

Le soleil, notre étoile



Frédéric Paletou

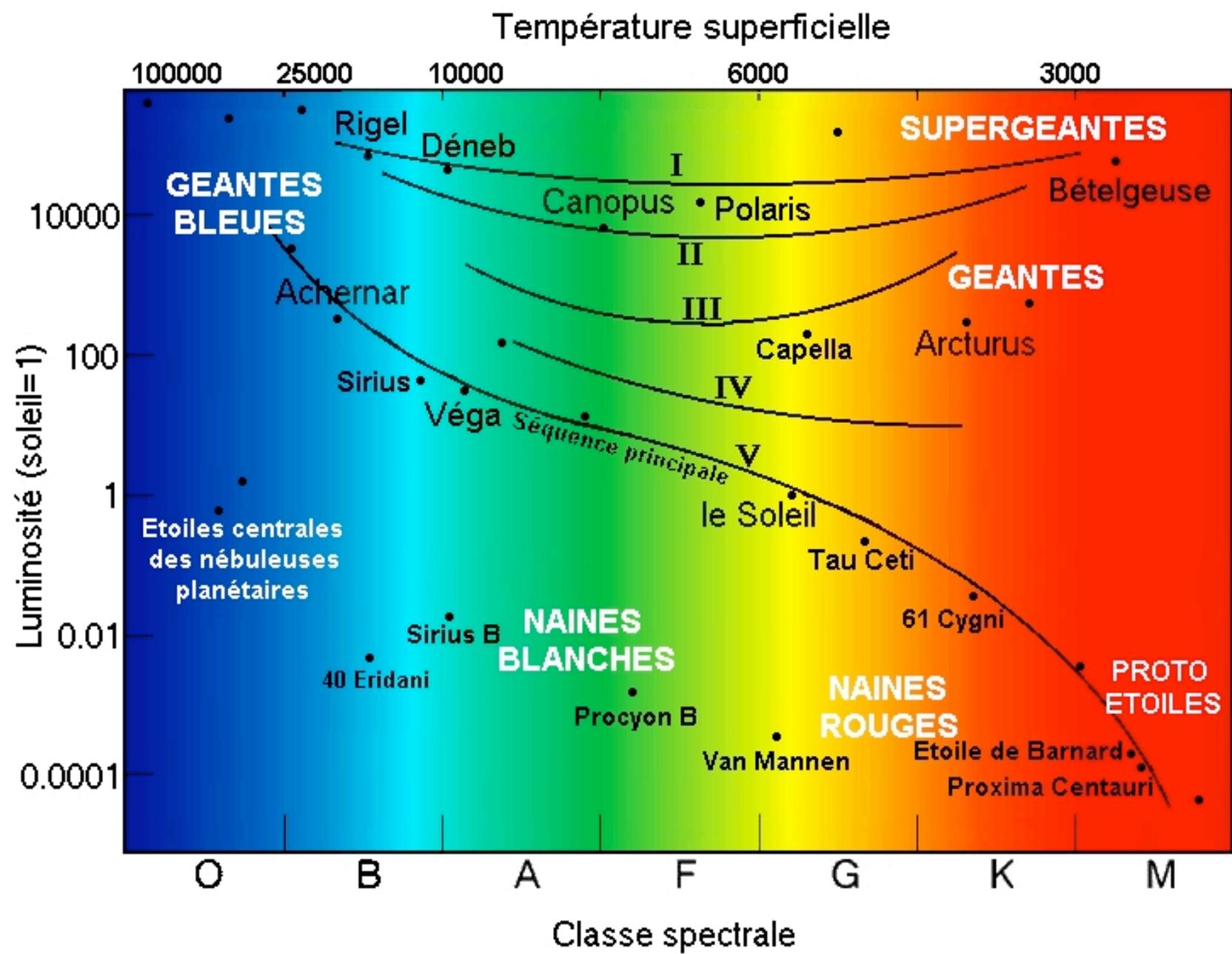
Université de Toulouse, Observatoire Midi-Pyrénées
Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse & Tarbes

www.ast.obs-mip.fr

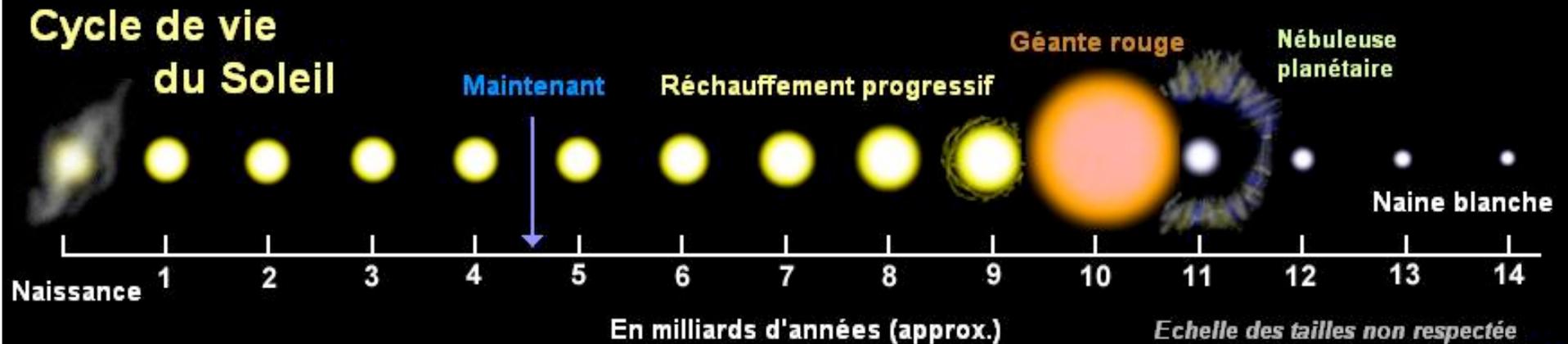
- ⊙ **Généralités (distance, taille etc.)**
- ⊙ **L'intérieur et l'héliosismologie**
- ⊙ **Les couches externes**
- ⊙ **Rotation, activité et magnétisme**
- ⊙ **Les relations soleil - terre**

Généralités sur le soleil

- ⊙ C'est une **étoile** ! Certes un peu spéciale car elle s'observe de jour...
- ⊙ Situé à ~ **150 millions de km** de la terre (soit 1 « unité astronomique »)
- ⊙ Il faudra ~ **8 mn** à la lumière qui s'échappe de sa surface pour nous atteindre
- ⊙ Son rayon est de ~ **700 000 km**
- ⊙ C'est une étoile plutôt naine, dans son age adulte (soit ~ **4 milliards d'années**), tournant lentement sur elle-même (2 km/s, 1 révolution en ~ **26 jours**)



Évolution



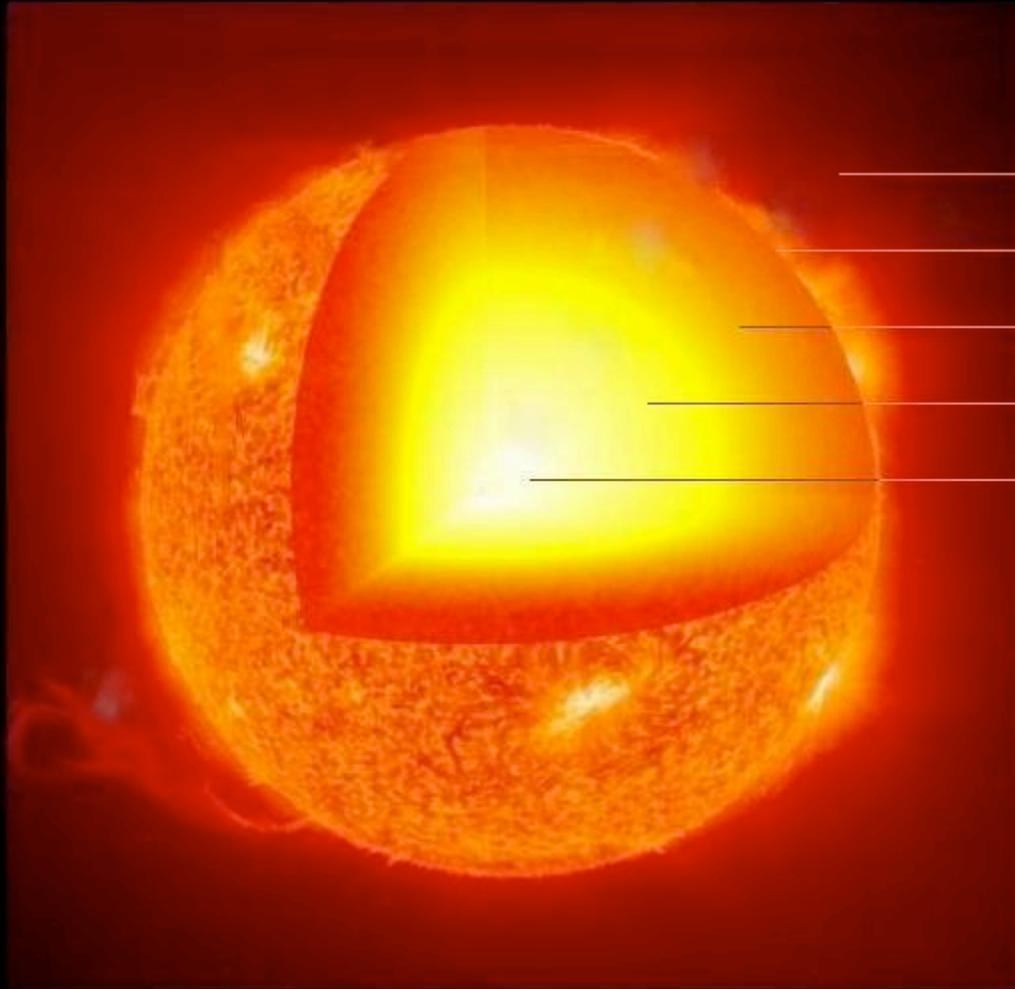
- ⊙ Le soleil deviendra une géante rouge
- ⊙ puis, une nébuleuse planétaire se formera
- ⊙ avec une naine blanche en son centre





Université
de Toulouse

I. L'intérieur du Soleil



Structure du Soleil en coupe

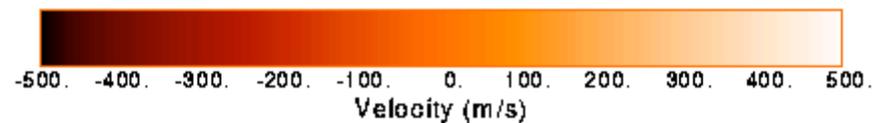
- Couronne solaire
- Photosphère
- Zone de convection
- Zone de radiation
- Cœur (ou noyau)

Pendant près de 40 ans, on a parlé du problème de flux des neutrinos solaires...

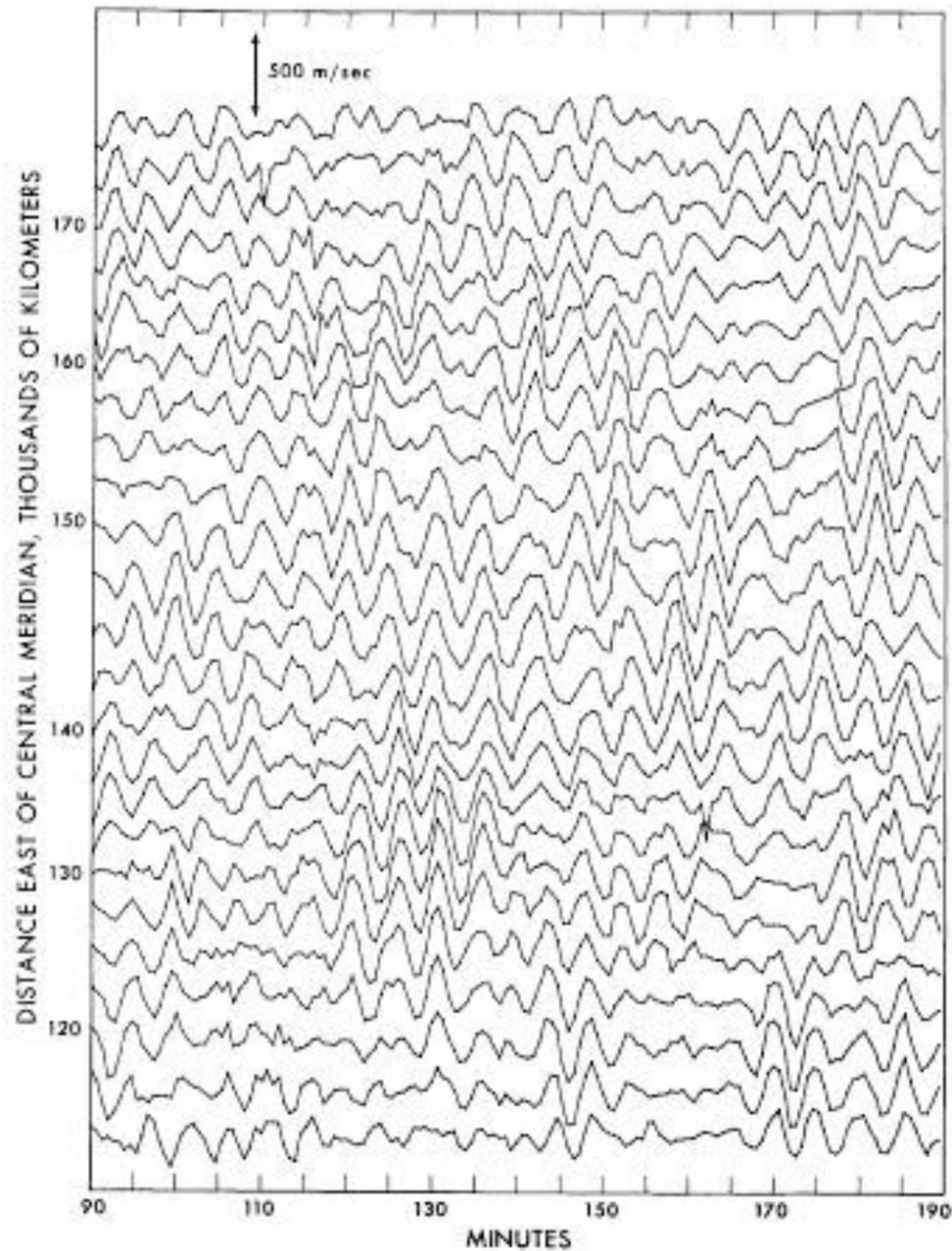
<http://www.sns.ias.edu/~jnb/>

*En 2001, l'observatoire SNO (Sudbury, Canada) a levé le mystère et confirmé l'hypothèse de l'oscillation des neutrinos. Le modèle standard **solaire** était bien robuste !*

Oscillations



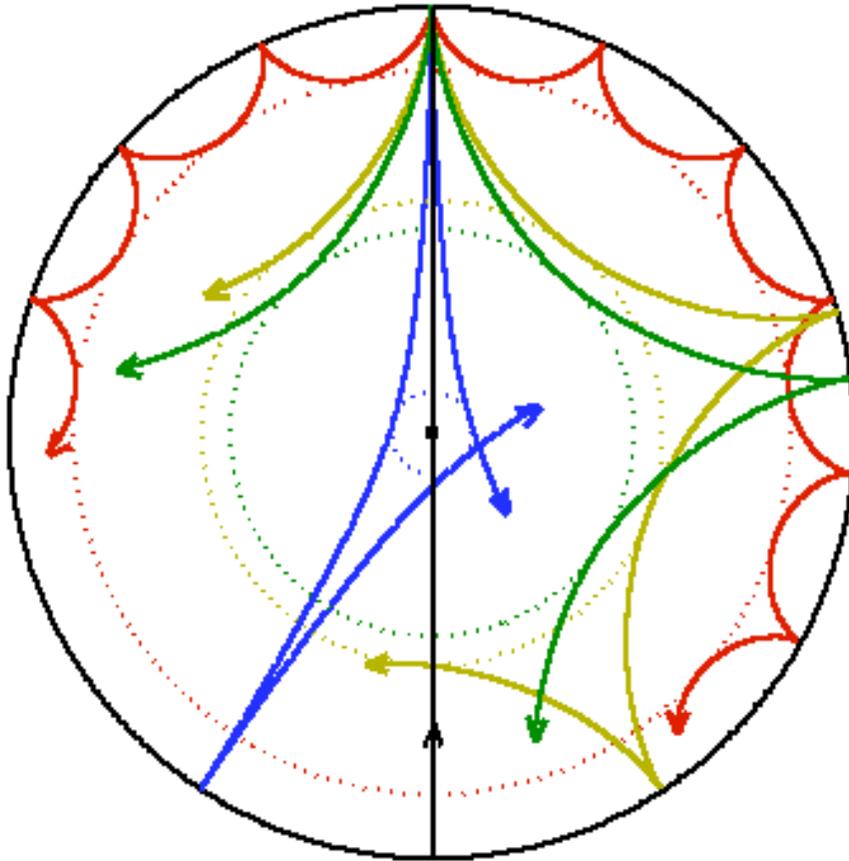
- ⊙ Leighton et al. (1962) mettent en évidence les **oscillations** à 5 mn à partir de **dopplergrammes** issus, par exemple, d'images du soleil entier



Oscillations à 5 mn

Howard et al. (1968)

Ondes acoustiques



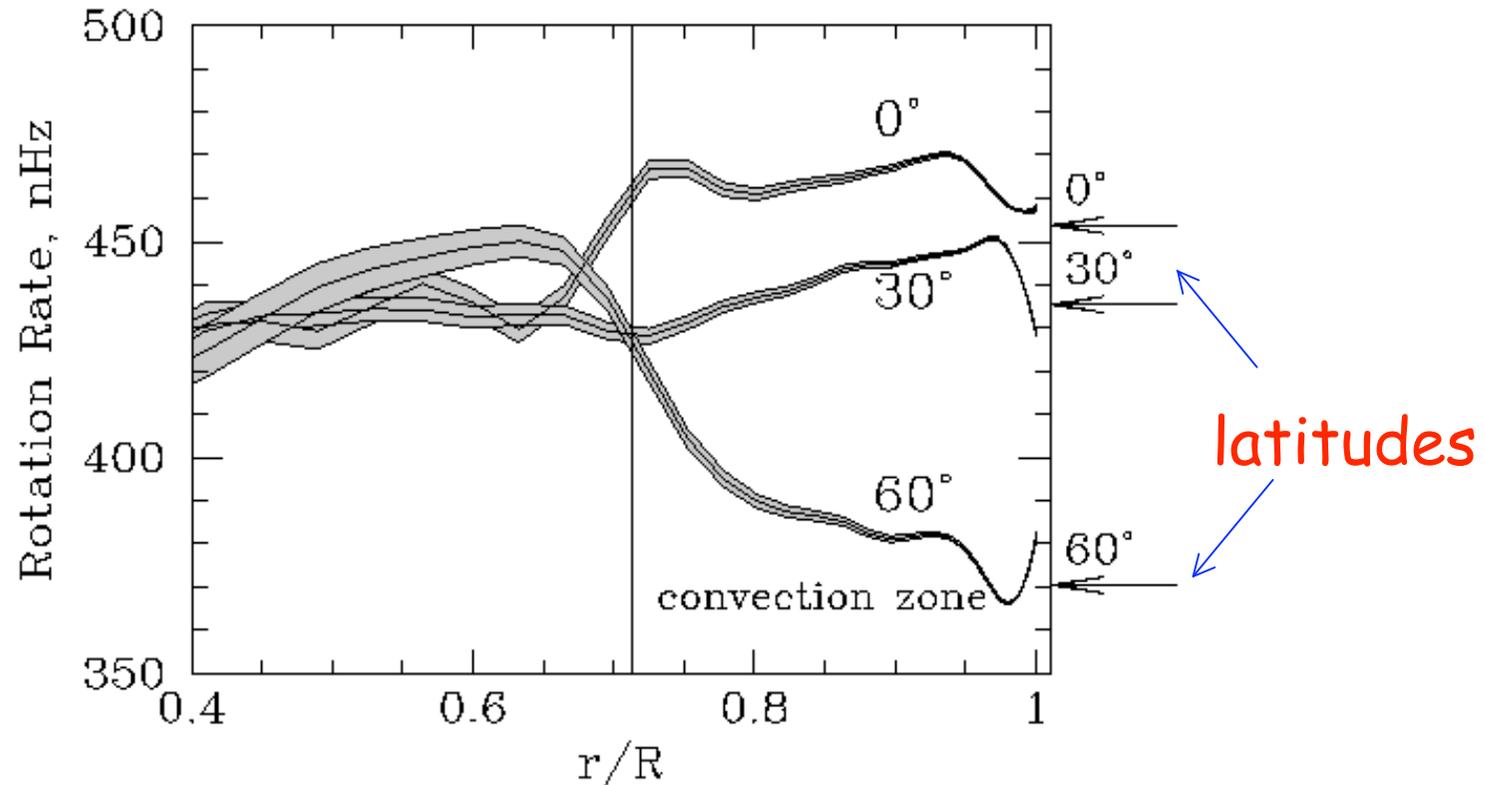
modes $l = 75, 25, 20, 2$

- ⊙ La propagation d'**ondes acoustiques** dans les couches internes est responsable de ces oscillations de surface
- ⊙ La réfraction de ces ondes est due à la **variation de la vitesse du son** (qui augmente avec la profondeur)
- ⊙ En fonction de la **fréquence** de ces ondes, elle vont se propager **plus ou moins profondément** dans le soleil



Université
de Toulouse

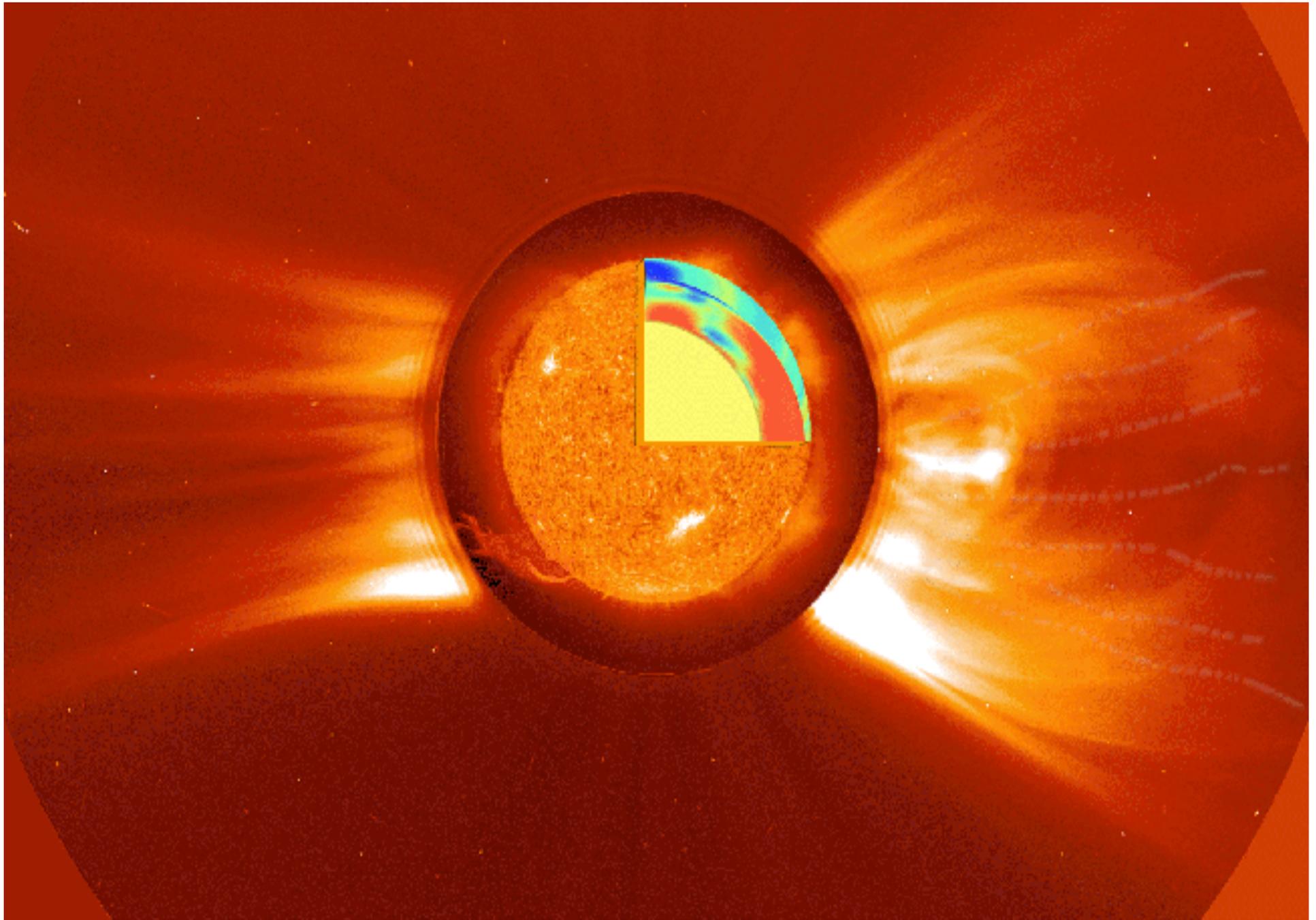
Rotation interne



- ⊙ Transition à la base de la zone convective : **tachocline**
- ⊙ Lieu de la génération du **champ magnétique** ?

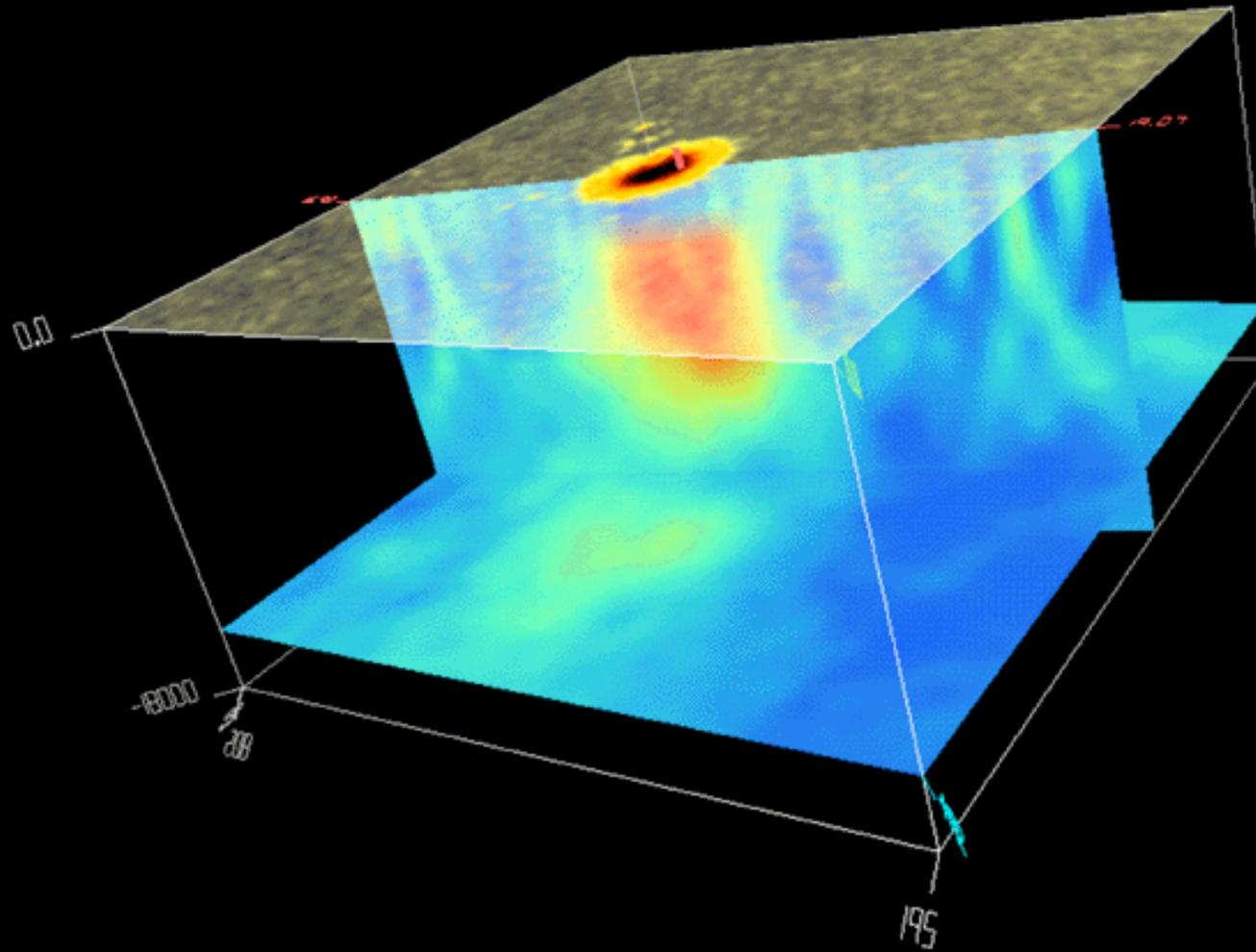
L'observatoire solaire SoHO

- ⊙ Lancé en décembre 1995, début des opérations 96 ; sur une orbite autour du « **point de Lagrange** » L1 situé à 1/100 d'u.a. observation solaire continue depuis !
- ⊙ Une batterie d'instruments : **imageurs, spectros, coros, compteurs de particules**
- ⊙ **Héliosismologie** : GOLF, MDI (+ cartes de B)
- ⊙ **Couches externes** : EIT (imageur UV-EUV), SUMER et CDS (spectros UV-EUV), LASCO et UVCS (coros)
- ⊙ Les données sont **publiques** !



© *SoHO a joint ESA/NASA mission* sohowww.nascom.nasa.gov

Héliosismologie locale



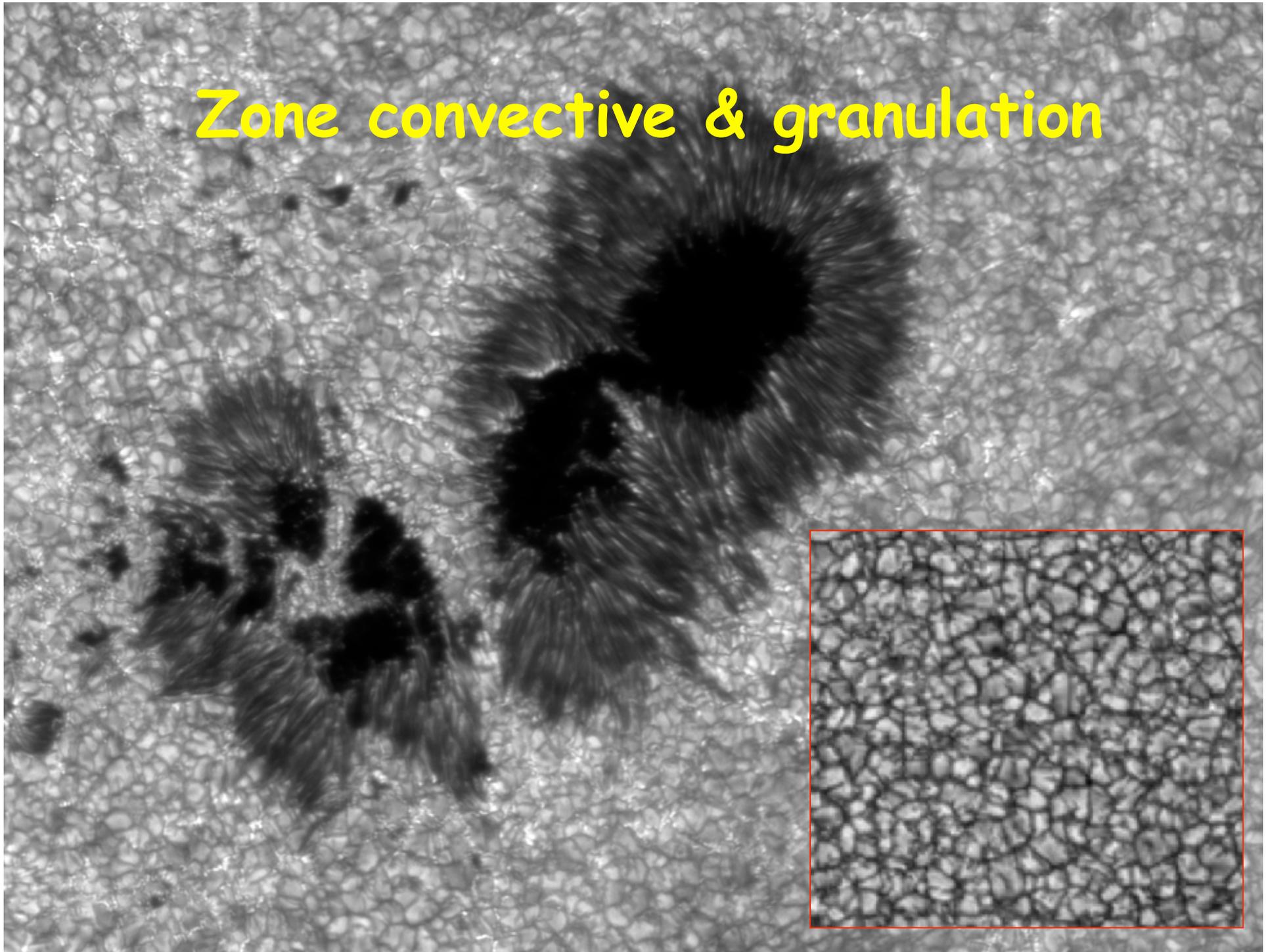
Plus de détails sur la structure interne des étoiles et leur sismologie avec Jérôme Ballot demain...



Université
de Toulouse

II. L'atmosphère solaire

Zone convective & granulation



Les traces de la convection



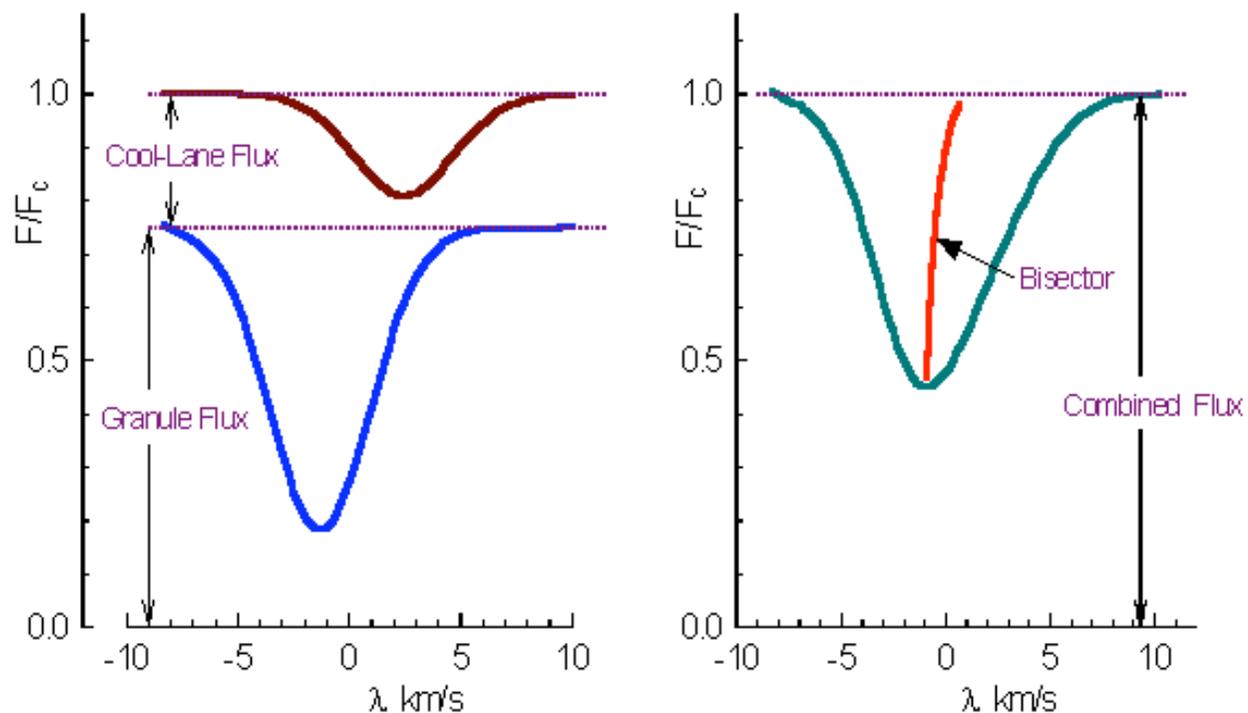
Why granulation (convection) on the star's surface produces asymmetrical spectral lines.

Left: the hot material (granule) is rising, giving a blueward Doppler shift to its spectrum.

The cool material (cool lane) is falling, giving a redward Doppler shift to its spectrum.

More light comes from the hot rising material. The sum of these is what we see as the star's spectrum.

Right: the sum from the left produces asymmetrical spectral lines, and the bisector is bent as shown.



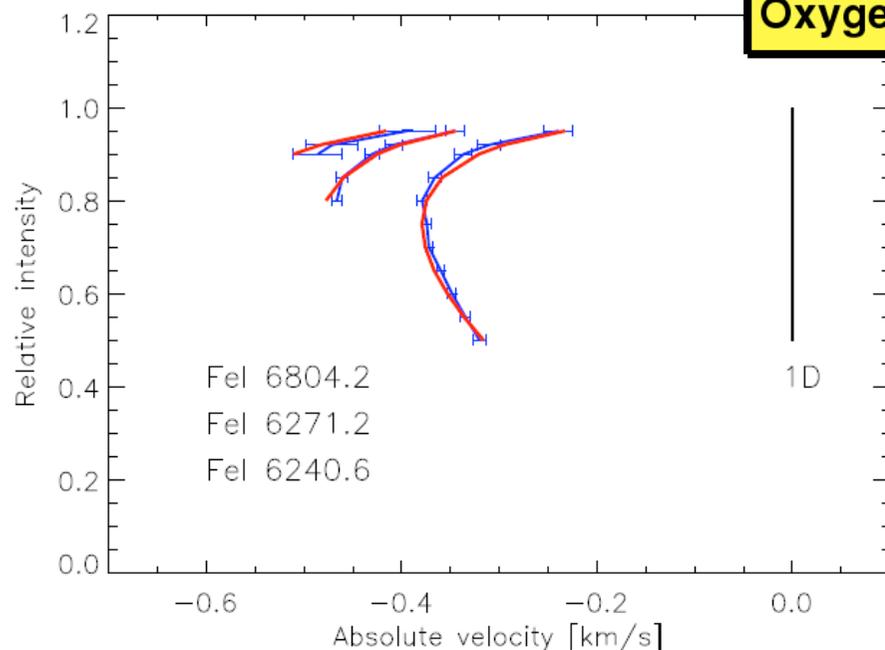
© D.F. Gray

Photosphères stellaires

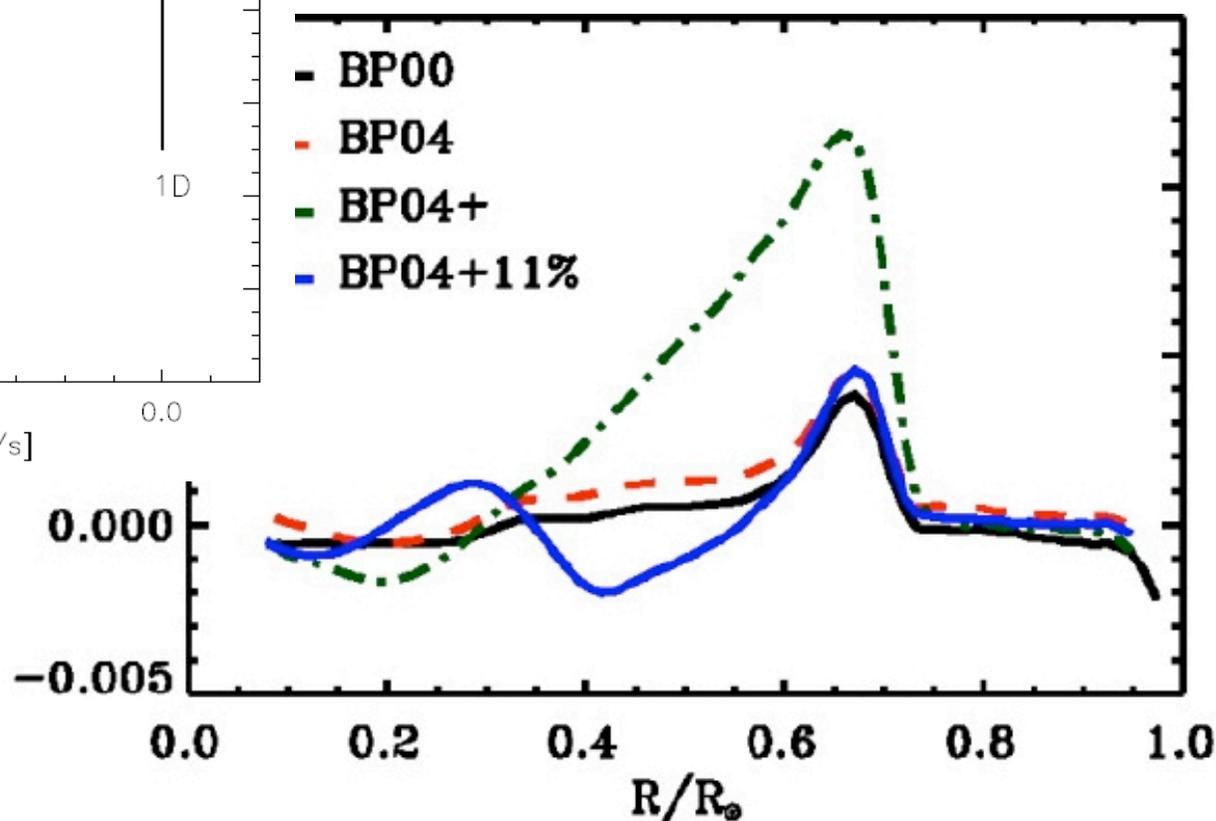
- ⊙ Les modèles « classiques » ne prennent **pas** en compte : les **inhomogénéités de surface** (taches, etc... et donc, implicitement, le **champ magnétique**), le **transport convectif** (sauf de façon ad hoc via la « longueur de mélange »), de façon plus générale la **dynamique** de l'atmosphère (ondes, chocs etc.).
- ⊙ Les premiers modèles **couplant** (magnéto)hydrodynamique et transfert de rayonnement en géométrie **3D** sont apparus dans les années 80.
- ⊙ Ces efforts théorico-numériques ont conduit récemment à bouleverser la question de **l'abondance solaire** des éléments (*Asplund et al. 2000+*)

Les nouvelles abondances

Element	Anders & Grevesse (1989)	3D	Difference
Carbon	8.56+/-0.06	8.39+/-0.05	-0.17 dex
Nitrogen	8.05+/-0.04	7.80+/-0.05	-0.25 dex
Oxygen	8.93+/-0.03	8.66+/-0.05	-0.27 dex



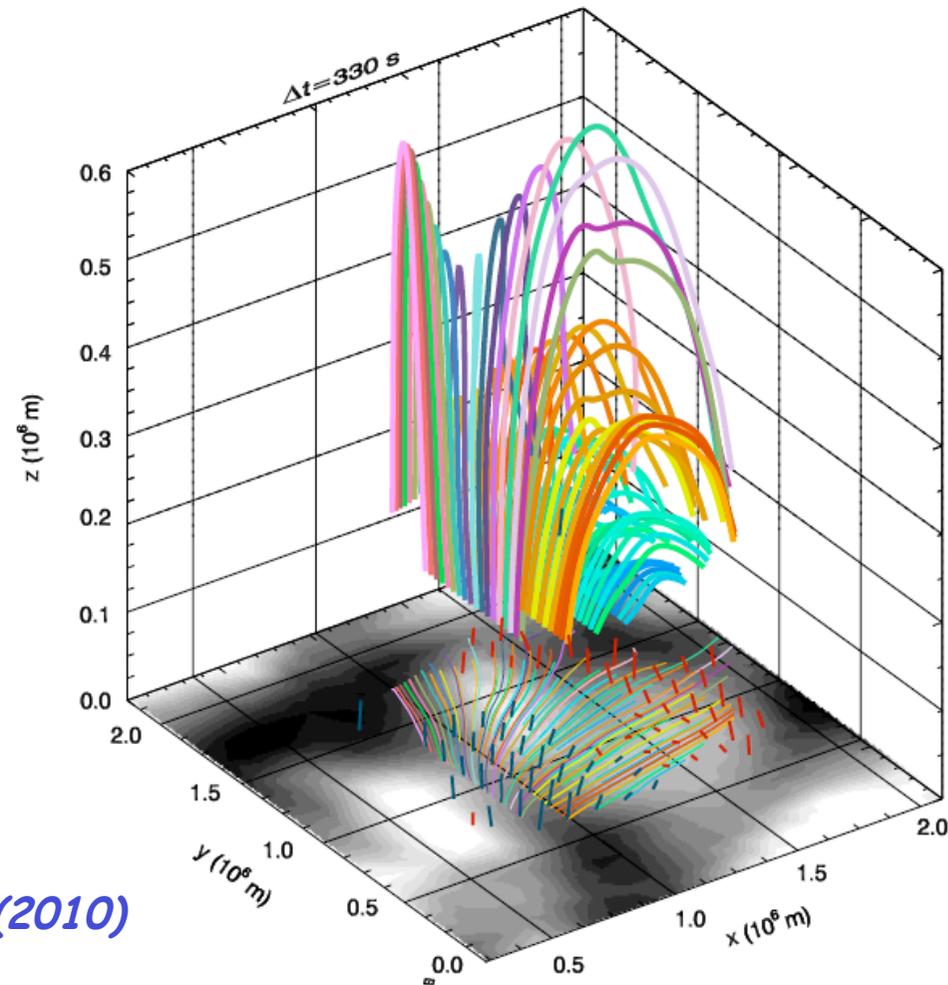
Nouveau profil de la vitesse du son dans les couches internes



Une grande question

- ⊙ Les **taches solaires** sont le siège de champs magnétiques « forts » ($B \sim 1 \text{ kG}$; $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$)
- ⊙ Or ces taches n'occupent qu'une toute petite partie (**$\sim 1\%$**) de la surface solaire...
- ⊙ **Quelle est la nature du magnétisme (faible $\sim 10 \text{ G}$) du reste de la surface solaire ?**
- ⊙ Un champ de distributions d'inclinaison/azimut isotropes, mais de **quelle origine ?**
- ⊙ La question reste **ouverte** malgré des décennies de polarimétrie de plus en plus fine, sur des instruments au sol (e.g., THÉMIS) ou bien spatiaux (e.g. HINODE)

Topologie de B sur un granule ?



Martínez González et al. (2010)

Figure 2. Three-dimensional topology of the magnetic field over a granule. Continuum image at the bottom shows granular (bright) and intergranular (dark) regions. Short lines indicate magnetic field orientation (blue for the footpoint with positive, emergent polarity; red for the negative footpoint), derived from inversion at the points with high enough spectropolarimetric signal. Representative field lines (tangent to these director vectors) are calculated starting at the height of formation of the Fe I 630 nm lines at one footpoint and followed until they reach the same height at the other end. Both footpoints happen to be connected. The projection of field lines on the solar surface appears as colored lines on the bottom plane, showing azimuth spreading over nearly 90° . From low-lying bluish lines to high-lying ones the magnetic field fills most of the volume from the photosphere to the low chromosphere. The colors of field lines have been used for ease of eye.



Université
de Toulouse

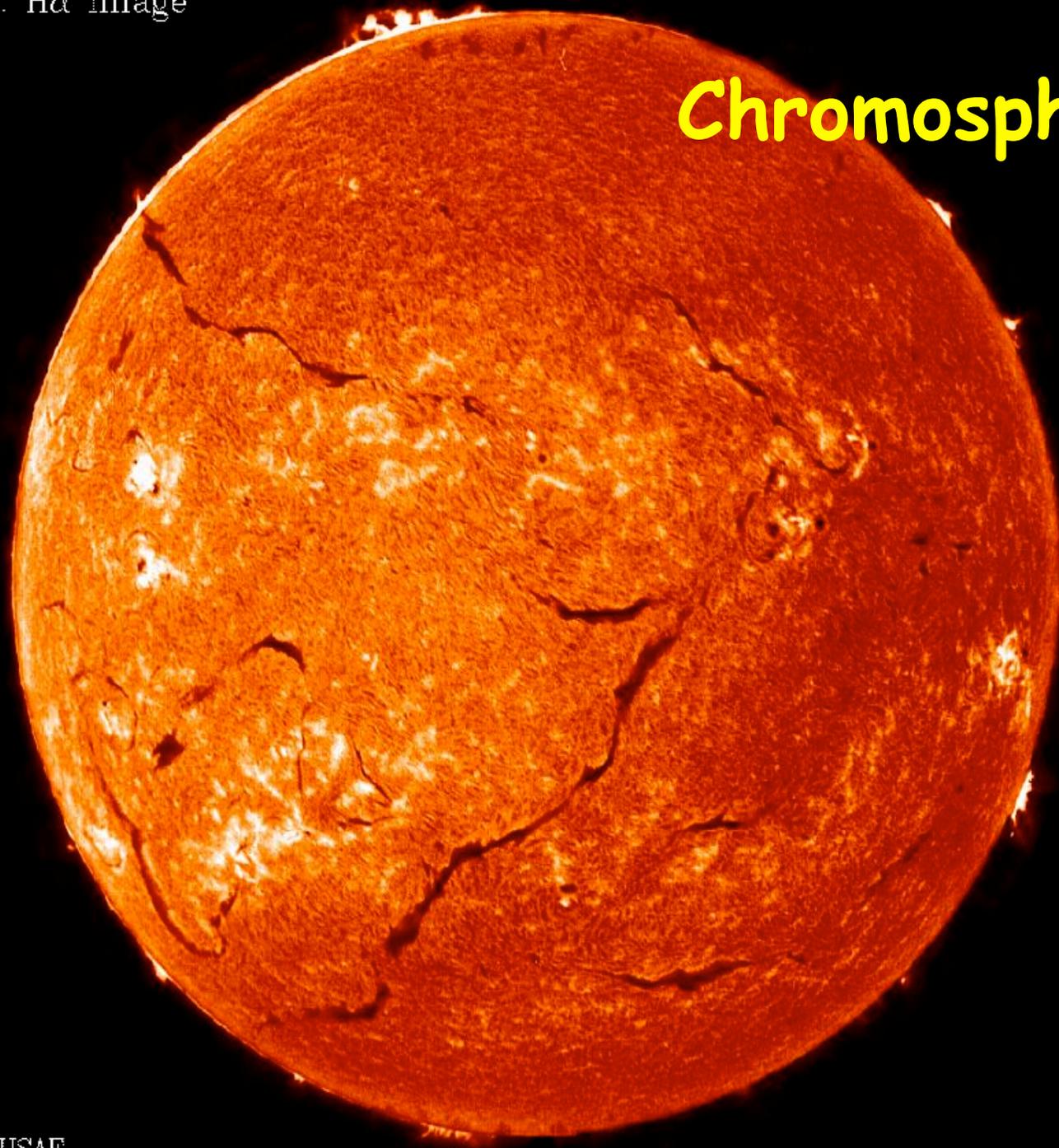
Fin de...



Suite →

11 August 1980: H α image

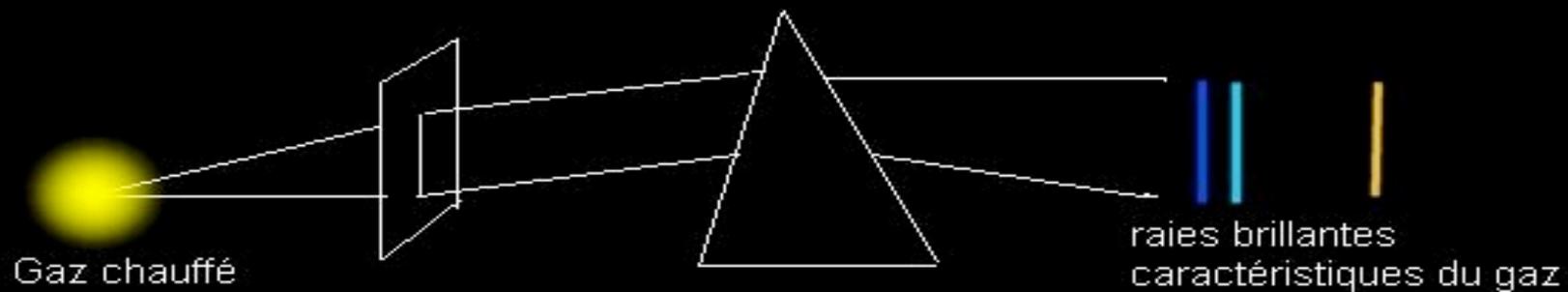
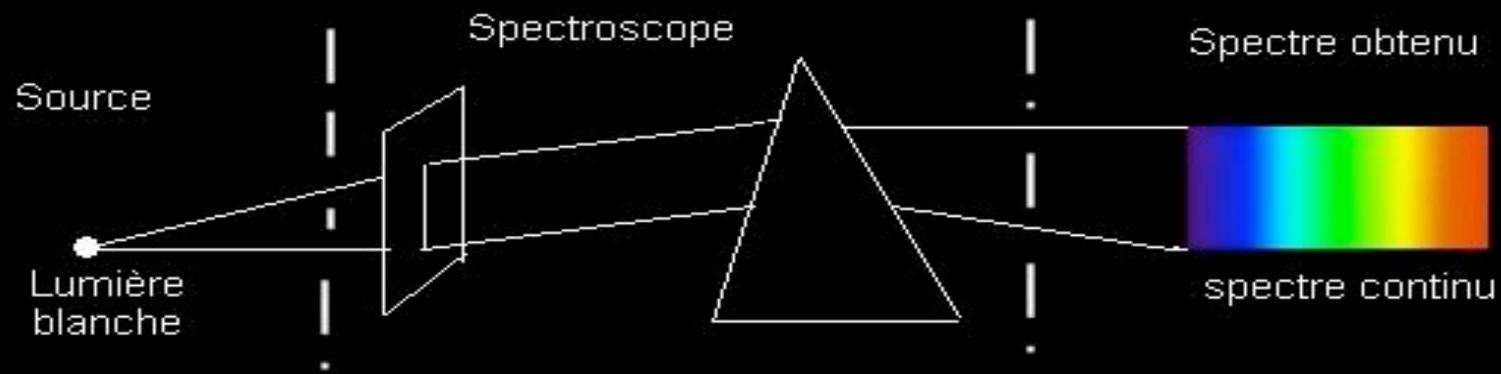
Chromosphère



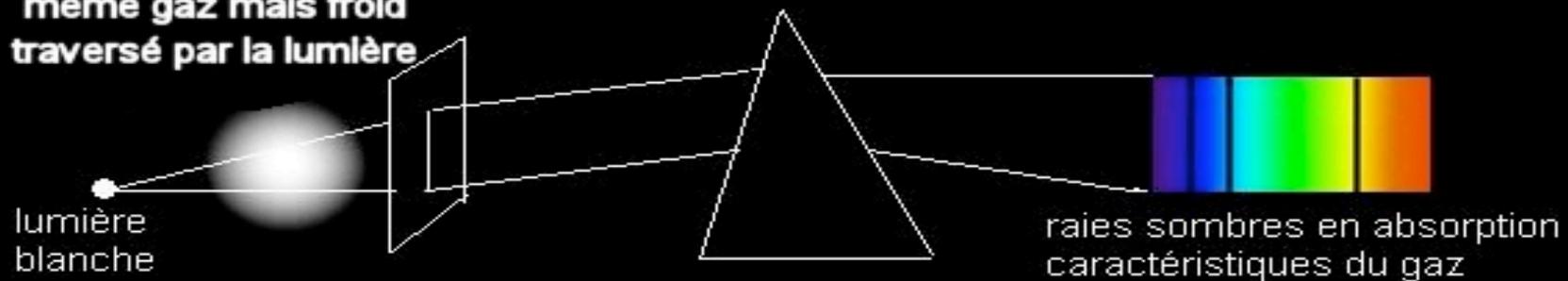
Source: NOAA/SEL/USAF

HA0 A-005

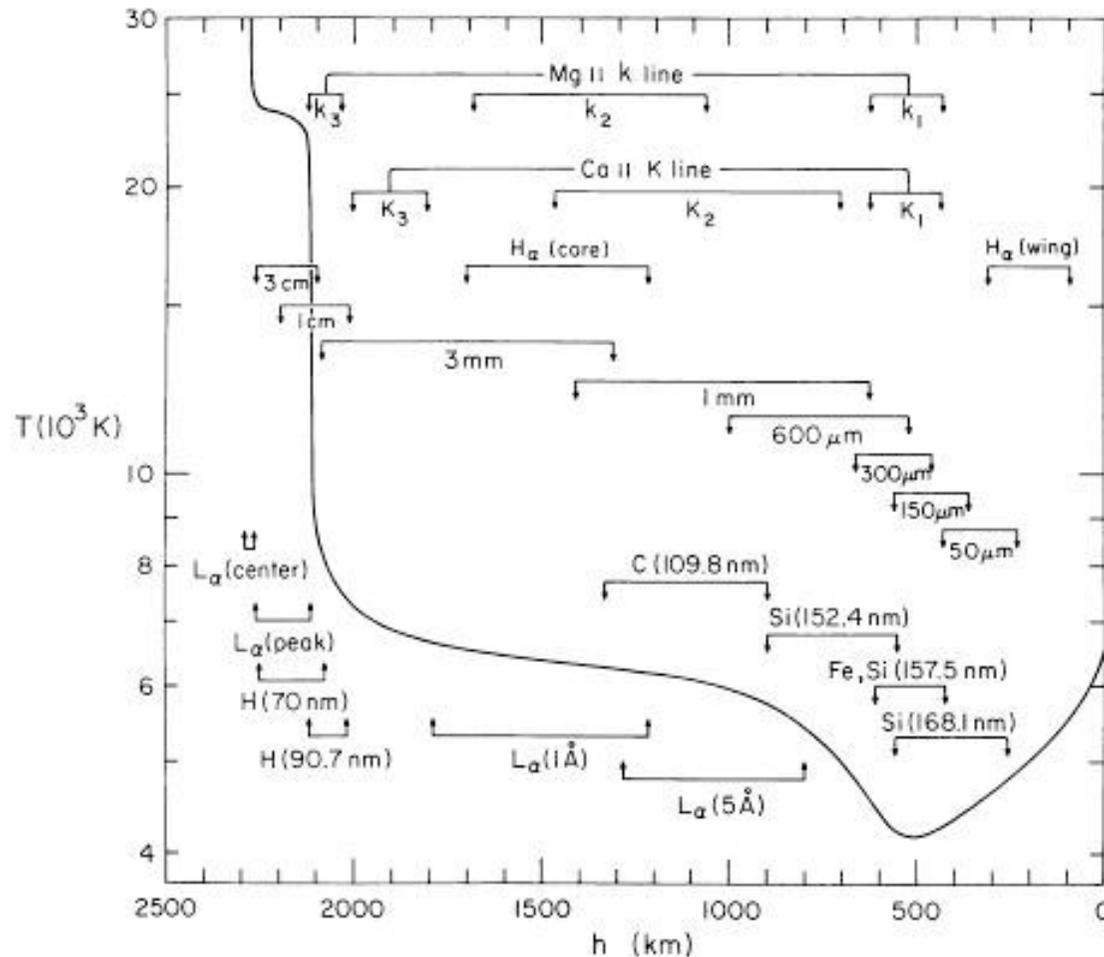
Lois de Kirchhoff-Bunsen



**même gaz mais froid
traversé par la lumière**



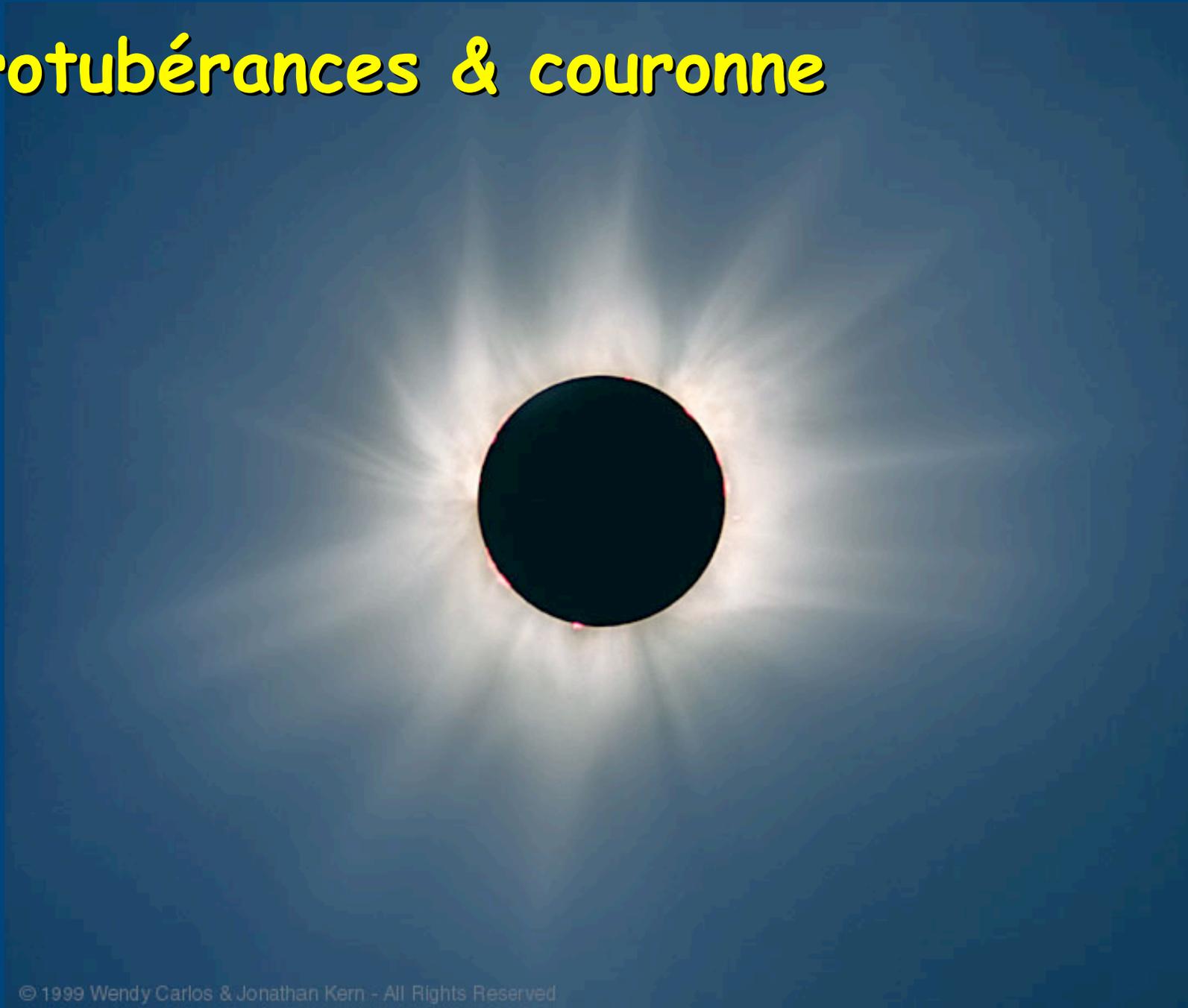
Couches externes



- Profil de **température** de la « surface » à la base de la couronne
- L'étude des **raies spectrales**, avec une bonne résolution et une bonne couverture spectrale, permet le **diagnostic « en profondeur »** des couches externes du soleil

Vernazza, Avrett & Loeser (1981)

Protubérances & couronne

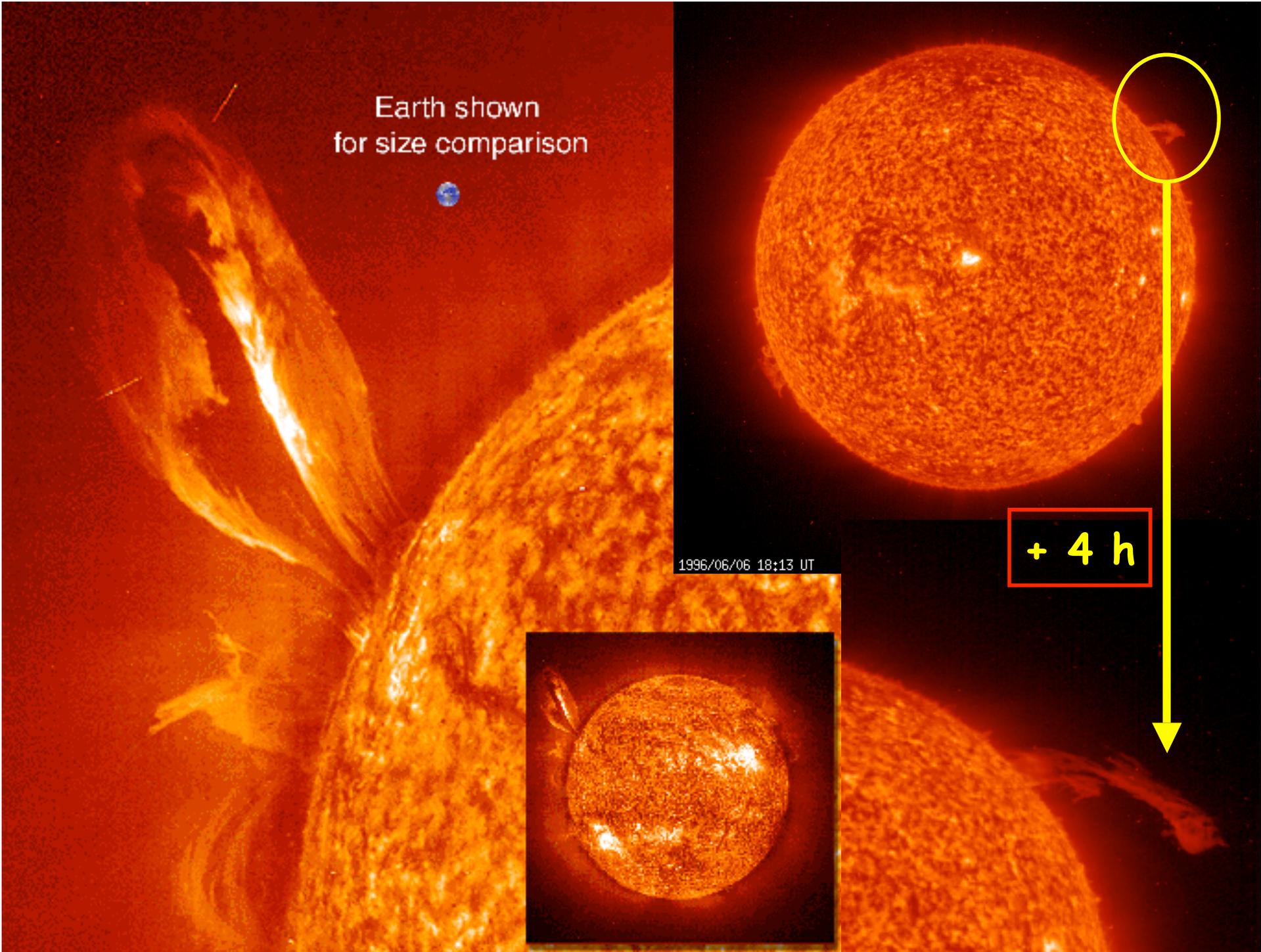
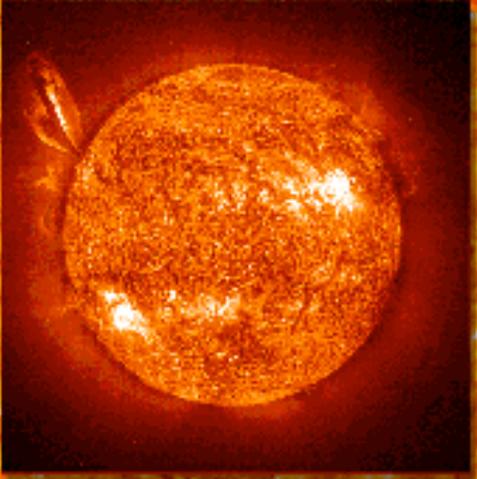


Earth shown
for size comparison

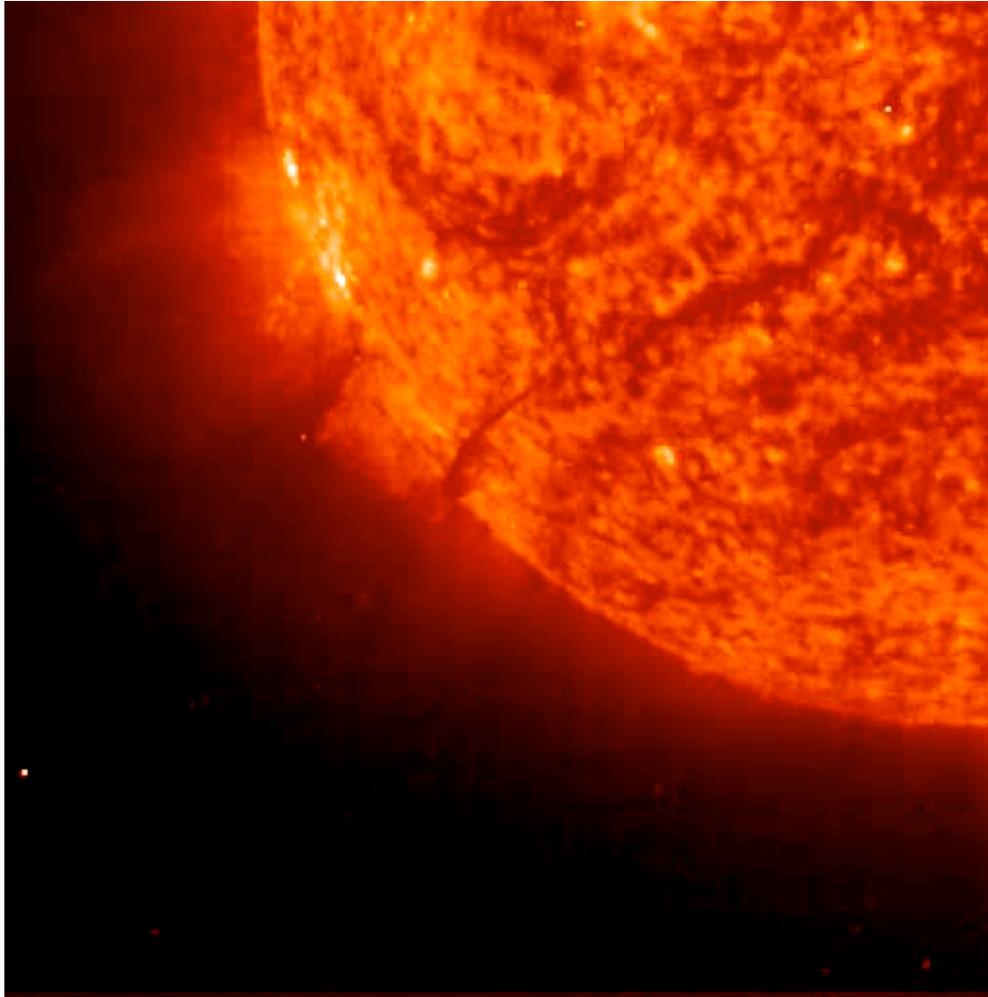


1996/06/06 18:13 UT

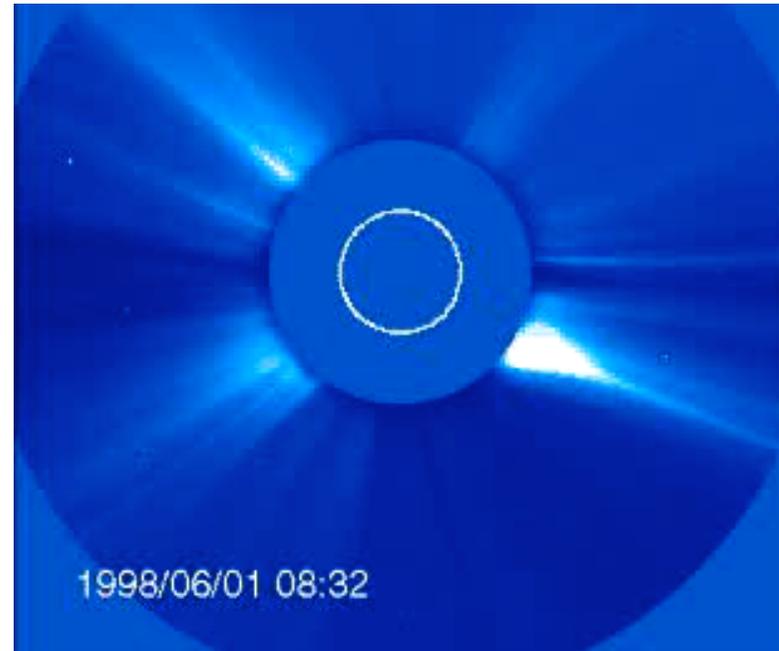
+ 4 h



Protubérances éruptives & CMEs

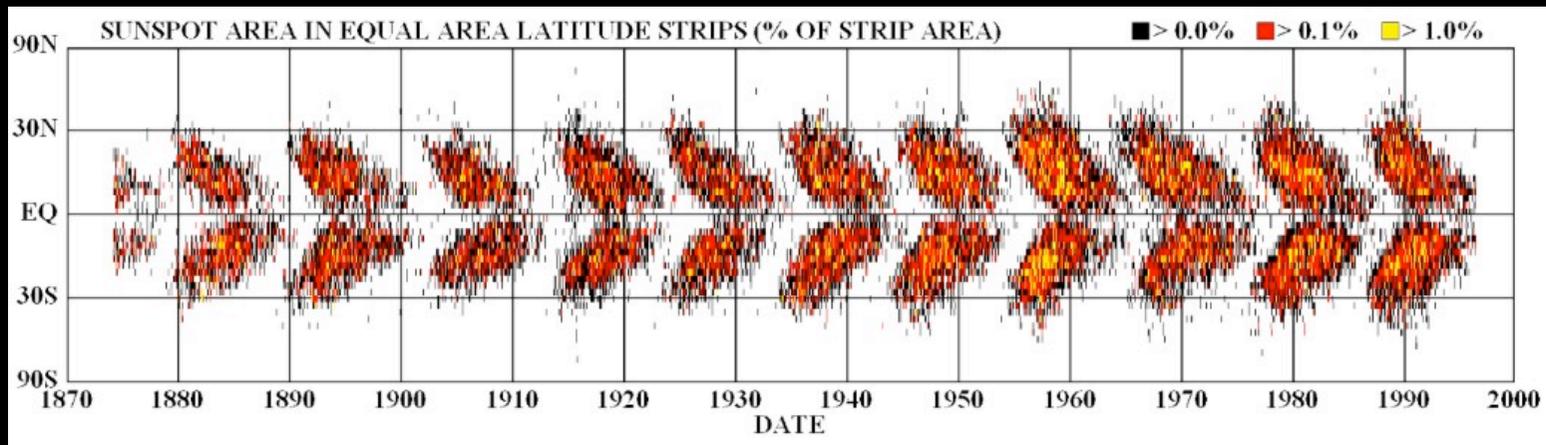
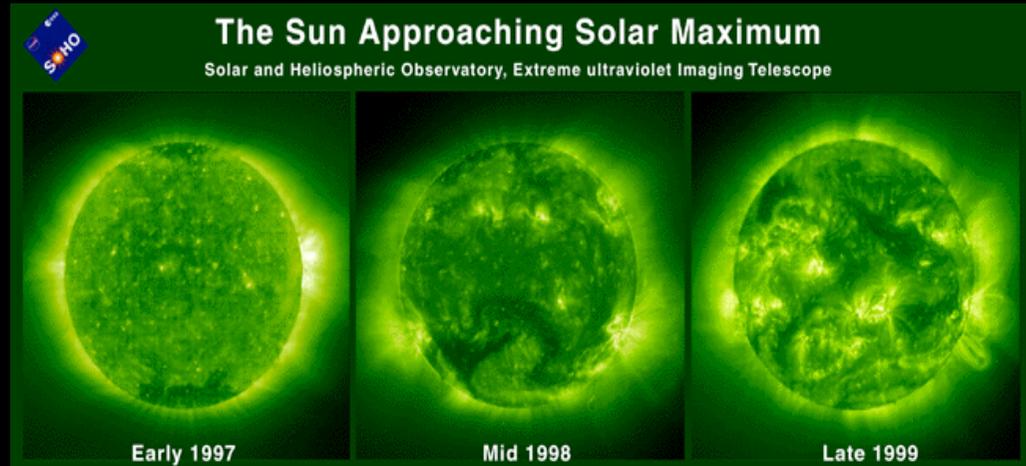
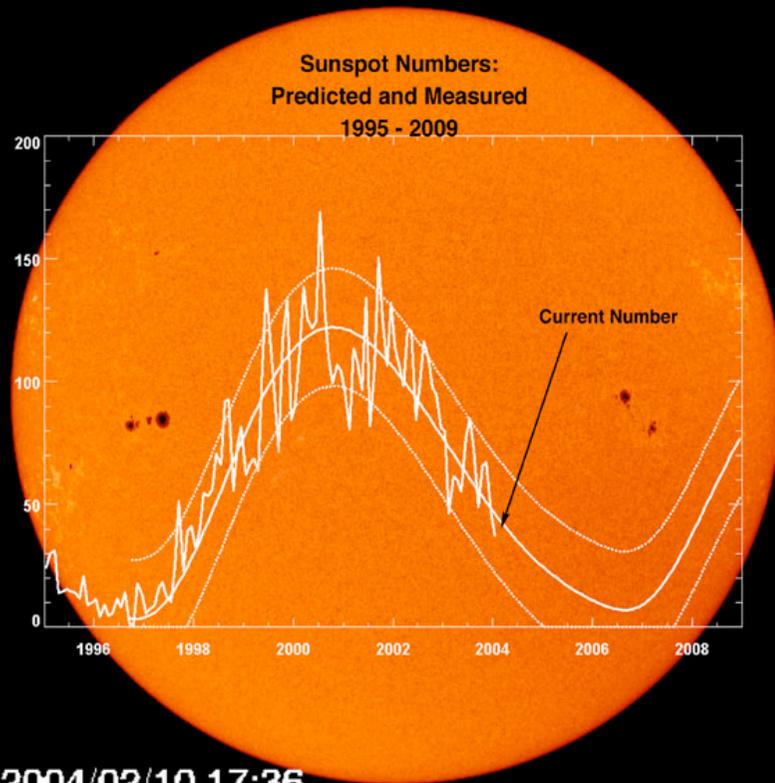


© *The SoHO/EIT consortium*



© *The SoHO/LASCO consortium*

L'activité solaire



Activité coronale

Mai 1998

trou coronal



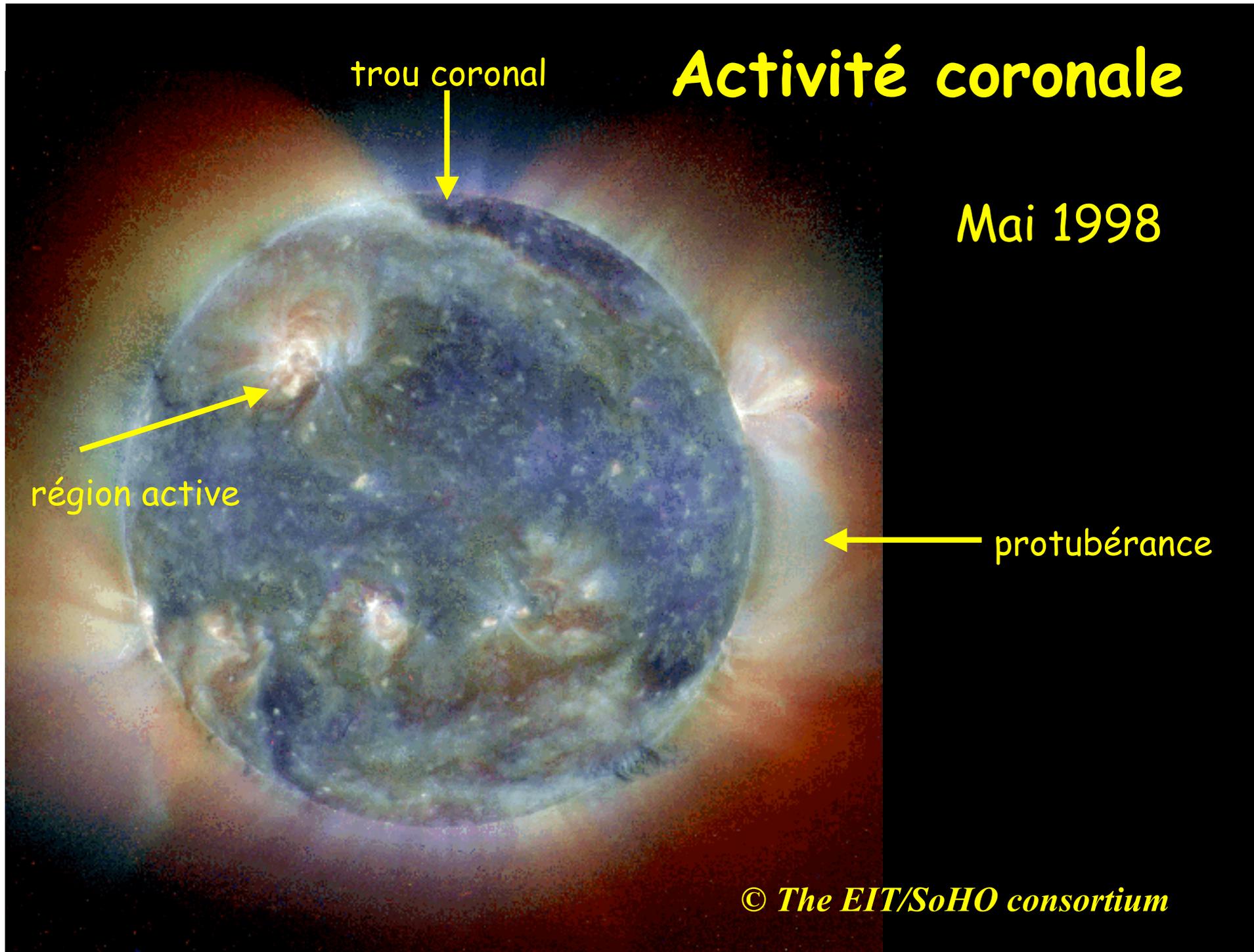
région active



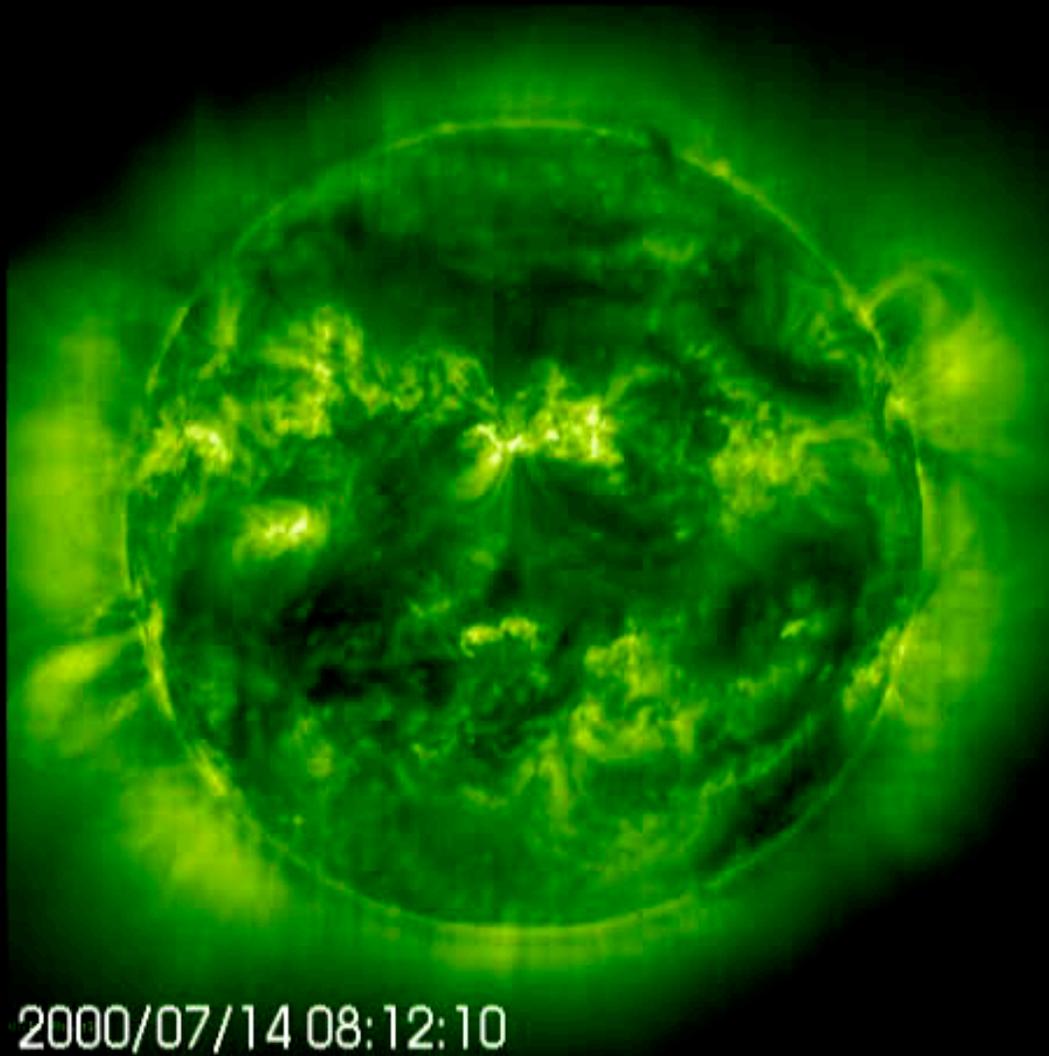
protubérance



© *The EIT/SoHO consortium*



Eruptions solaires



2000/07/14 08:12:10

« Bastille day » flare



Université
de Toulouse

Minimum d'activité...



- ⊙ Pour la première fois depuis **6 ans**, la surface du soleil était totalement dépourvue de tâches (pendant quelques jours) en **octobre 2004**
- ⊙ Cet évènement **était** très exceptionnel, alors que l'habitude **dermatologie** solaire est quotidiennement visible...

www.solarmonitor.org



Université
de Toulouse

III. Les grandes tours blanches...

Observations modernes

- ⊙ **Imagerie** de la surface solaire, avec des **résolutions angulaires** pouvant atteindre **~ 0.2 secondes d'arc** (soit ~ 150 km à la surface du soleil), généralement avec des **filtres** plus ou moins étroits (en longueur d'onde), sur des **champs divers**, du « soleil entier » (circulations à grande échelle...) à quelques (secondes d'arc)² pour voir les structures fines des taches, la granulation etc.
- ⊙ **Spectroscopie** UV (spatiale) et optique (sol), à grande **résolution spectrale** (jusqu'à des **$\lambda/\Delta\lambda \sim 300\,000$**)
- ⊙ **Polarimétrie**, le plus souvent associée à la spectroscopie, pour l'étude du **magnétisme** solaire principalement (cf. **effet Zeeman**)
- ⊙ **Coronographie**, technique inventée par **Bernard Lyot** pour occulter le disque et créer une **éclipse à la demande**



Kitt Peak (USA)

Mac Math - Pierce





Université
de Toulouse

Pic du Midi (de Bigorre)

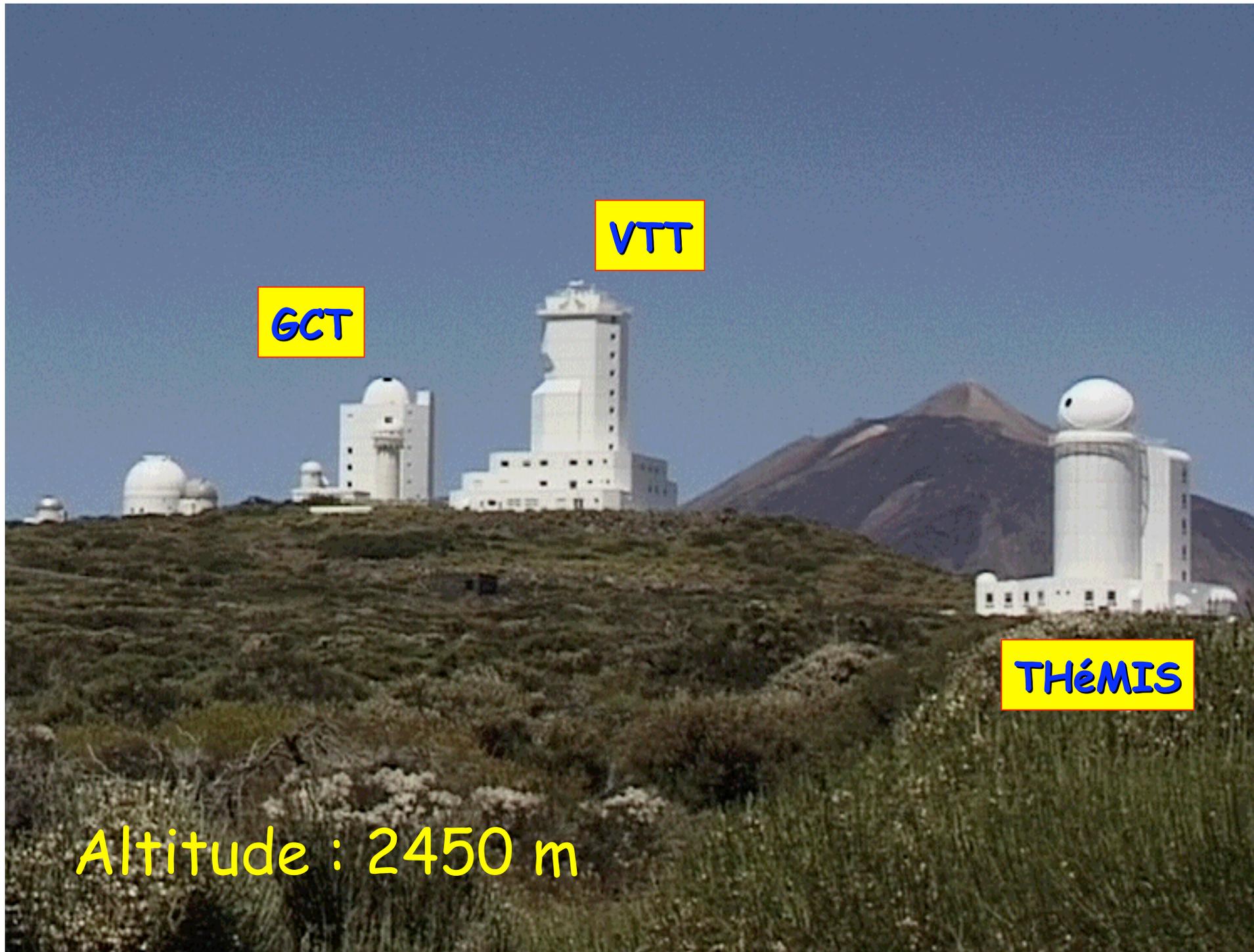


<http://ljr.bagn.obs-mip.fr>

<http://www.climso.fr>

Observatorio del Teide





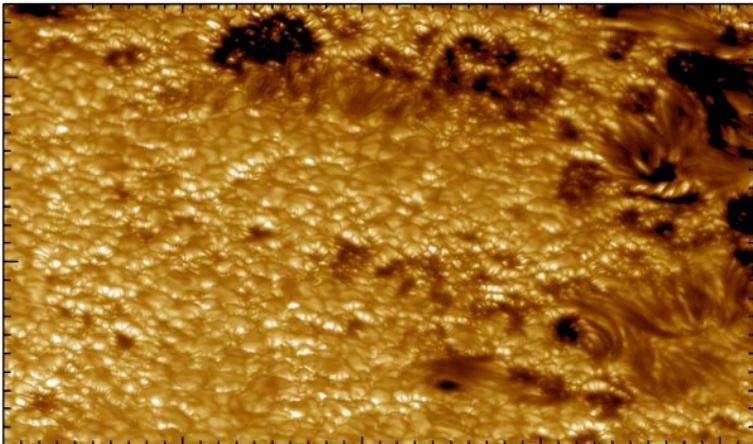
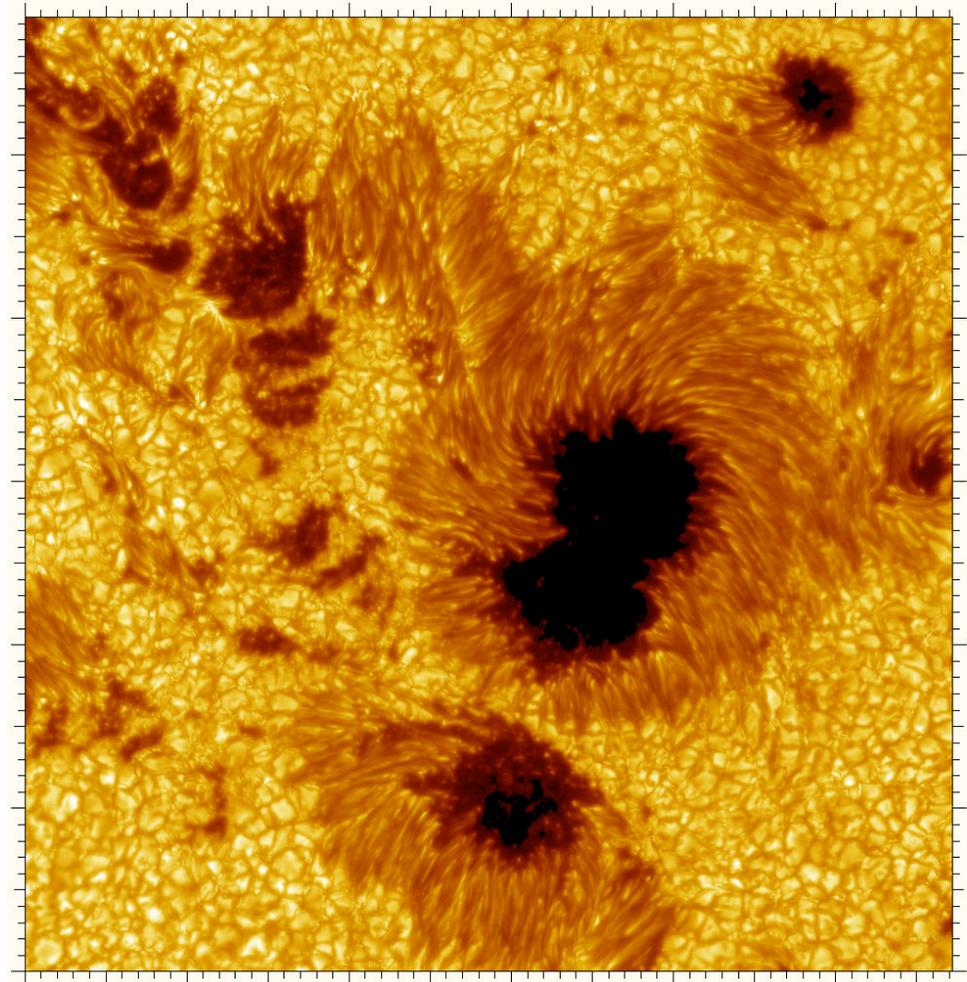
GCT

VTT

THÉMIS

Altitude : 2450 m

Imagerie HRA

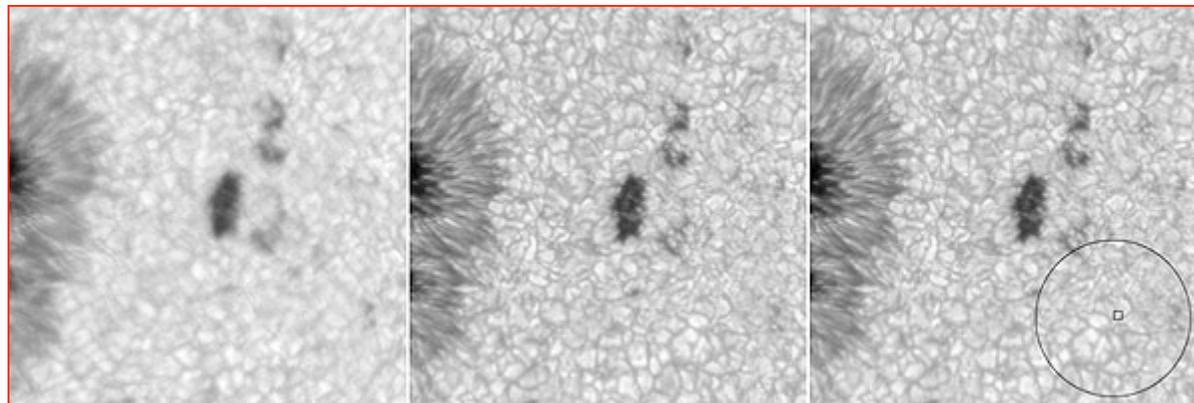
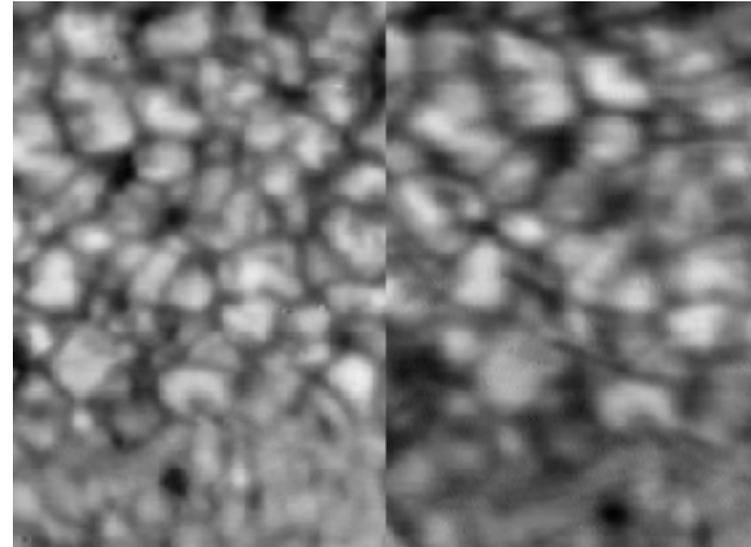


Swedish Solar Tower (La Palma)

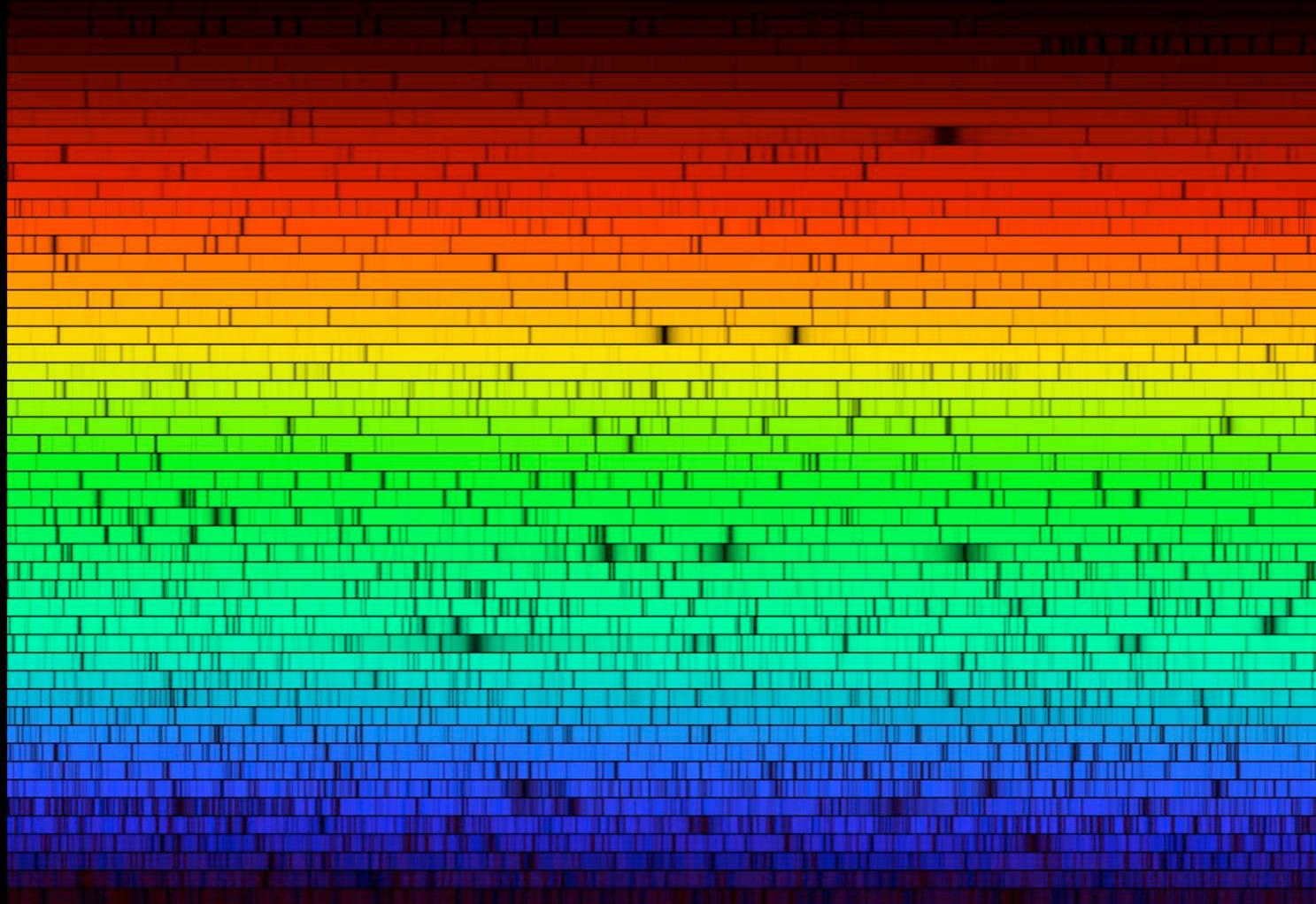


(Dick) Dunn Solar Tower

Sac' Peak (USA)



Le spectre visible du Soleil



THÉMIS

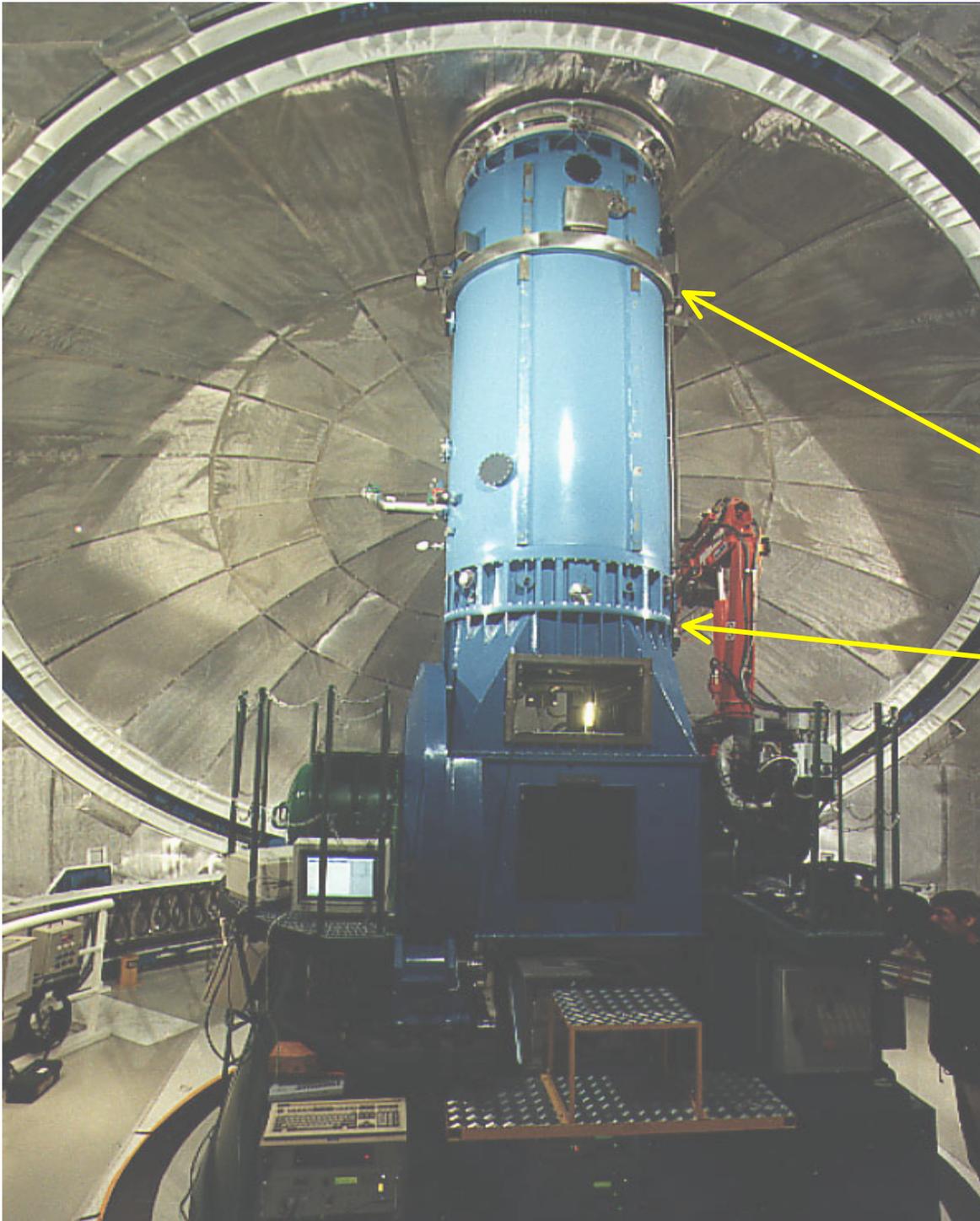


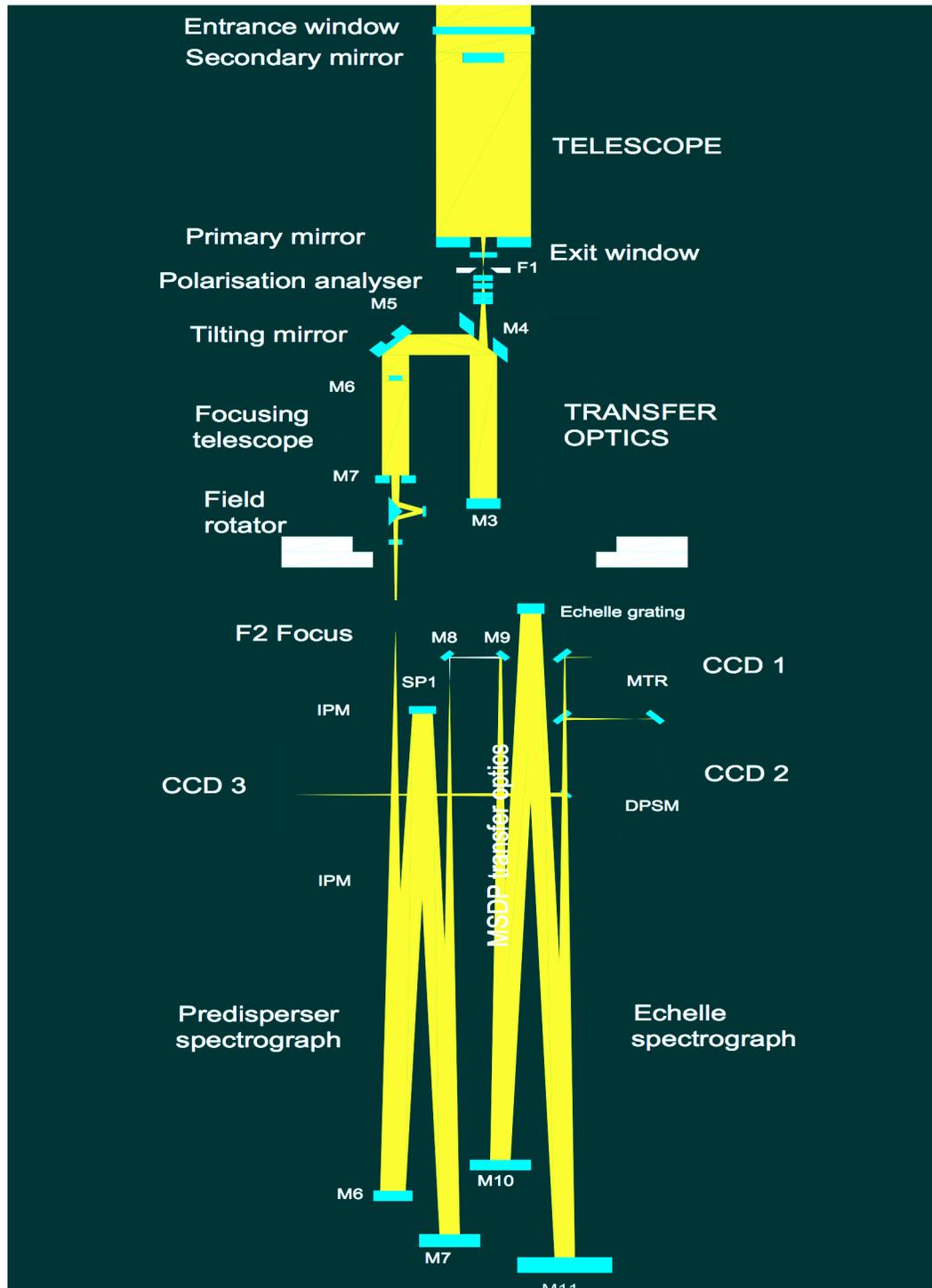
À l'intérieur de THÉMIS

miroir # 2

miroir # 1

Ingénieur de taille
moyenne au travail
en coupole



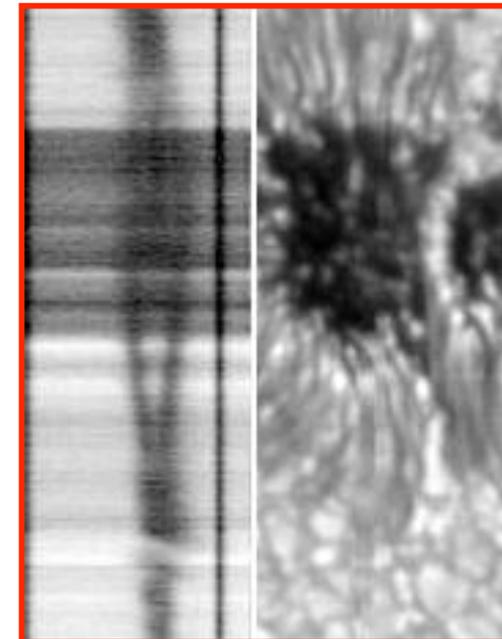
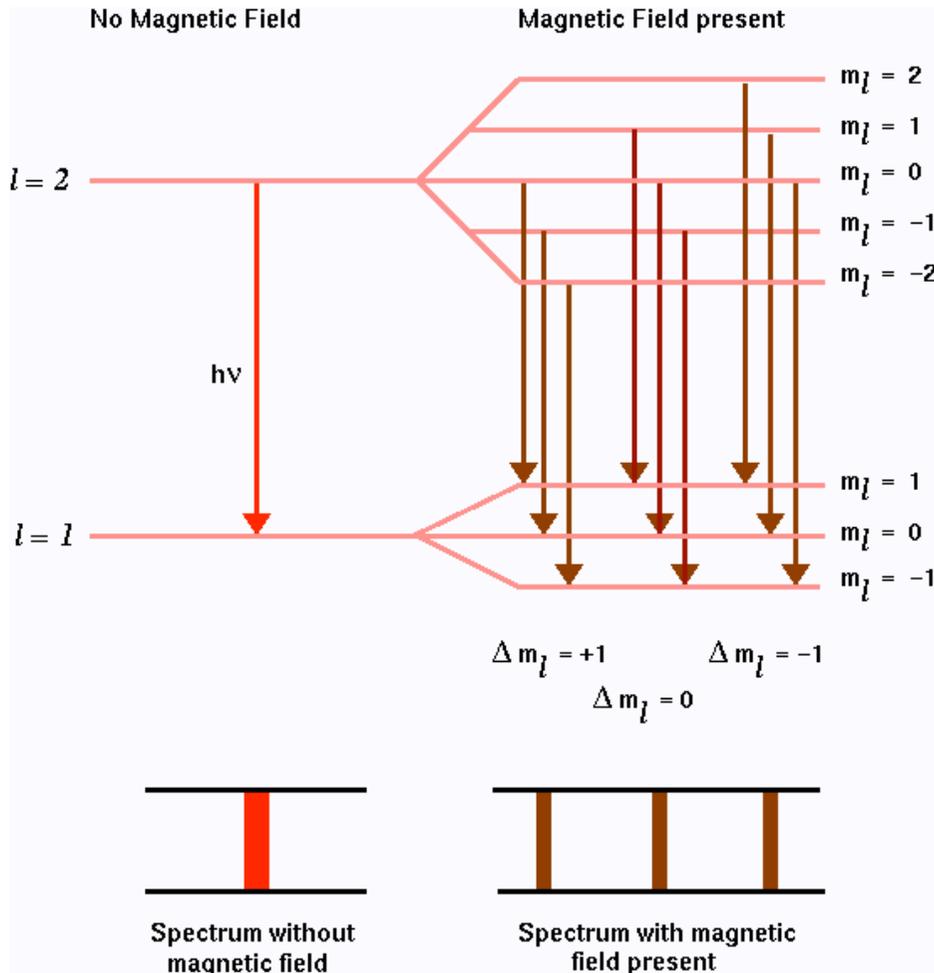


À l'intérieur de THEMIS

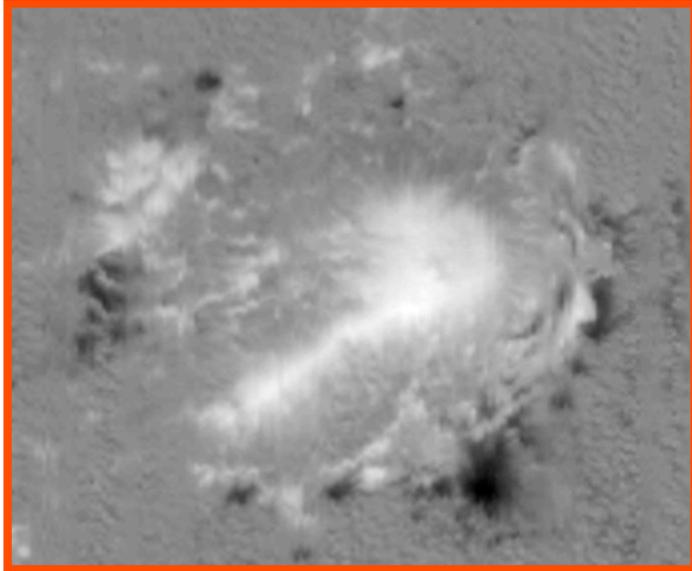
- ⊙ Le **télescope** (collecteur) et le **polarimètre**
- ⊙ L'optique de **transfert**
- ⊙ Le **spectrographe** et les **détecteurs**

www.themis.iac.es

(Spectro-) polarimétrie



Magnétométrie des régions actives



Raie du Ni I line @ 676.8 nm.
Le champ balayé est de
136"x110"

$B_{//}$

THÉMIS, 25 novembre 2000



$I_{\text{continuum}}$

Pour les physiciens (L2+) allez @

- <http://bass2000.bagn.obs-mip.fr>
- Tarbes puis Antenne pédagogique
- Polarimètre en ligne + ressources libres

Fin de...



Suite →

Régions actives, rotation et magnétisme



2004/06/13 00:49

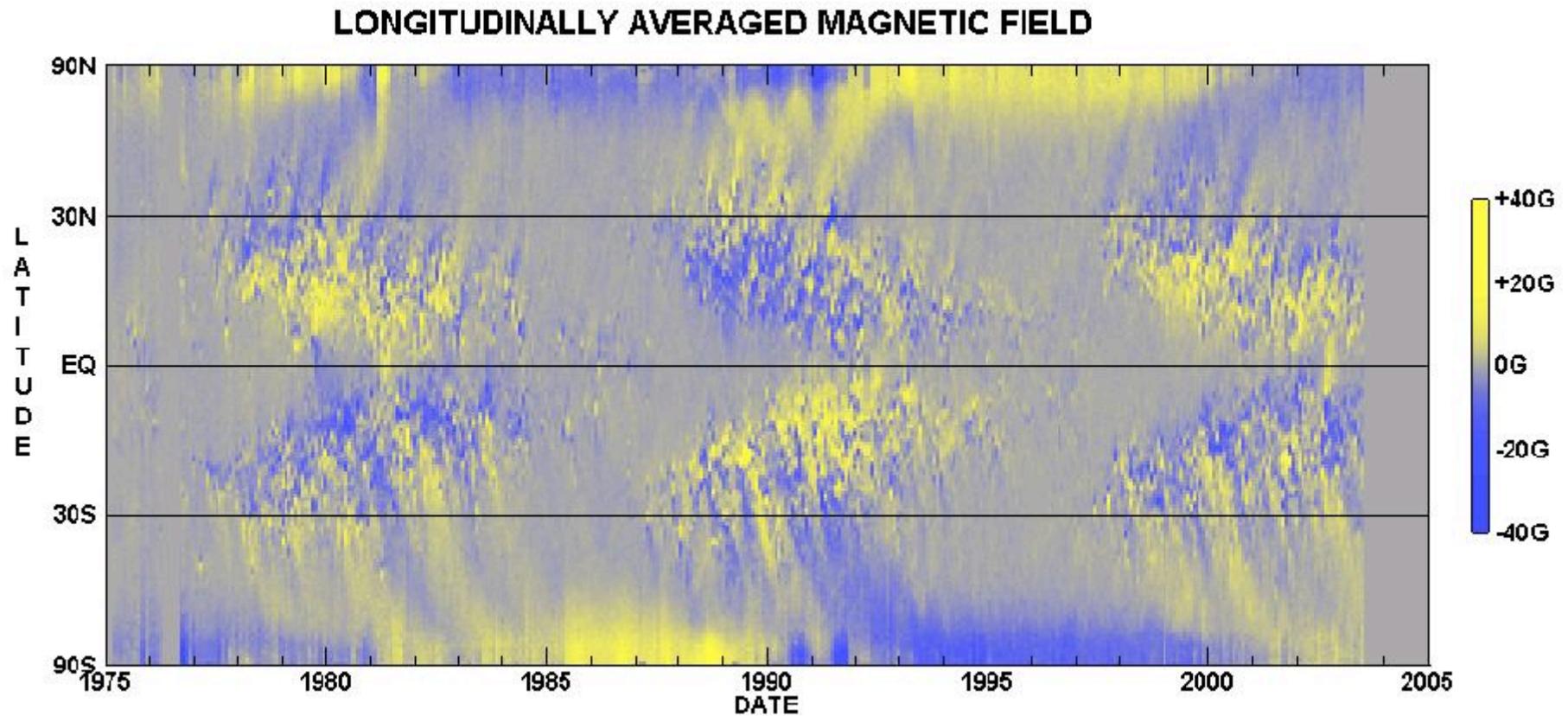


2004/06/13 00:00



Université
de Toulouse

La loi de Hale

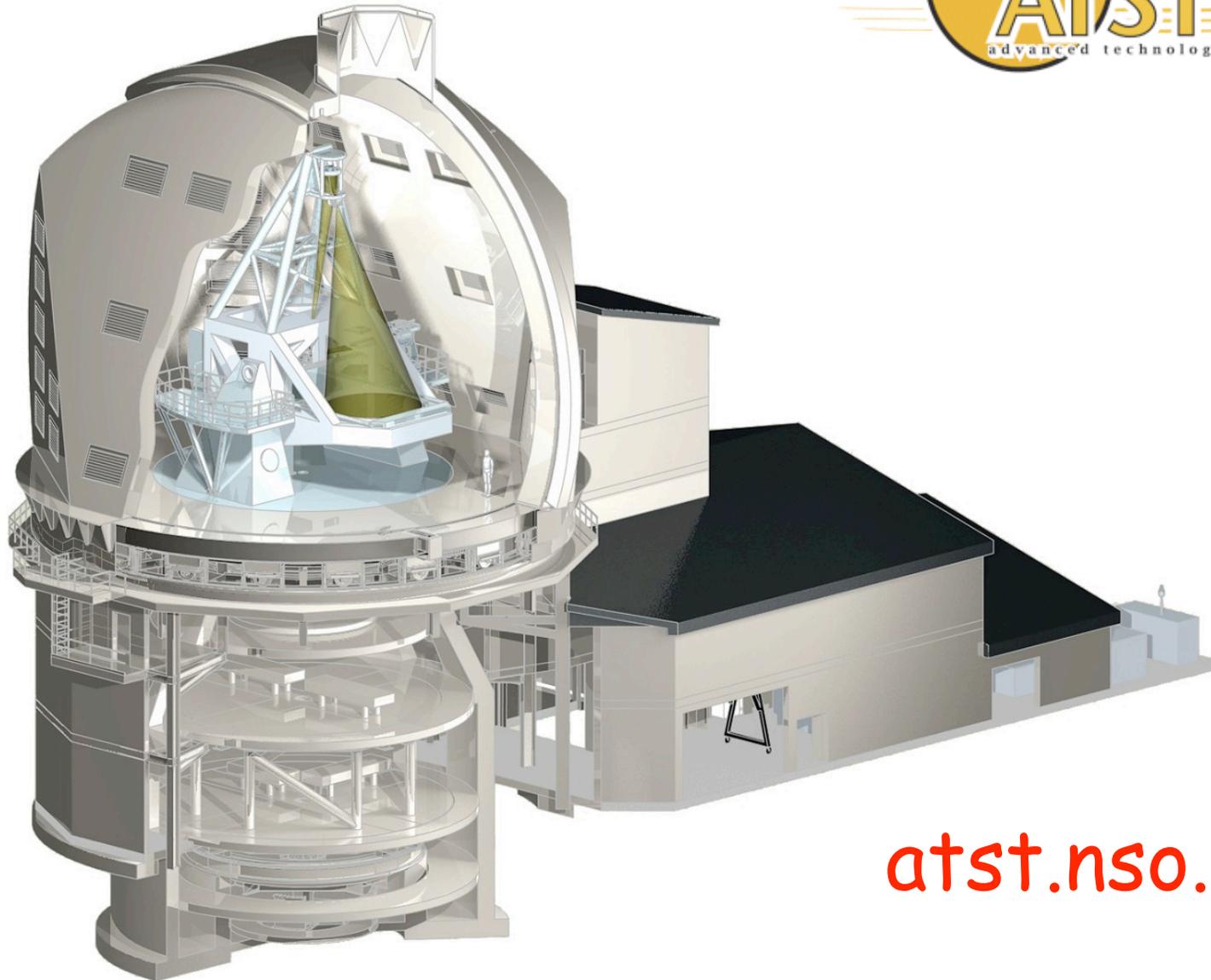


Soit un cycle magnétique de 22 ans !



Université
de Toulouse

IV. Les ELT solaires à l'étude



atst.nso.edu



European Solar Telescope

Objectif : 2018+



www.iac.es/project/EST



Université
de Toulouse

V. La météo de l'espace



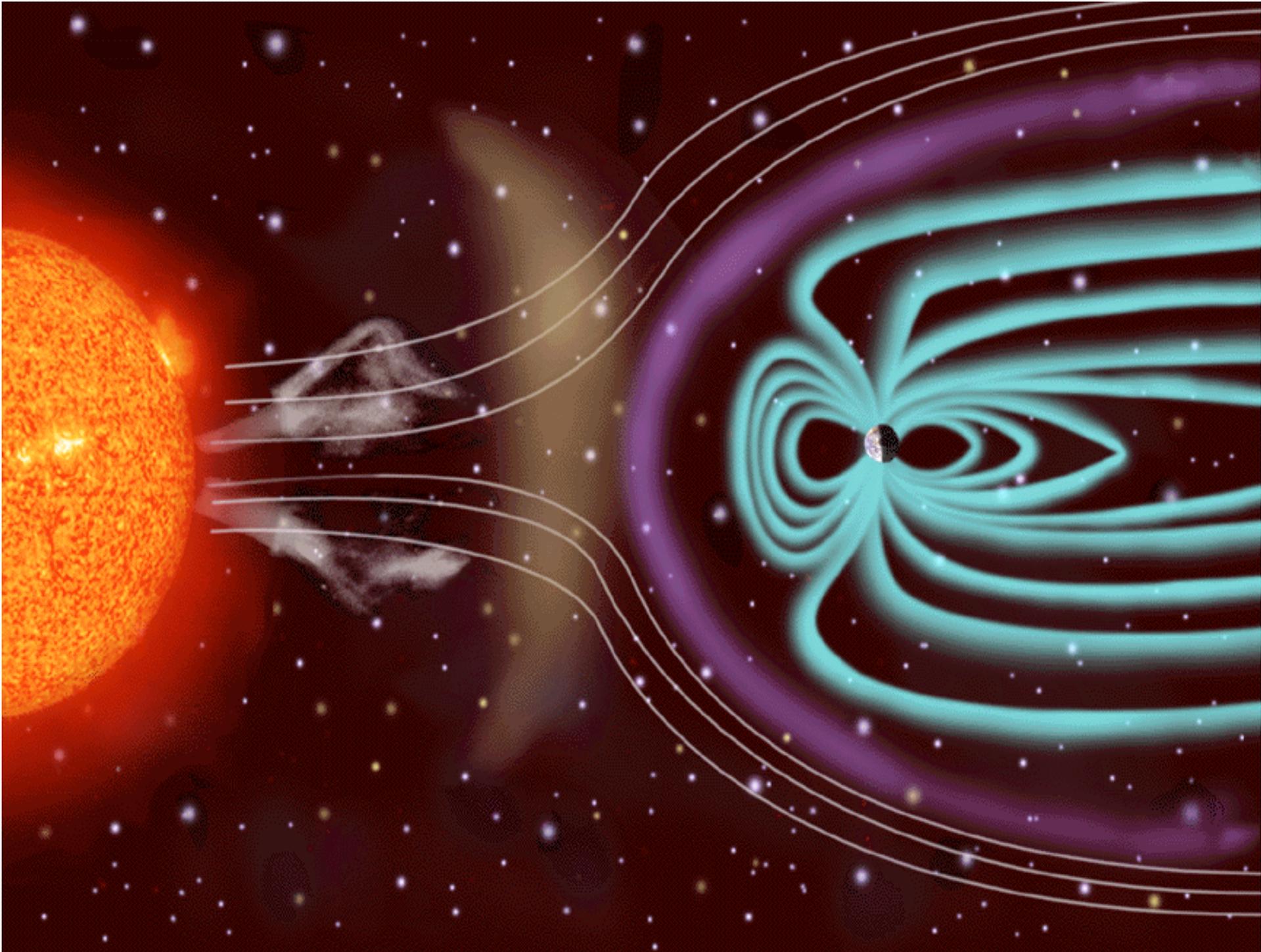
Eyjafjallajökull (Islande, avril 2010)

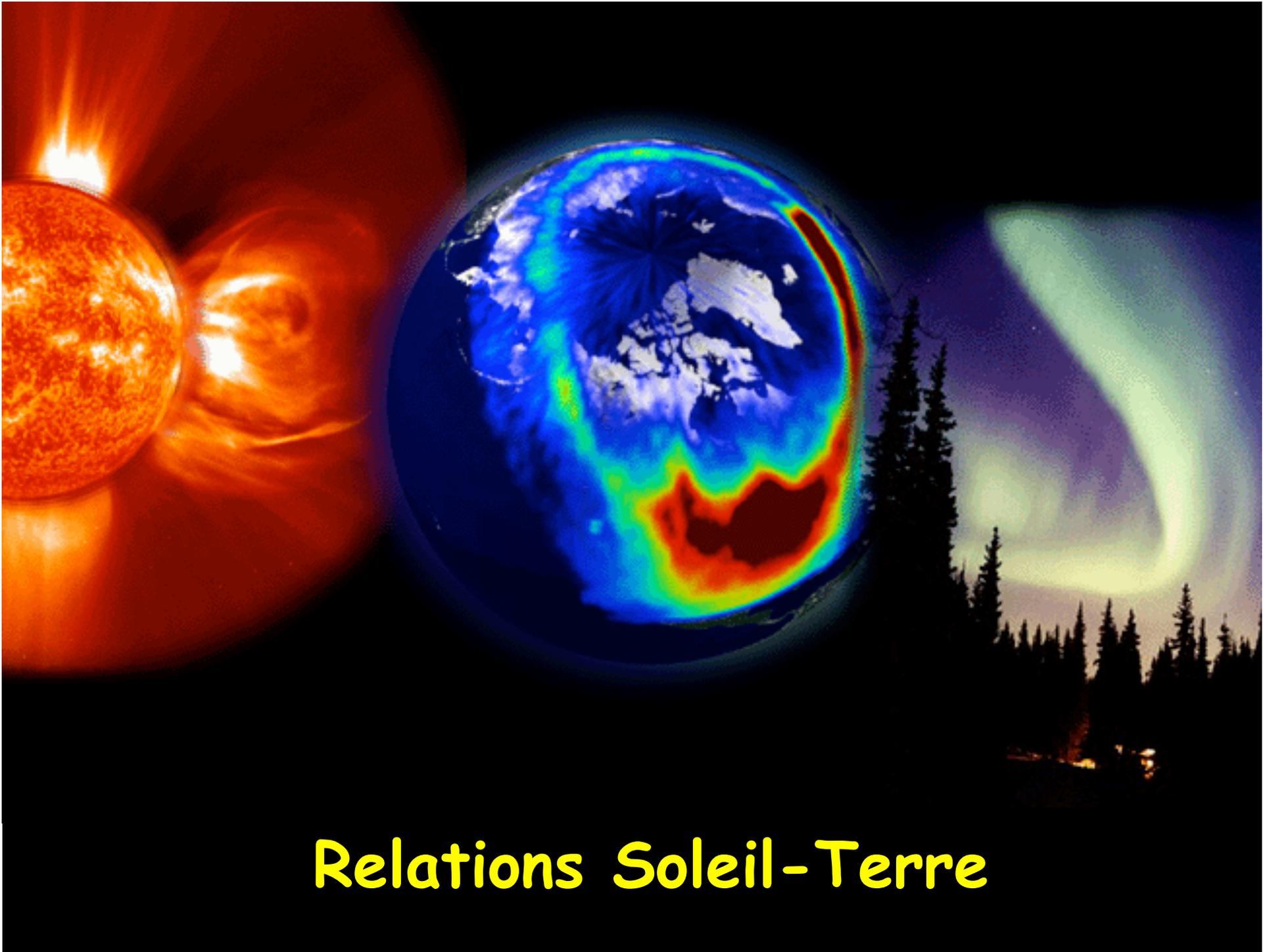
Ejections de masse coronale

1998/06/02 13:31

© *The LASCO/SoHO consortium*



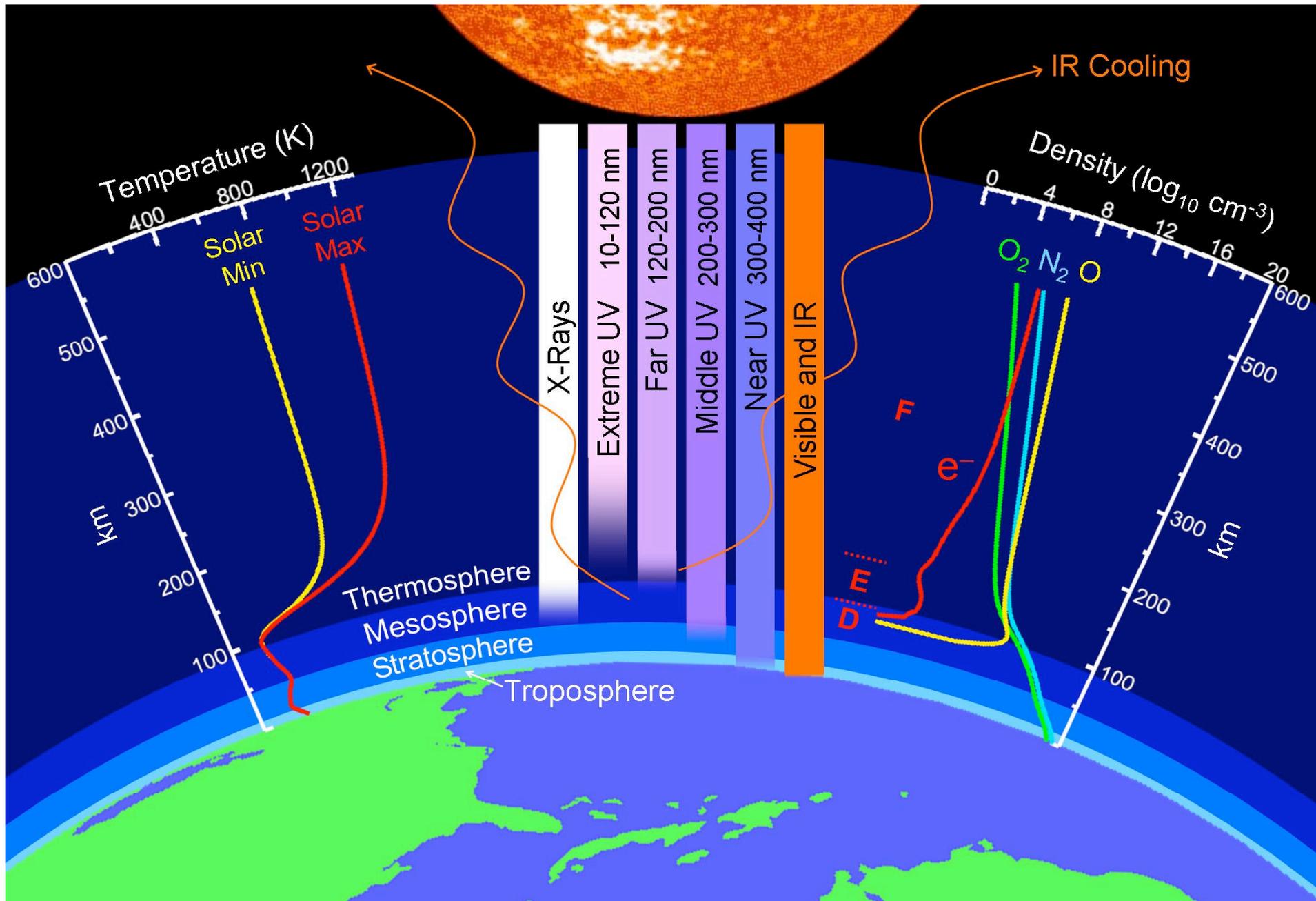




Relations Soleil-Terre

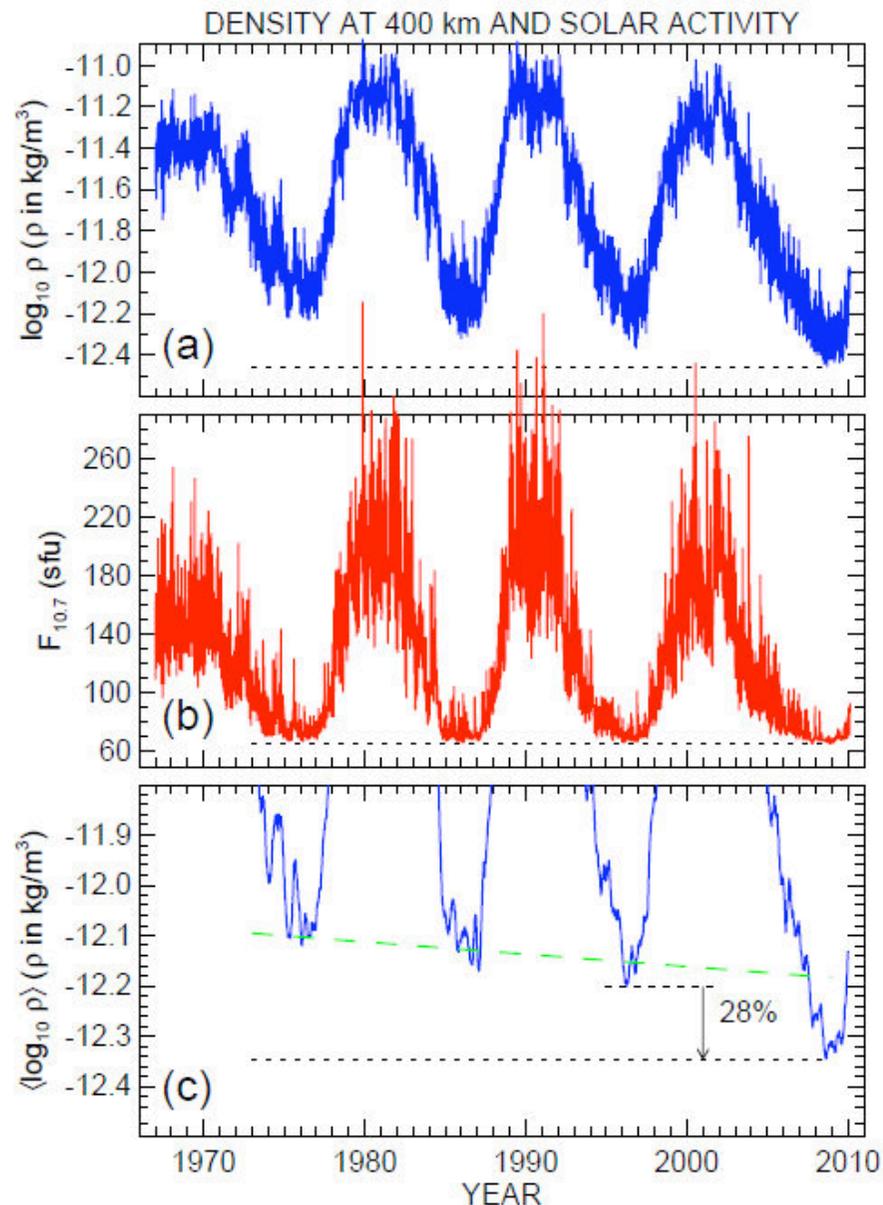


Aurore boréale (ISS)



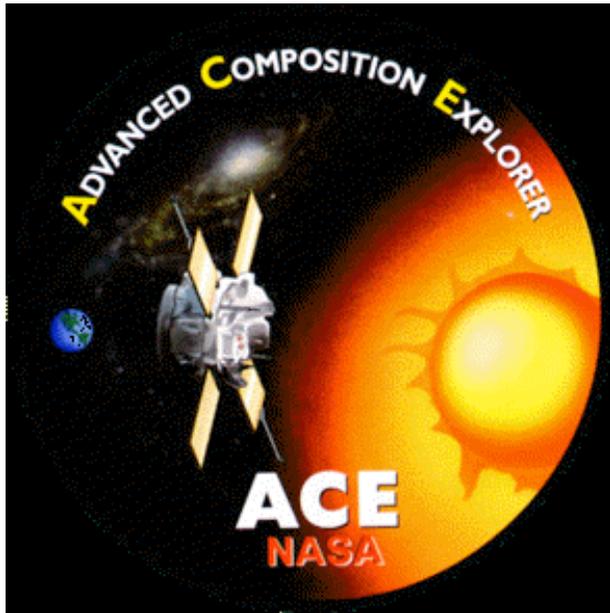
NASA Science news (15/07/2010)

NASA Science news (15/07/2010)



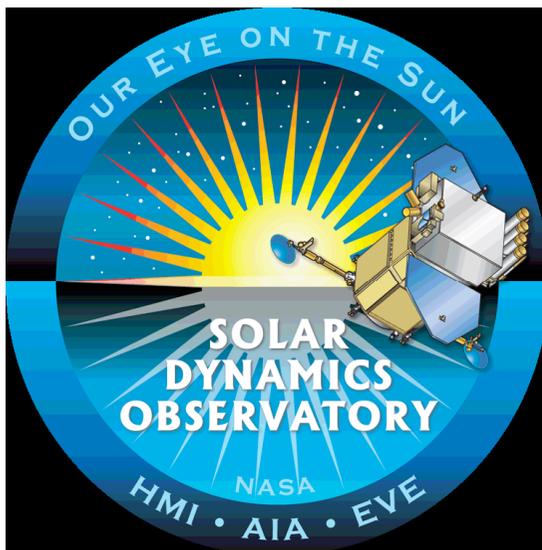
- Chute significative de la **densité de la thermosphère @ 400 km** durant le dernier minimum d'activité
- Rôle de l'irradiance EUV solaire (-) et du CO_2 (+) atmosphérique, mais **autre(s) cause(s) par encore claires...**
- Evolution durant la **montée vers le prochain maximum ?**

Emmert et al. (2010)



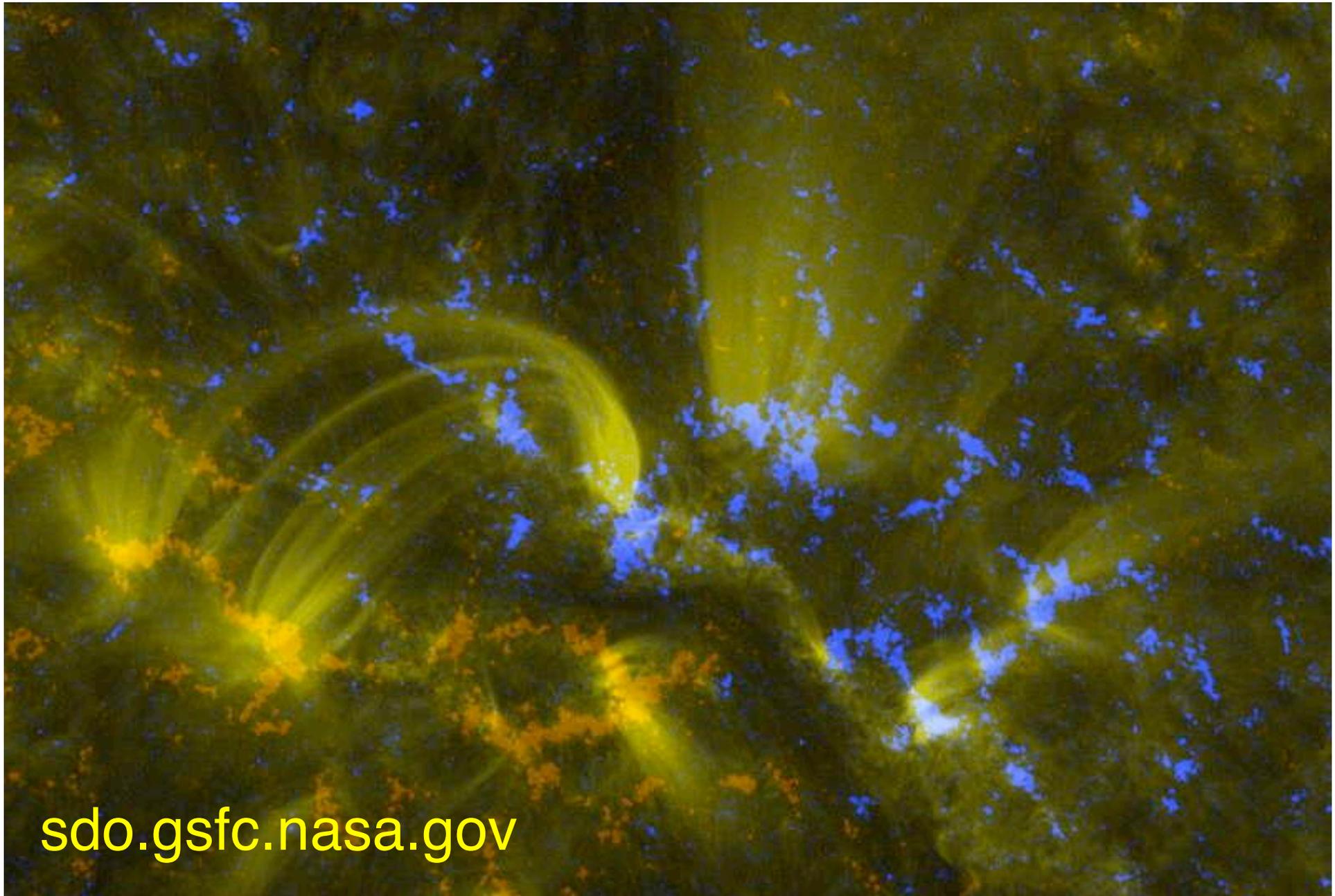
Analyse de la composition du vent solaire au point L1 (1997-....)

Imagerie stéréoscopique de la couronne solaire, détection de CMEs (2006-....)



Magnétogrammes, Dopplergrammes et imagerie EUV du soleil entier (2010-....)

SDO : HMI + AIA (171 Å) composition



En guise de conclusion

- ⊙ Bien qu'étoile de référence, le soleil est plus que jamais **un laboratoire de physique** permettant l'observation et l'étude de phénomènes extrêmes et complexes
- ⊙ Les développements instrumentaux associés à la physique solaire sont **au moins aussi ambitieux** que ceux déployés pour l'astronomie nocturne
- ⊙ Du point de vue théorico-numérique, les outils requis pour la physique solaire sont très souvent à la pointe, tous domaines de l'astrophysique confondus
- ⊙ Pour les plus jeunes, de grands projets - comme **EST** - existent déjà et les plus physiciens d'entres vous ne seront pas déçus par les **"beaux problèmes"** que procure(ra) la physique solaire encore longtemps...