha$
f	faint
n	normal
b	bright

Dynamique: chromosphère

- Propagation d'une onde de choc, l'onde de Moreton (Athay & Moreton 1961):
 - Associées aux fortes éruptions
 - Vitesse de propagation: ~ 1000 km/s

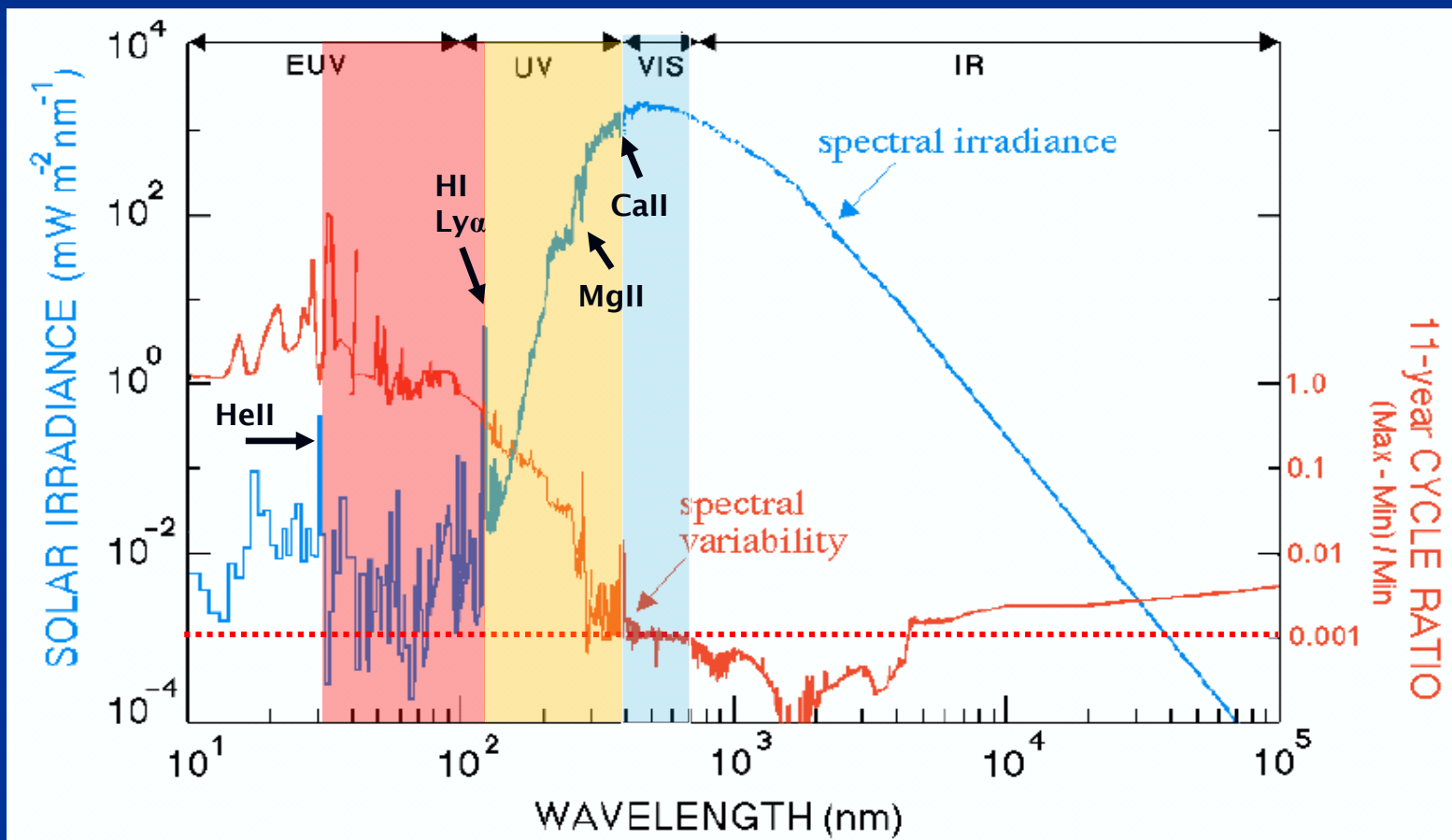


Emissions chromosphériques et impacts sur la Terre

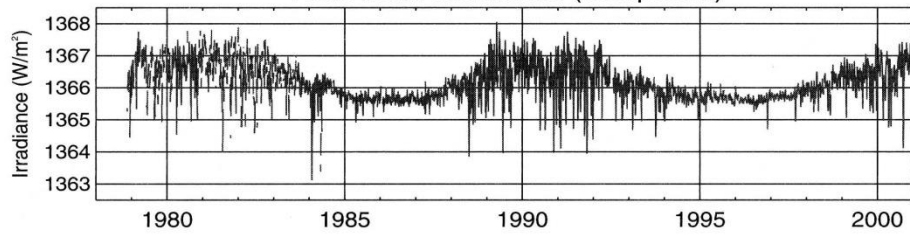


Éclairement spectral et sa variation

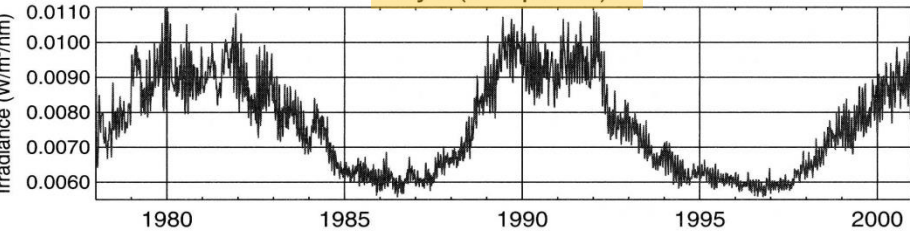
- Variabilité très élevée en-dessous de 320 nm (facteurs 10 à 1000)
 - 2% du rayonnement total
 - UV produit principalement par la chromosphère



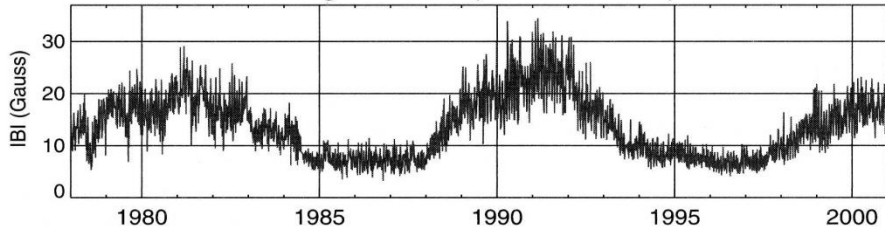
Total Solar Irradiance (composite)



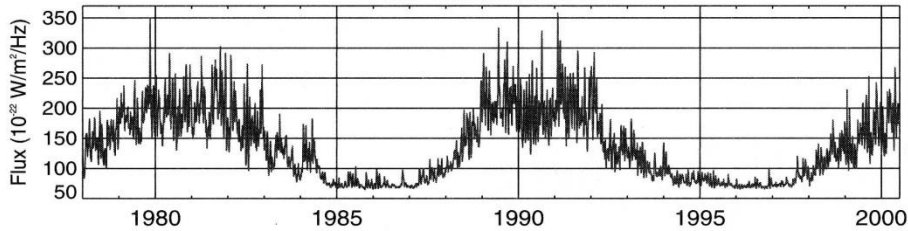
$\text{Ly}\alpha$ (composite)



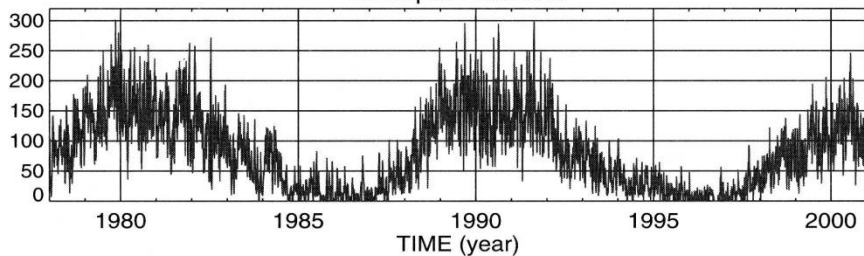
Magnetic Flux (NSO/Kitt Peak)



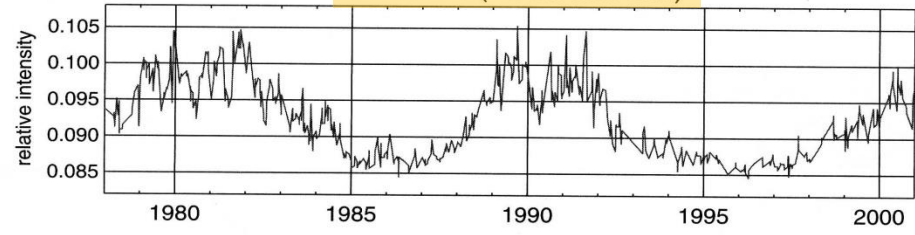
10.7 cm Radio Flux



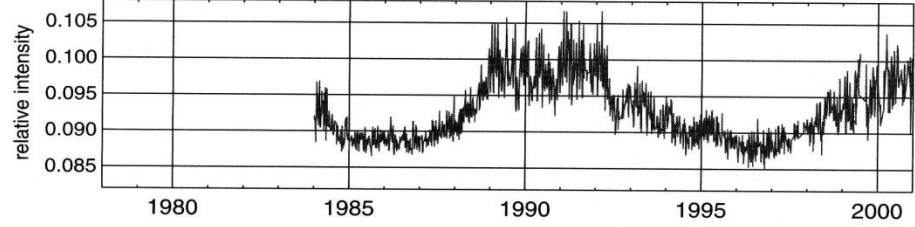
Sunspot Number



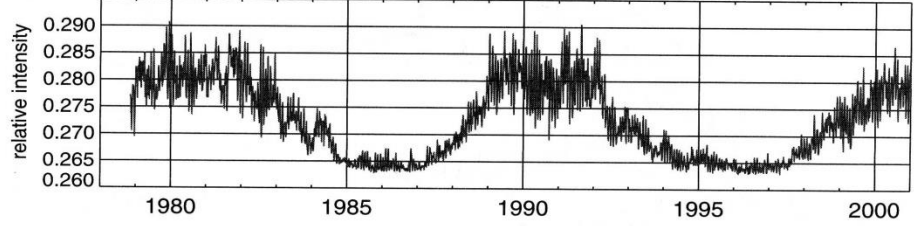
Call Index (NSO/Kitt Peak)



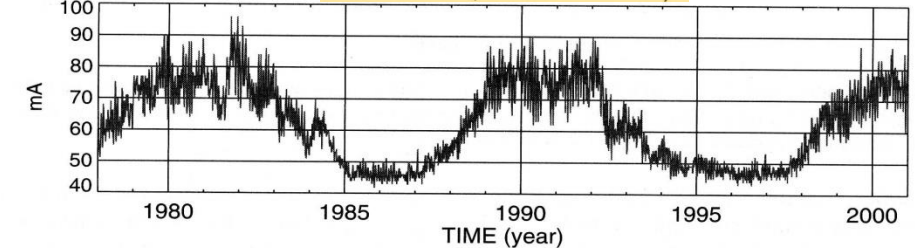
Call Index (NSO/Sac Peak)



MgII Index (composite)



HeI Index (NSO/Kitt Peak)



■ Séries temporelles "proxy"
pour la période 1975 à 2001
(G. De Toma)

Ionosphère et couche d'ozone

■ Ionosphère:

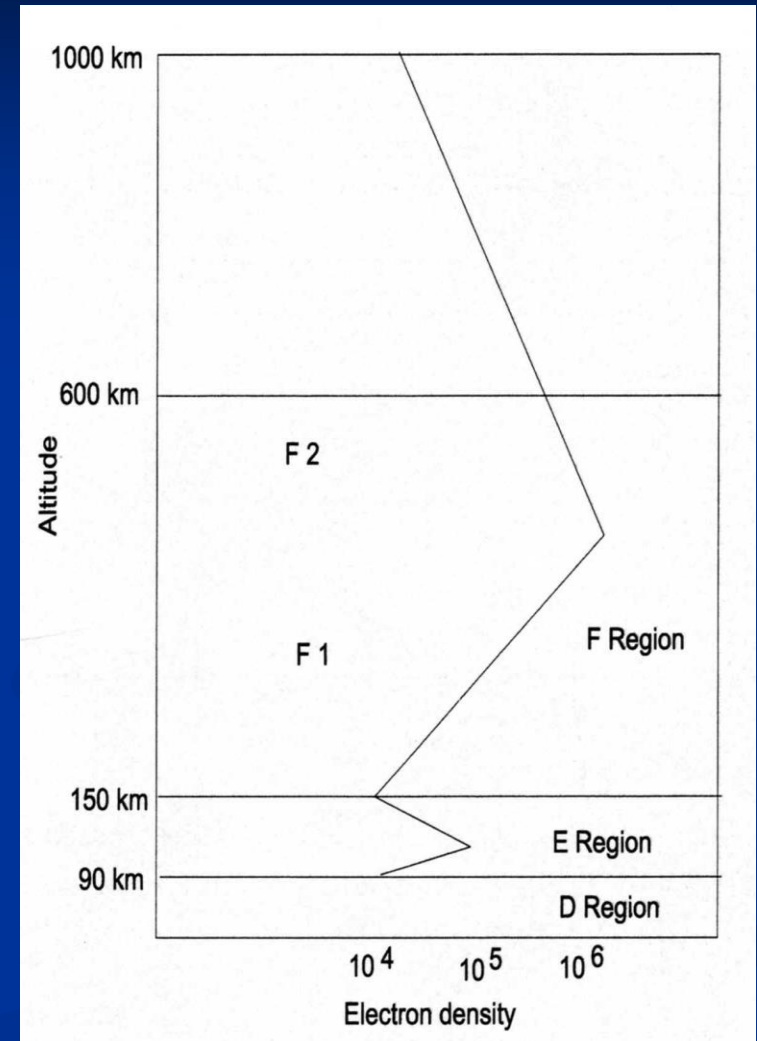
- Rôle essentiel sur la propagation des ondes radio: réflexion, absorption, réfraction
- Production d'électrons libres: (Contenu Total en Électrons (TEC))

■ 3 couches:

- Région **D** (50 à 90 km)
- Région **E** (90 à 150 km):
ions principaux: O_2^+ , NO^+ .
- Région **F**: 2 couches **F1** et **F2** (h= 400 km).
Ion principal: O^+ .
- **L'UV proche (chromosphère) contrôle principalement les couches D et E:**
propagation des ondes longues et moyennes

■ Synthèse de l'ozone stratosphérique:

- Blocage des UV A (315-400nm), B (280-315nm) et C (100-280nm):
 - Cancers de la peau
 - Vieillesse des matériaux



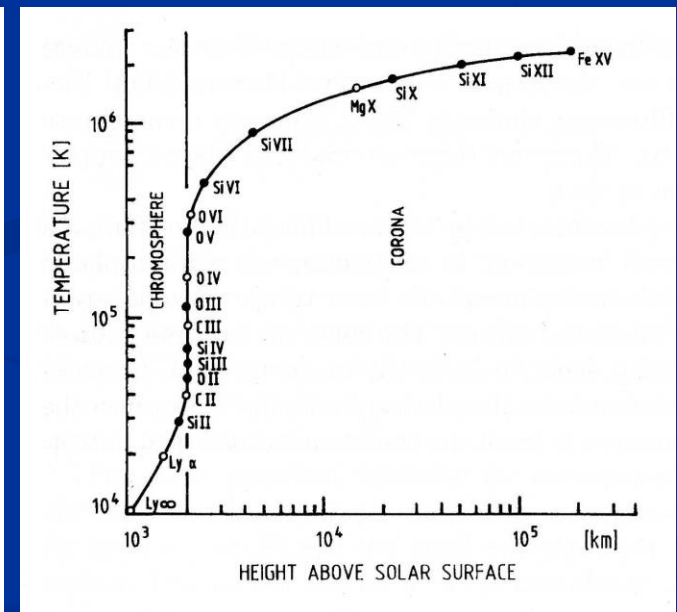
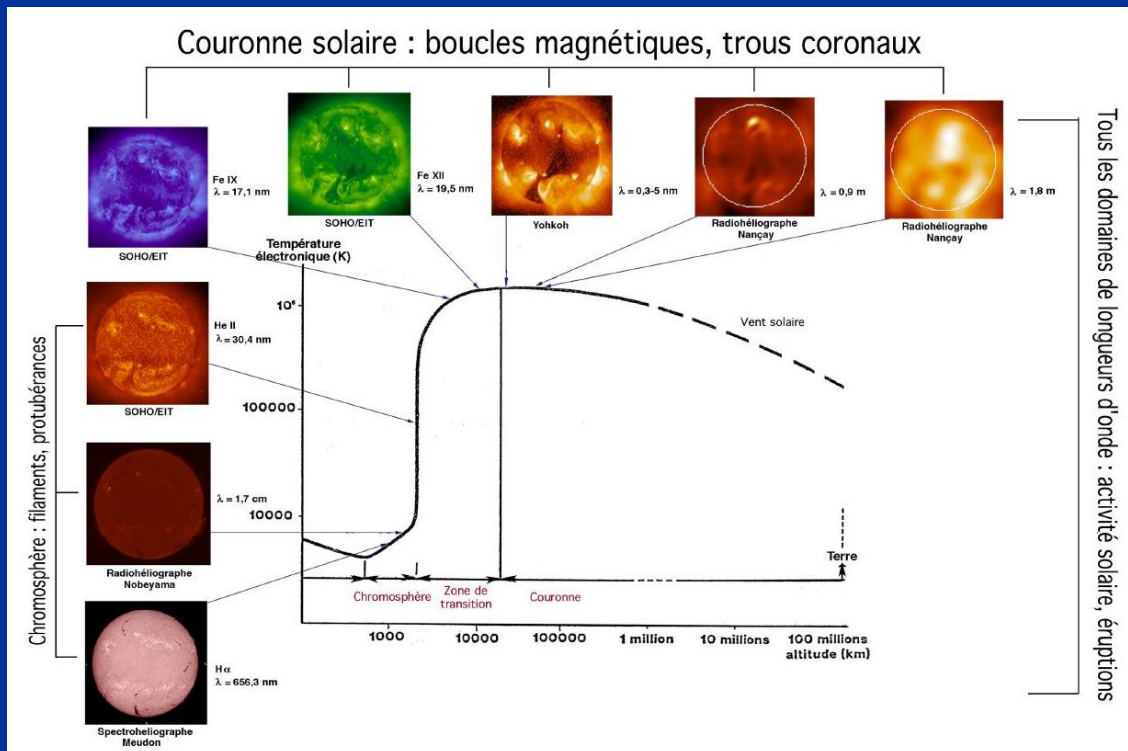
Structure de l'ionosphère

Couche de transition



La couche de transition

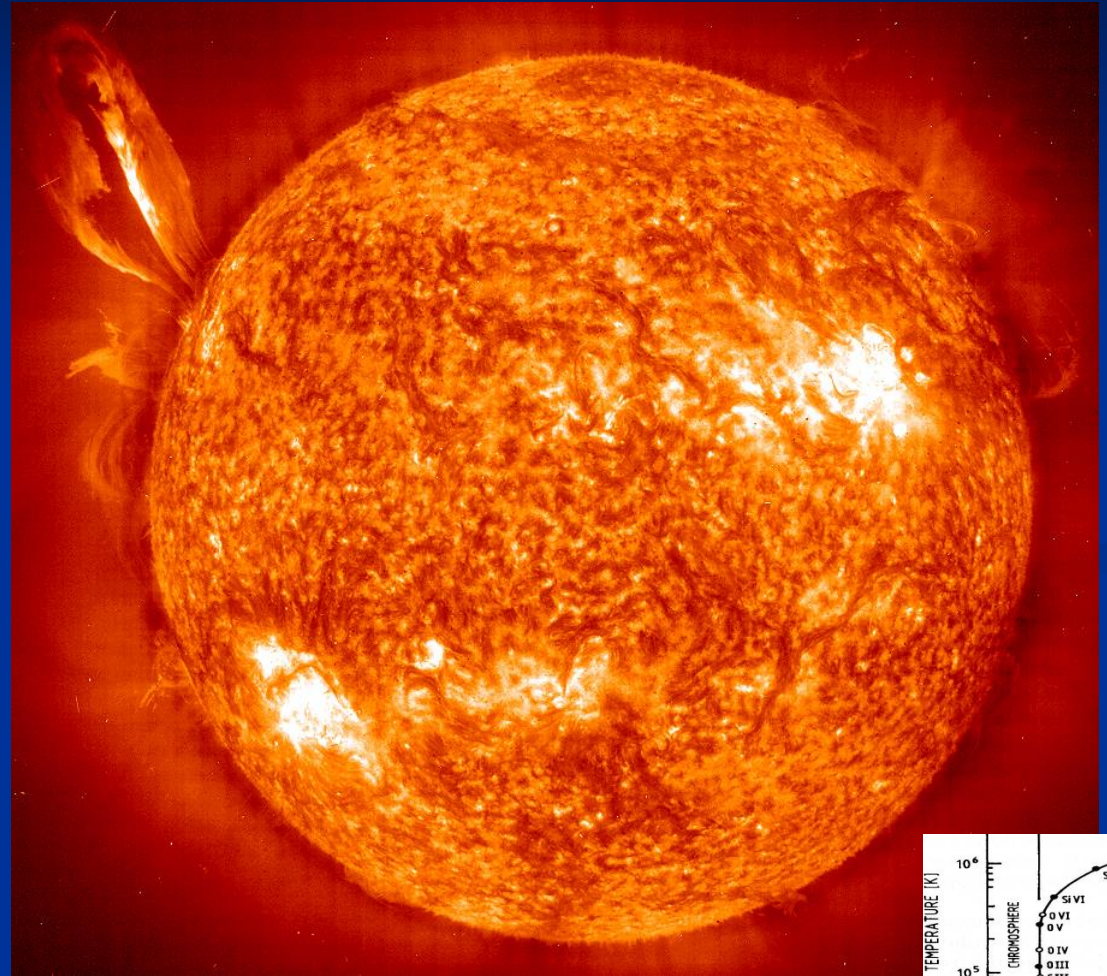
- Très mince couche: épaisseur encore mal connue mais < 100 km
- Gradient extrême en température: montée de 2×10^4 à 1×10^6 K
- Densité: 10^9 à 10^{10} atomes/cm³ (5×10^{-15} à 5×10^{-14} g/cm³)
- Transition abrupte entre les conditions physiques chromosphériques et coronales
- Transition abrupte dans l'aspect du Soleil (régions émissives)



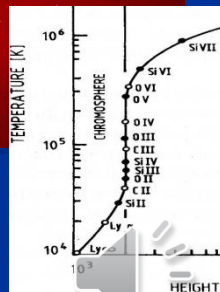
Profil de température et raies d'émission typiques de la TP

Couche de transition: structures

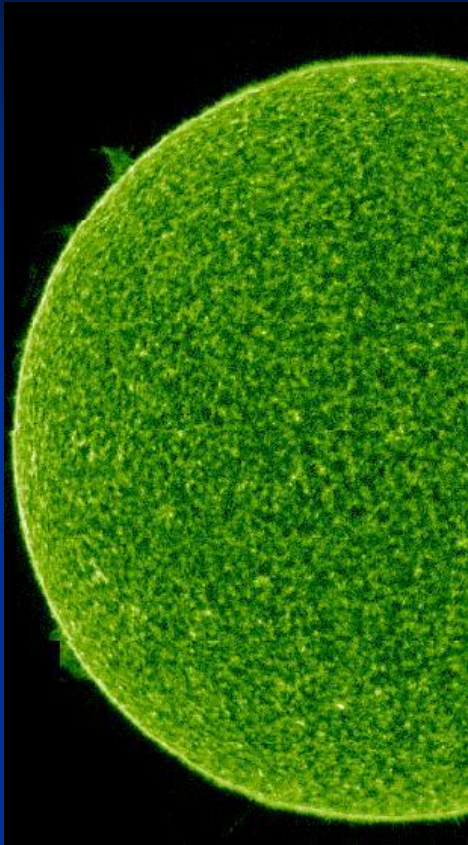
- Émission essentiellement dans l'UV lointain ($30 < \lambda < 120$ nm):
 - Raies d'émission d'atomes fortement ionisés (2 à 6 e^-)
- Pour T croissant, passage de structures de type chromosphériques:
 - Réseau chromosphérique, spicules, plage, protubérances
- vers des structures coronales:
 - Condensations coronales, trous coronaux, boucles



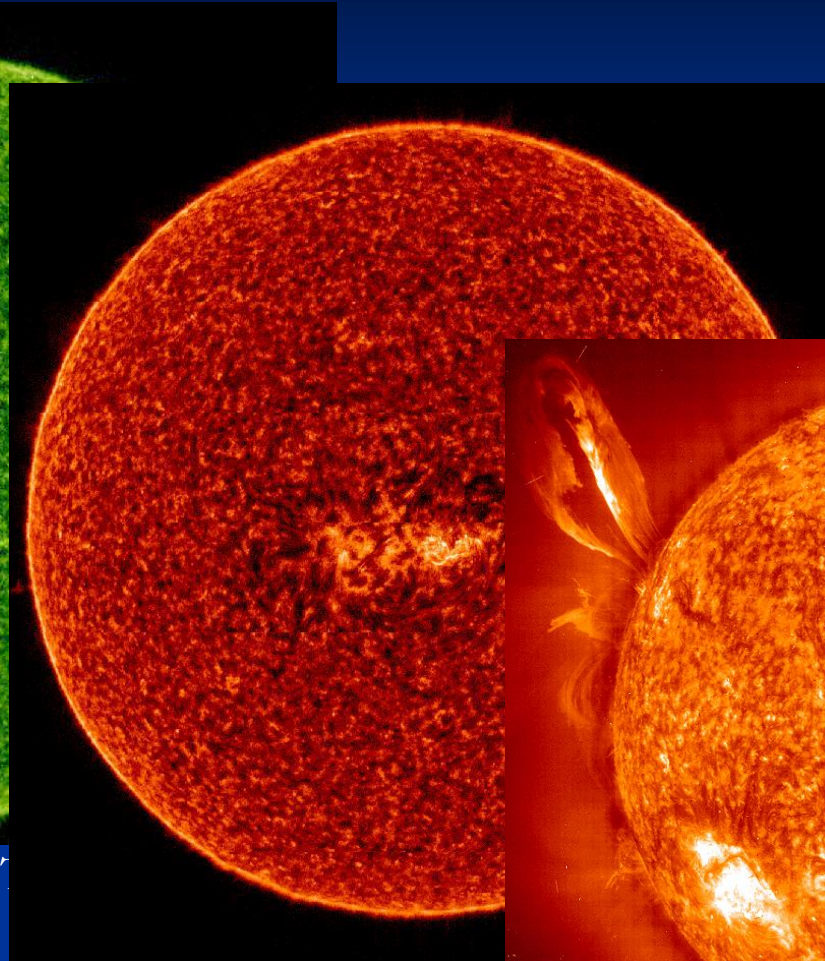
SOHO/EIT, HeII, 30,4 nm
 $T = 8 \times 10^5$ K



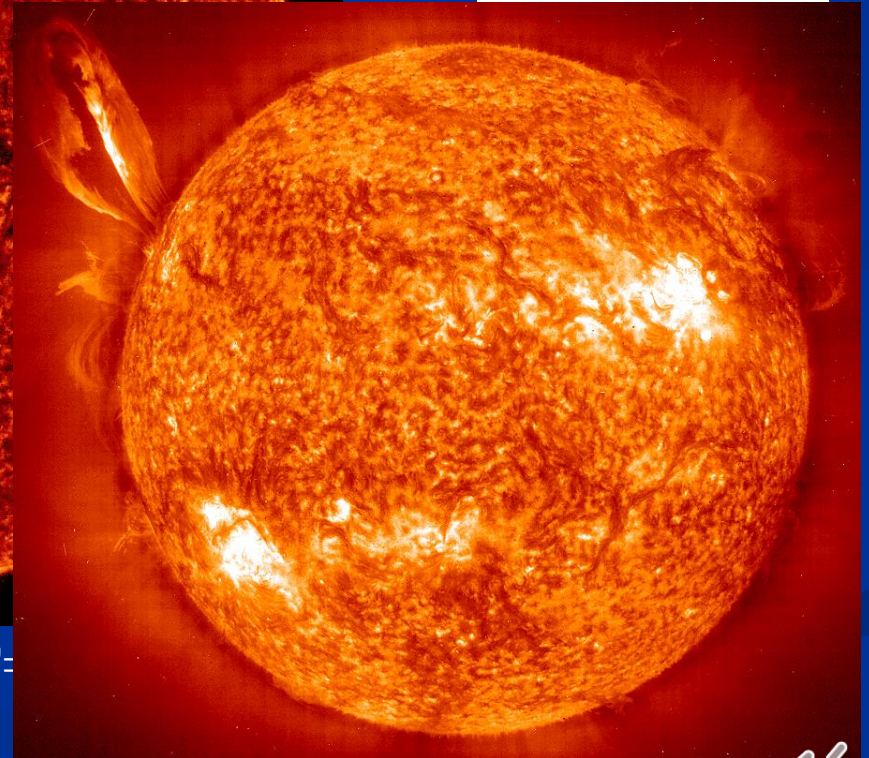
Couche de transition: structures / température



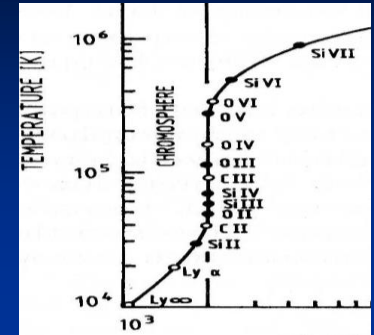
SOHO/SUMER, CIV, 780 nm



SOHO/SUMER, SIV, 673 nm

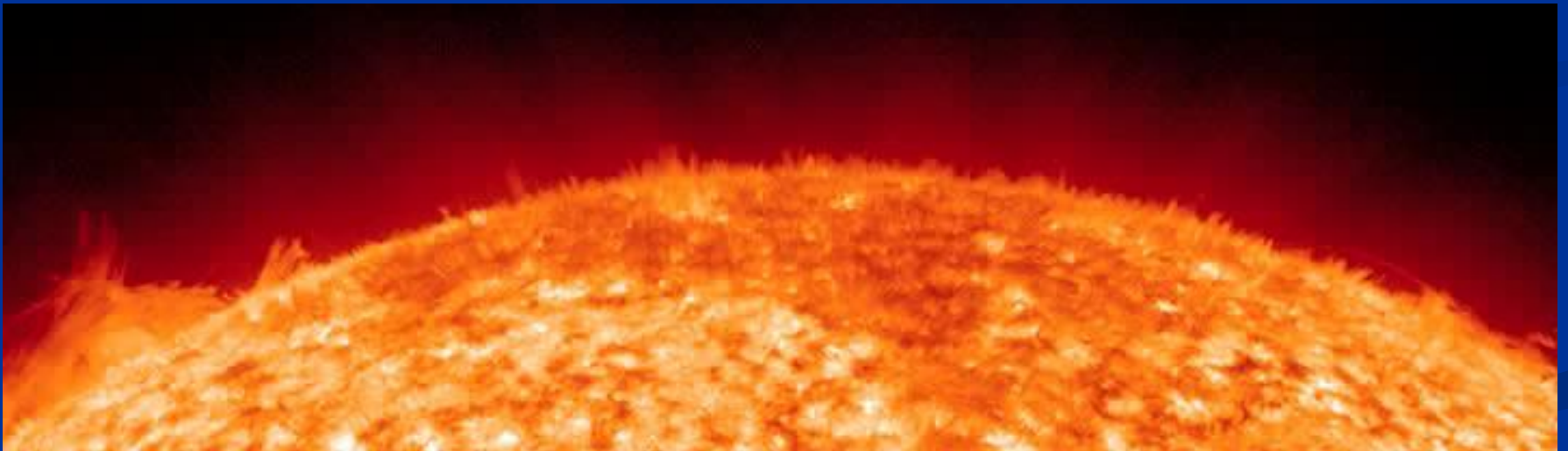


SOHO/EIT, HeII, 30.4 nm, $T = 8 \times 10^4$ K



Couche de transition: macrospicules

- Spicules allongées dans les régions polaires, les macrospicules:
 - Hauteur: 20000 km (spicules: 5000 km)
- Ancrées dans les trous coronaux polaires (régions de champ magnétique ouvert)



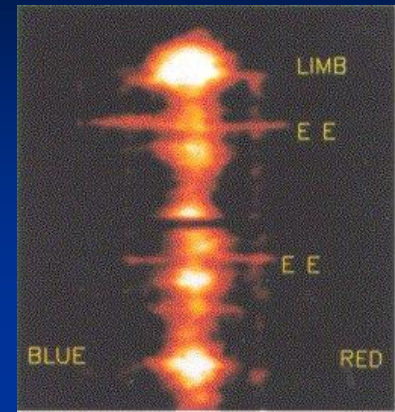
SDO-AIA, HeII, 30,4nm, 3/8/2011

Dynamique globale à petite échelle

■ Evénements explosifs: détection par fort élargissement Doppler

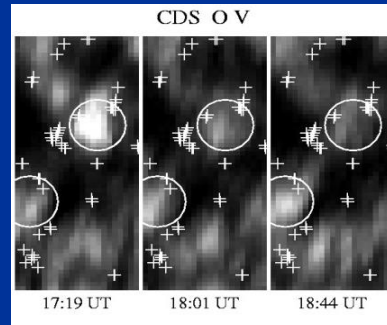
- Vitesse max. = 110 km/s en moy.
- Dimension: 2000 km
- Durée: 60 s
- Fréquence: 300 à 600/s sur tout le soleil

*Brueckner & Bartoe 1983,
Chae et al. 2000,
Dere et al. 1984, 1989, 1991,
Innes et al. 1997*



■ "Blinkers": sursauts localisés de l'intensité sur toute la surface du Soleil calme

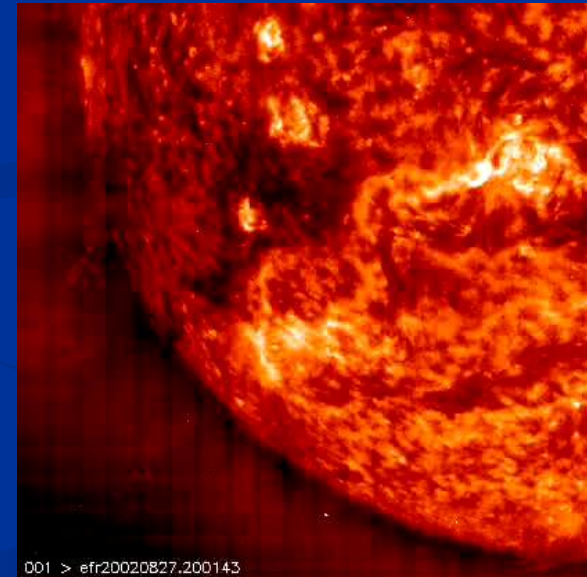
- Amplitude maximum dans le réseau chromosphérique: 15%
- Durée: < 30 min (moy. 10 min)
- Surface: 100 Mm²
- Fréquence: 40 /s sur tout le Soleil



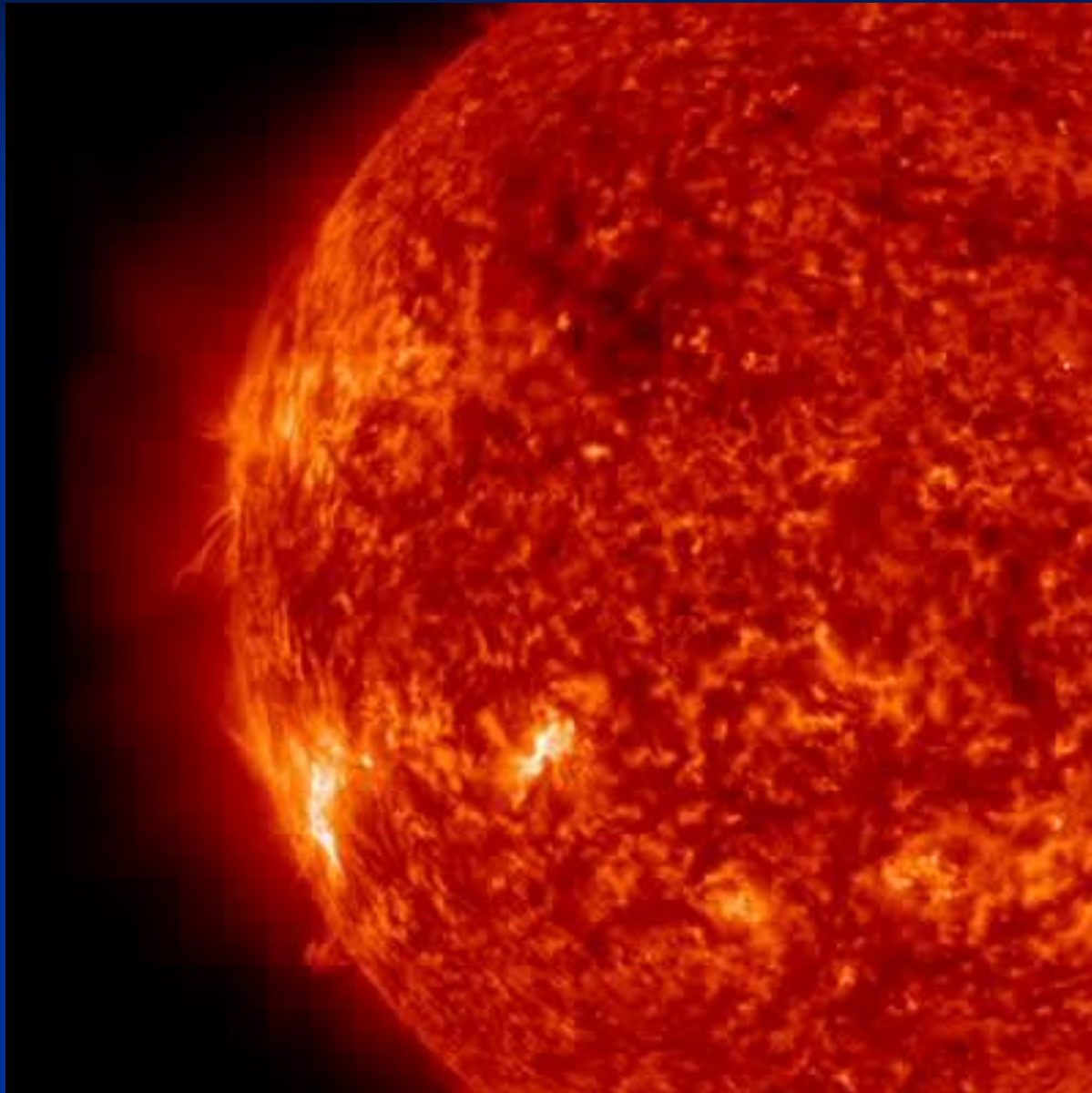
➔ Injection de plasma chromosphérique échauffé ("évaporation")

- Source d'échauffement provenant de la couronne?

*Vernazza, 1975, Porter, 1987,
Harisson 1997, 1999, Berghmans & Clette 1998,
Brkovic et al. 2001, Bewsher et al. 2002*



Couche de transition: dynamique globale

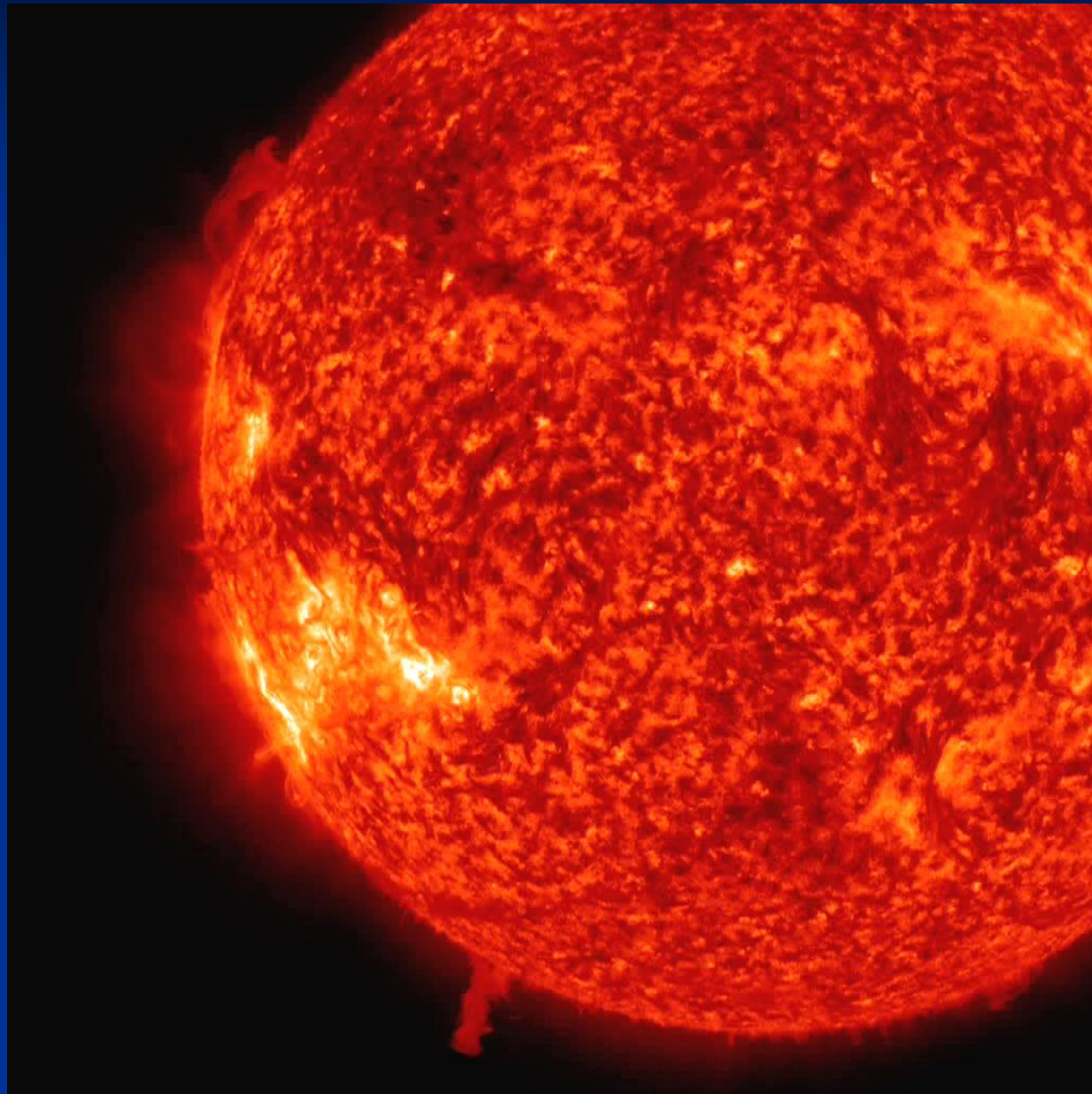


SDO-AIA
HeII, 30,4nm
11/11/2013



52

Couche de transition: dynamique globale



SDO-AIA
HeII, 30,4nm
16/6/2013



53

Transition magnétique

- C'est dans la haute chromosphère et la couche de transition, que se produit une transition dans le rapport entre la pression magnétique dans les tubes de flux et la pression mécanique du gaz.

- Coefficient β du plasma:
$$\beta = \frac{p}{(B^2/2\mu_0)}$$

- Photosphère et chromosphère: $\beta \gg 1$
 - Champ confiné dans des tubes de flux étroits dans l'espace intergranulaire
 - Champ figé dans le plasma: la convection turbulente agite le champ.
- Couche de transition et couronne: $\beta \ll 1$
 - Le champ se déploie pour emplir tout le volume disponible
 - Plasma figé dans le champ magnétique et entraîné par ses mouvements.

Prochaine Étape: La Couronne Solaire

Royal Observatory of Belgium - SIDC
ludicrous lucky imaging
H-alpha 2017-04-02T07:20:40

