



Laboratoire en Lutte

Le Soleil et la Terre, une relation qui peut être orageuse

Jean-Claude Vial

Institut d'Astrophysique Spatiale
Orsay

Orsay, JCV, 07/05/2009

Le Soleil et la Terre

Une journée sans satellite, sans GPS, sans électricité, ...

Est-ce possible ?

Pourquoi ?

Peut-on l' éviter ?

Peut-on le prévoir ?

Comment le prévoir ?

OUI

**A cause
d' »orages »
solaires**

NON

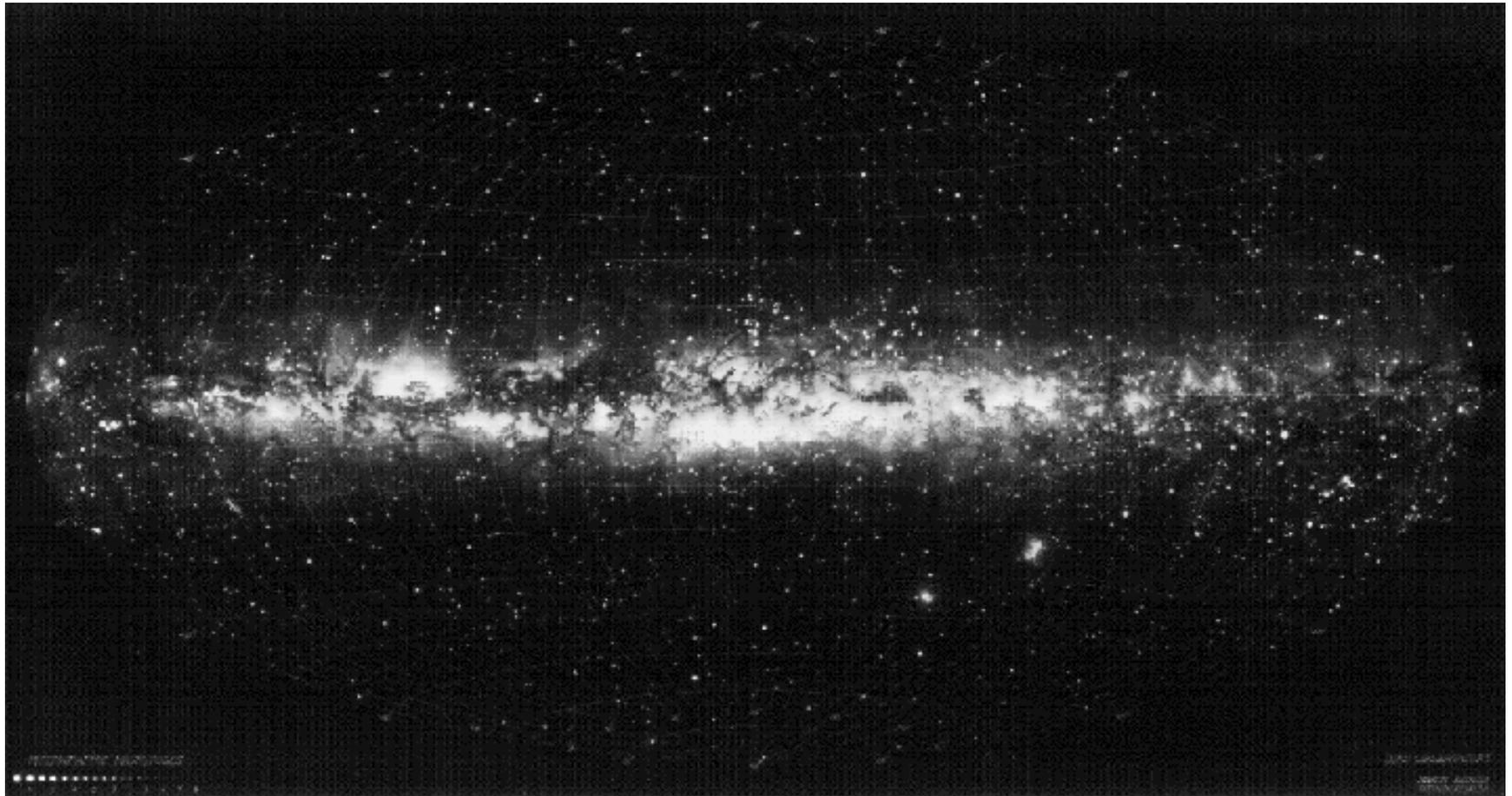
On peut essayer ...

*** En surveillant le
Soleil**

*** En comprenant
le Soleil**

Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

La Voie lactée vue en lumière visible



Orsay, JCV, 07/05/2009

Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

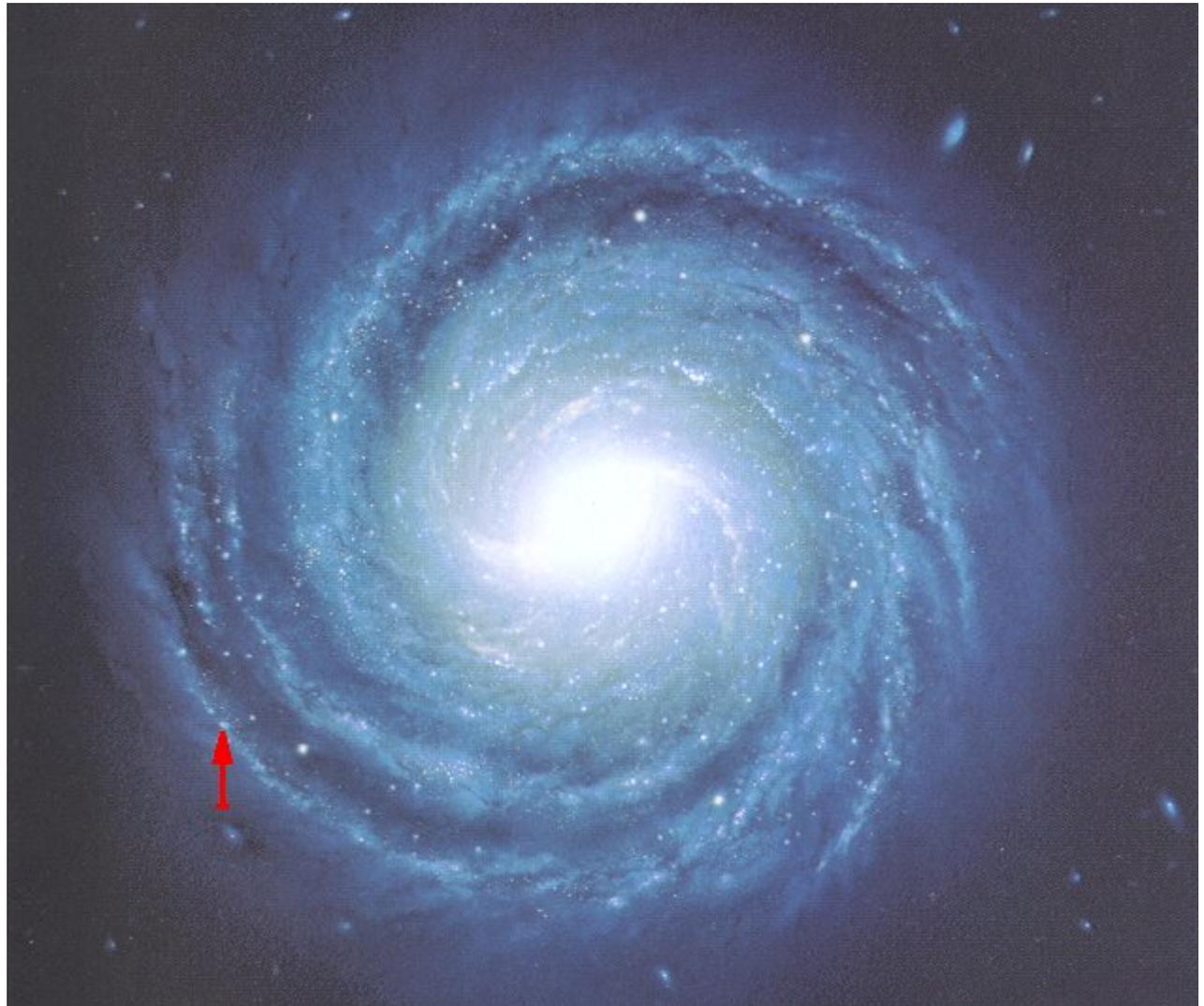
Une étoile parmi les quelques 100 milliards d'étoiles de la Galaxie

Position du Soleil : $> 25\,000$ années-lumière du Centre

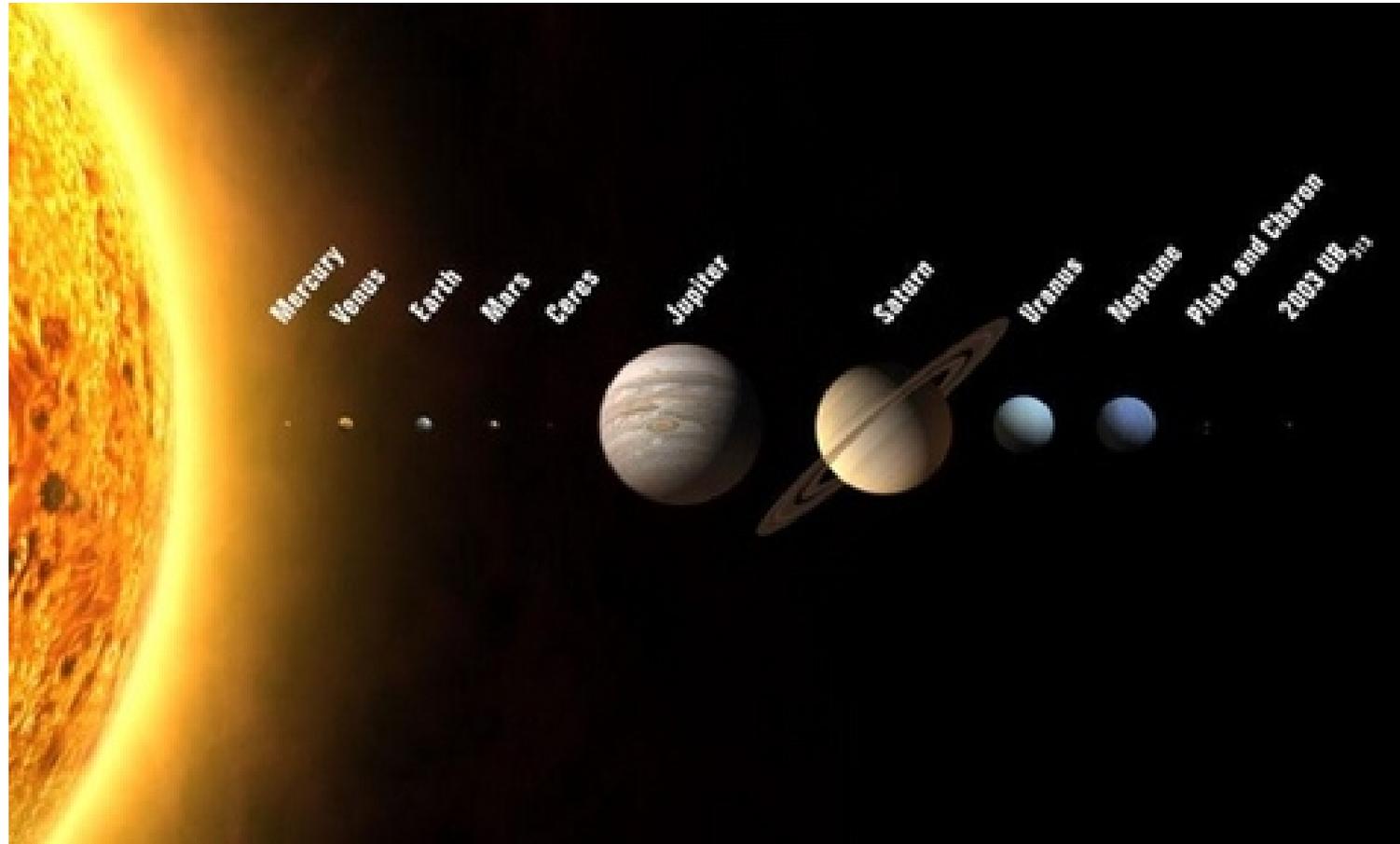


Le Soleil, une étoile dans notre Galaxie

- 1 tour :
200 millions
d'années
- $V = 250$
km/s



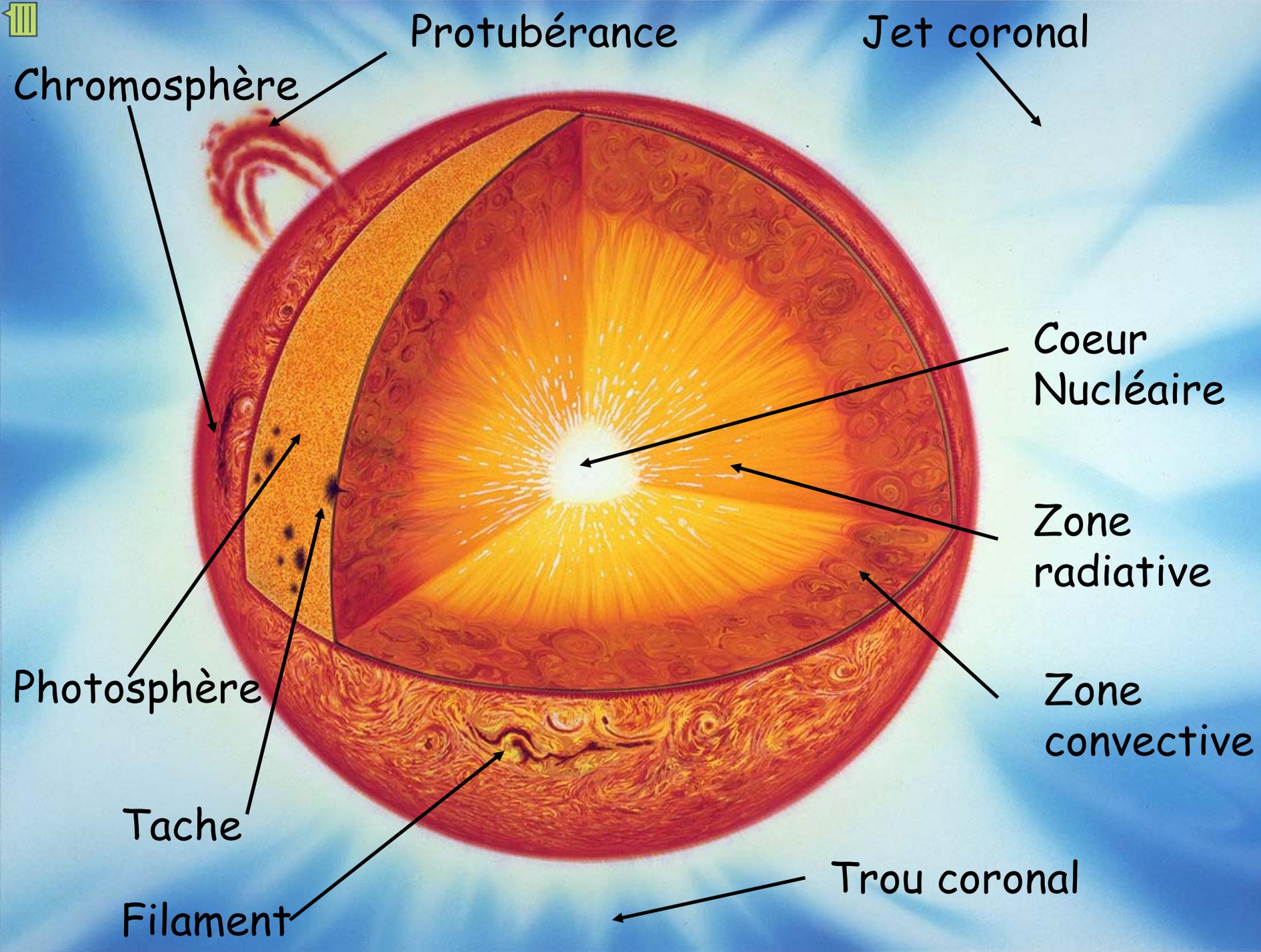
Le Soleil, la Terre et les autres corps du système solaire ...



La Terre, vue de la Lune



Orsay, JCV, 07/05/2009



A la surface solaire



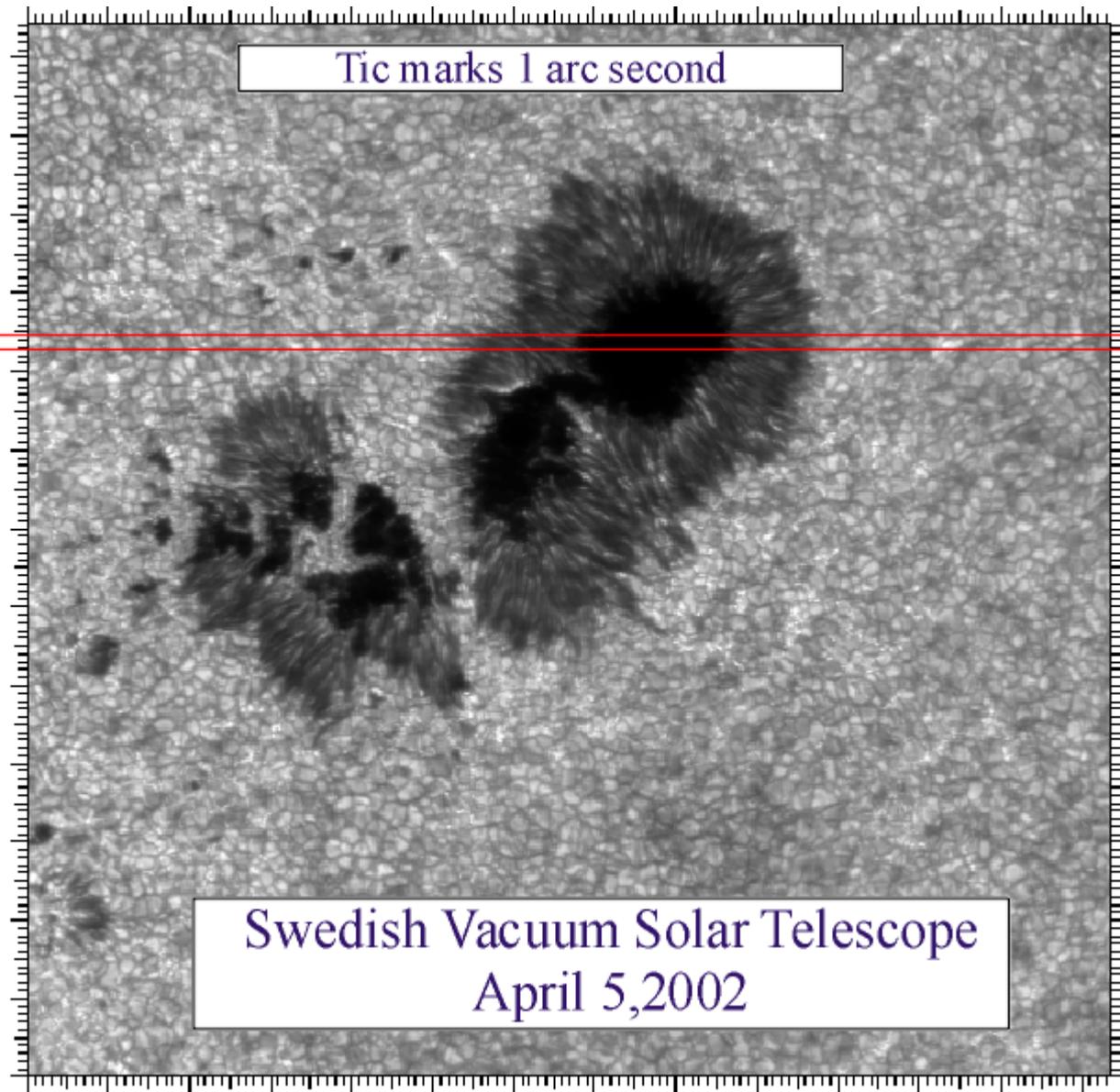
MovieGranulation.mov

Le Soleil, étoile magnétique

Première découverte, il y a 400 ans

Les taches, sombres (Galilée 1613), plus froides (de - 2000 °C) que la surface ordinaire

Champ magnétique : 10 000 fois le champ terrestre



SUMI
Slit

Tic marks 1 arc second

Swedish Vacuum Solar Telescope
April 5, 2002

Le Soleil, étoile magnétique

Première découverte, il y a 400 ans

Les taches (Galilée 1613), plus froides (de - 2000 °C) que la photosphère

Champ magnétique : 10 000 fois le champ terrestre

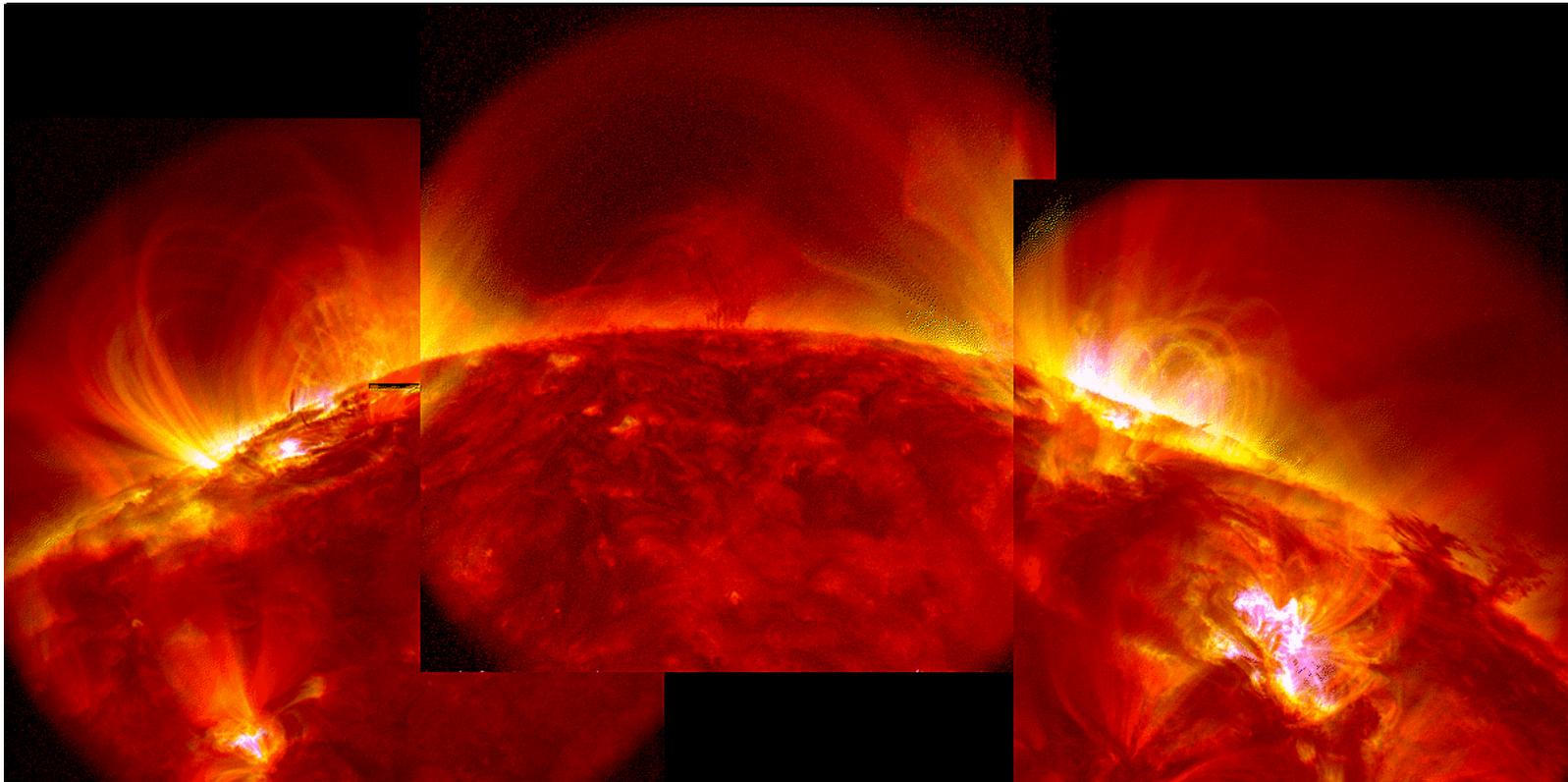
Un champ magnétique qui structure la couronne (boucles)

Boucles coronales

Ponts de matière chaude (quelques millions de °) entre régions de polarités opposées (les « pieds »)

Sections de l'ordre de quelques 100 km
Hauteurs allant jusqu'à 100 000 km

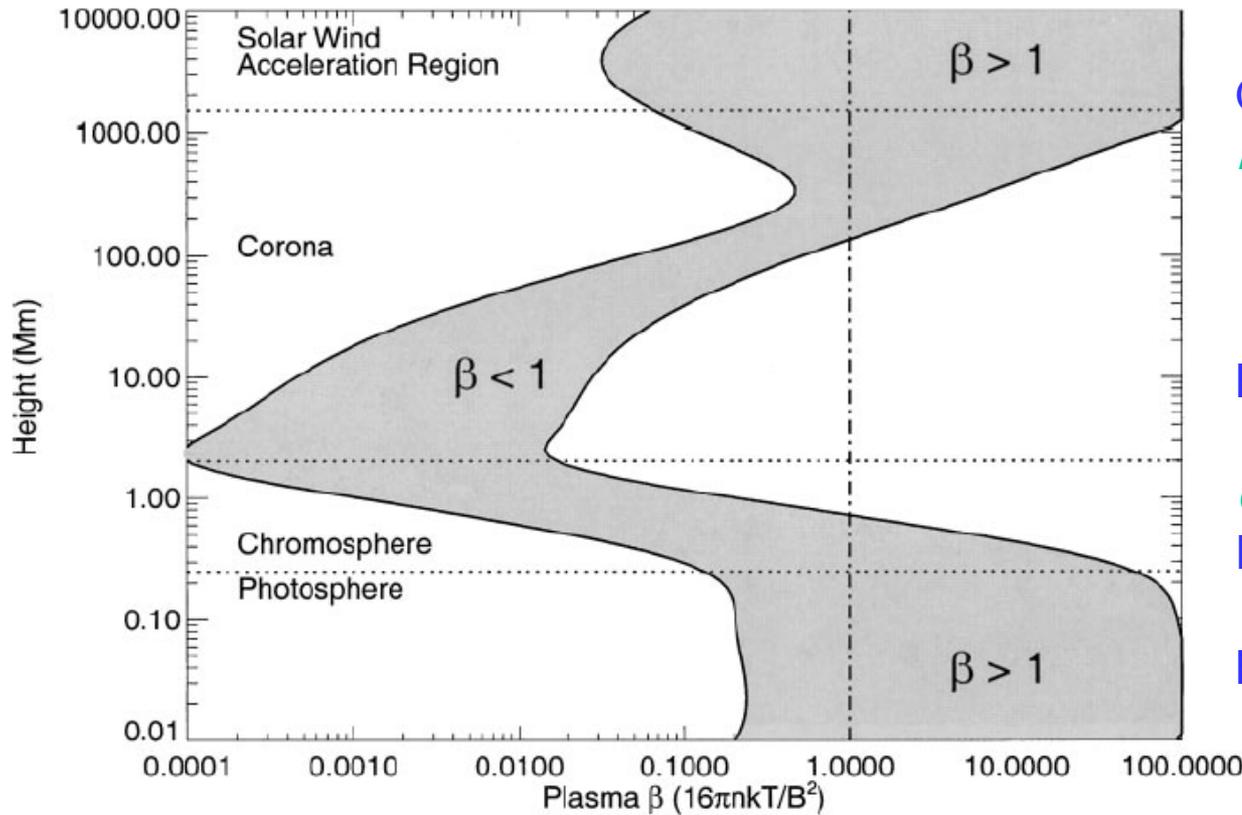
TRACE (NASA)



De très grandes variations spatiales (x,y,r) et temporelles du β du plasma

$$\beta = P_{\text{gaz}}^* / P_{\text{magnétique}}$$

(* ou $P_{\text{cinétique}}$)



Complètement ionisé
Non collisionnel

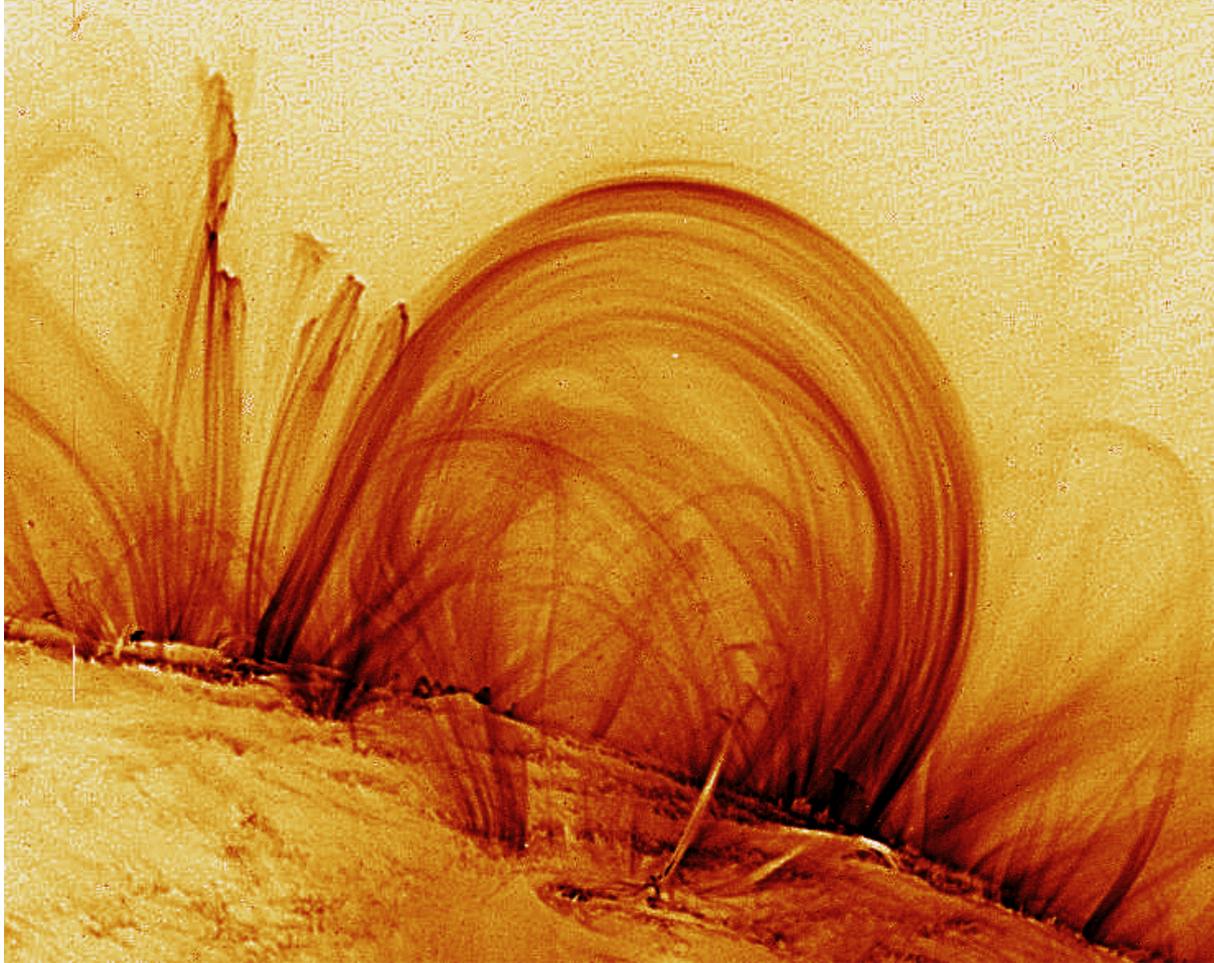
Partiellement ionisé

Collisionnel
Neutre

Partiellement ionisé
Très collisionnel

Aschwanden et al. (2001)

Arches coronales



Orsay, JCV, 07/05/2009

Mes remerciements à l'équipe *TRACE*

Le Soleil, étoile magnétique

Première découverte, il y a 400 ans

Les Taches (Galilée 1613), plus froides (de - 2000 °C) que la photosphère

Champ magnétique : 10 000 fois le champ terrestre

Un champ magnétique dont la « disruption » peut conduire à de fortes éruptions

Eruption solaire

TRACE

MOVIE_7_movie_bastille_day_flare.avi.MPG

Orsay, JCV, 07/05/2009

Le Soleil, étoile magnétique

Première découverte, il y a 400 ans

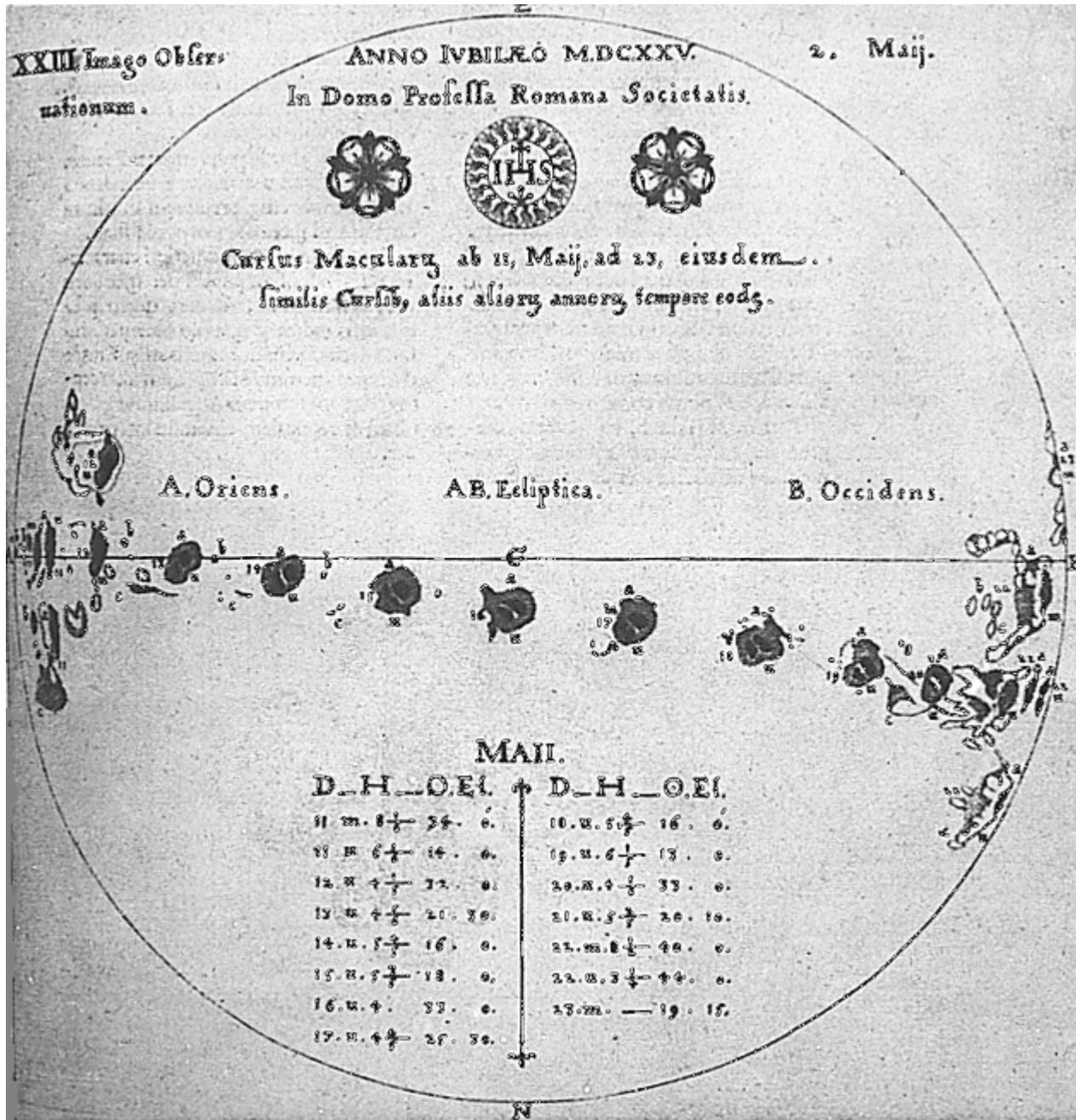
Les Taches (Galilée 1613), plus froides (de - 2000 °C)
que la photosphère

Champ magnétique : 10 000 fois le champ terrestre

Un champ magnétique qui peut conduire à de fortes
éruptions

Taches = traceurs de la rotation de surface : 27 jours
pour faire un tour à l'équateur;
33 jours aux pôles (vue de la Terre)

Taches-traceurs de la rotation



Le Soleil, étoile magnétique

Première découverte, il y a 400 ans

Les Taches (Galilée 1613), plus froides (de - 2000 °C) que la photosphère

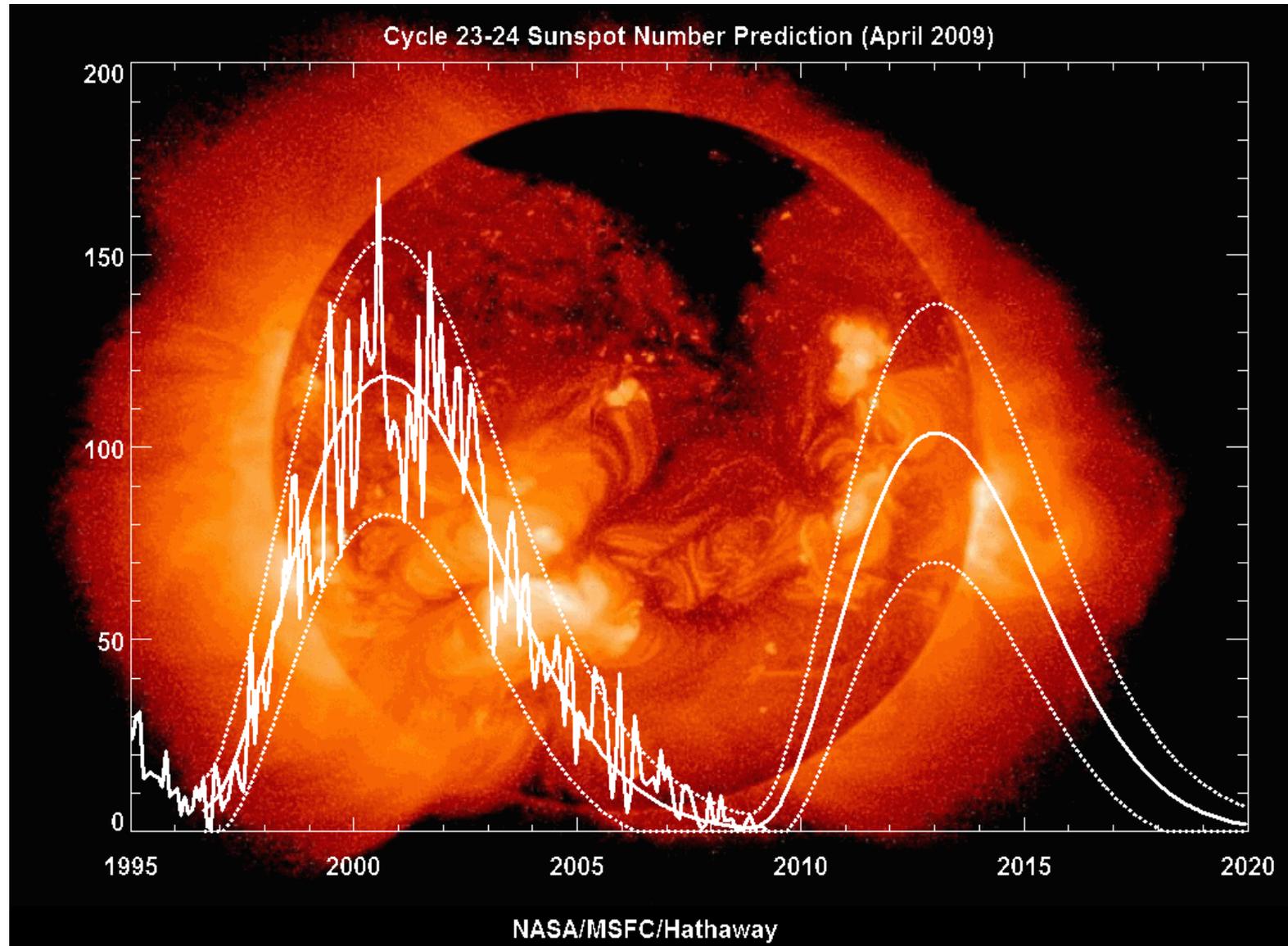
Champ magnétique : 10 000 fois le champ terrestre

Un champ magnétique qui peut conduire à de fortes éruptions

Taches = traceurs de la rotation différentielle (de surface) : 27 jours pour faire un tour à l'équateur; 33 jours aux pôles (vue de la Terre)

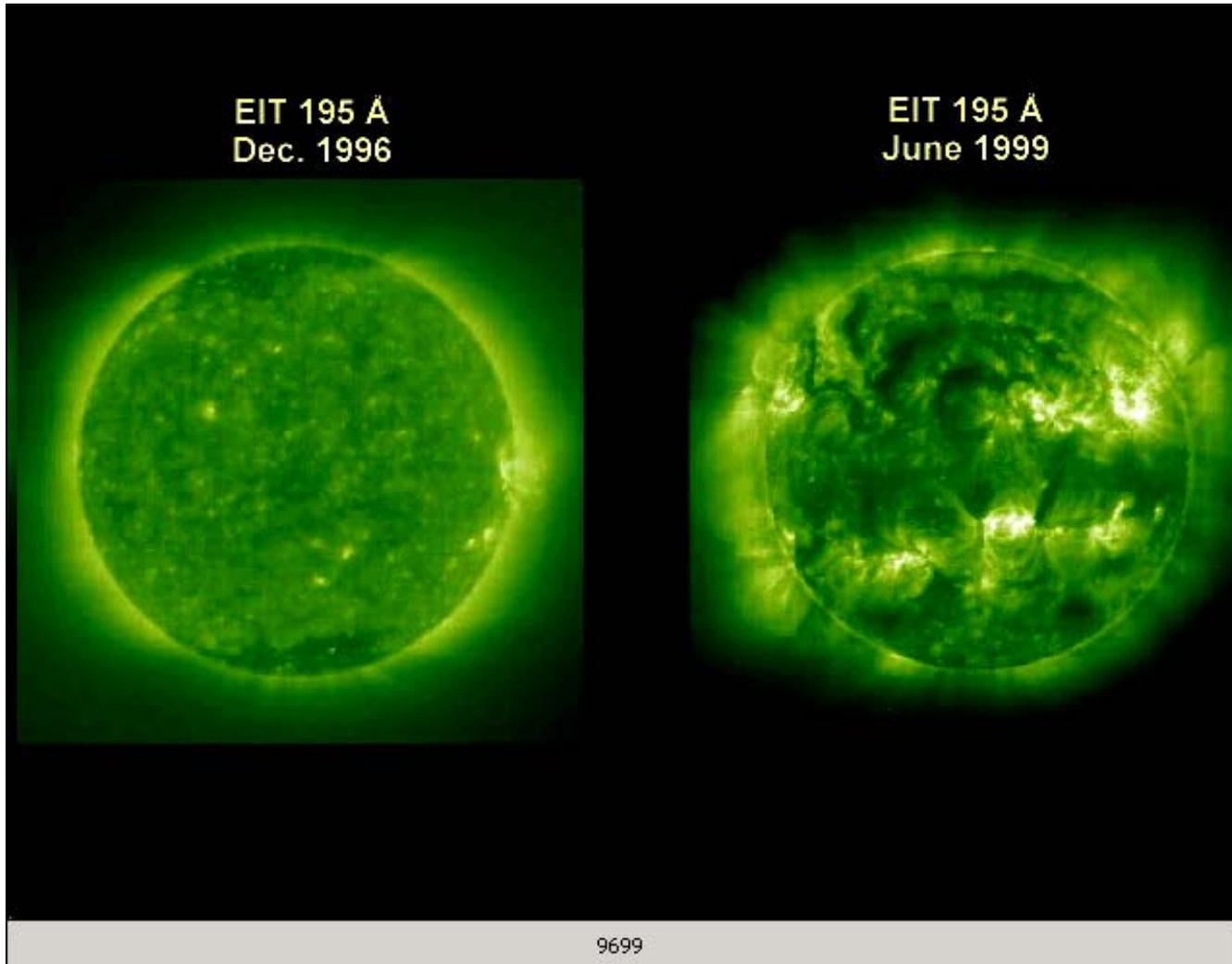
Taches = traceurs des cycles du Soleil

Taches-traceurs des cycles du Soleil



Orsay, JCV, 07/05/2009

- Minimum et Maximum d'activité solaire
champ poloïdal champ toroïdal



Ejections coronales de matière (CME)

En période de maximum **et** de minimum d'activité, des éjections de matière coronale, peuvent libérer des milliards de tonnes de matière dans l'espace interplanétaire.

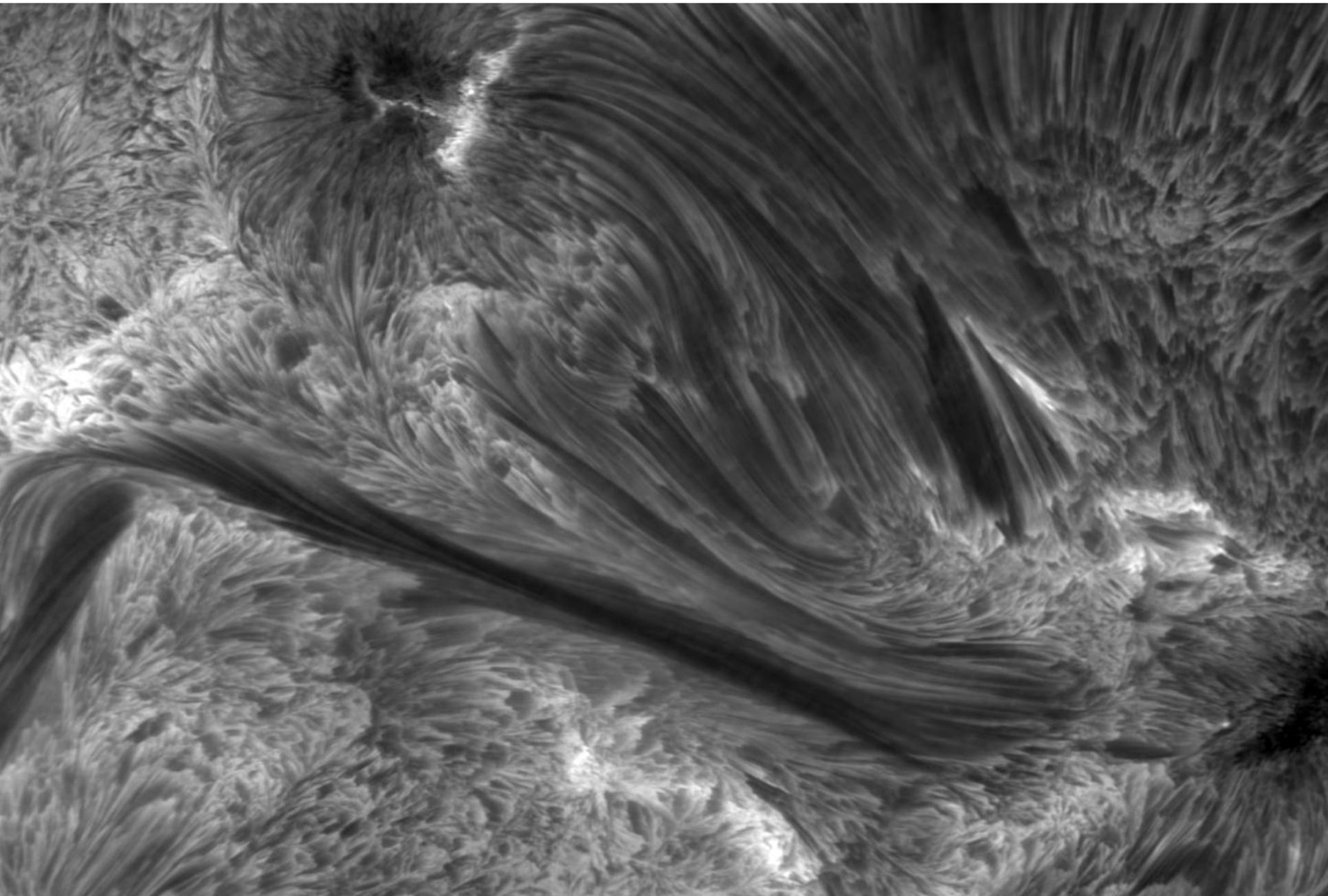
Cette matière peut atteindre la Terre.

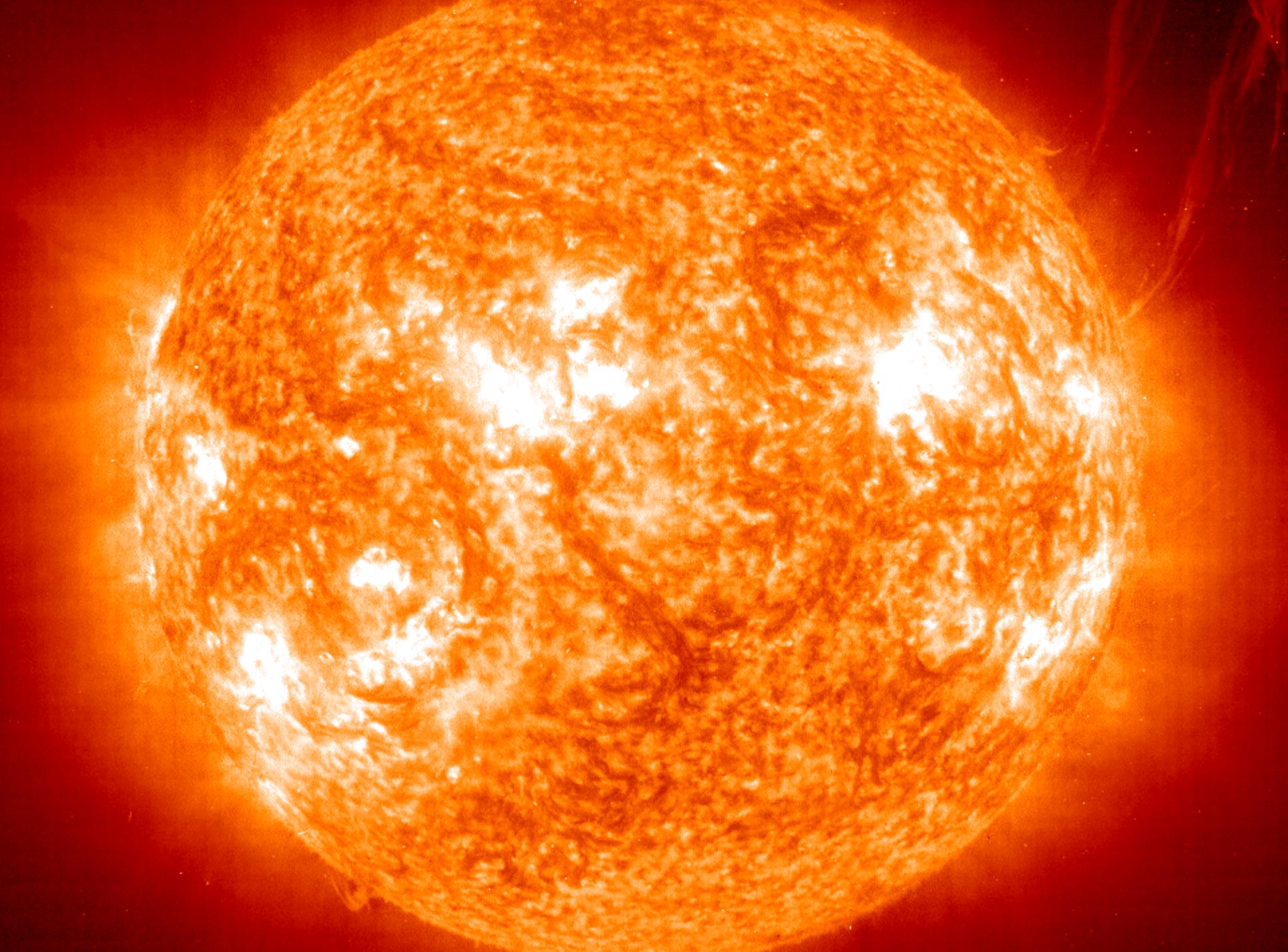
Ces éjections sont issues de l'éruption de protubérances solaires.

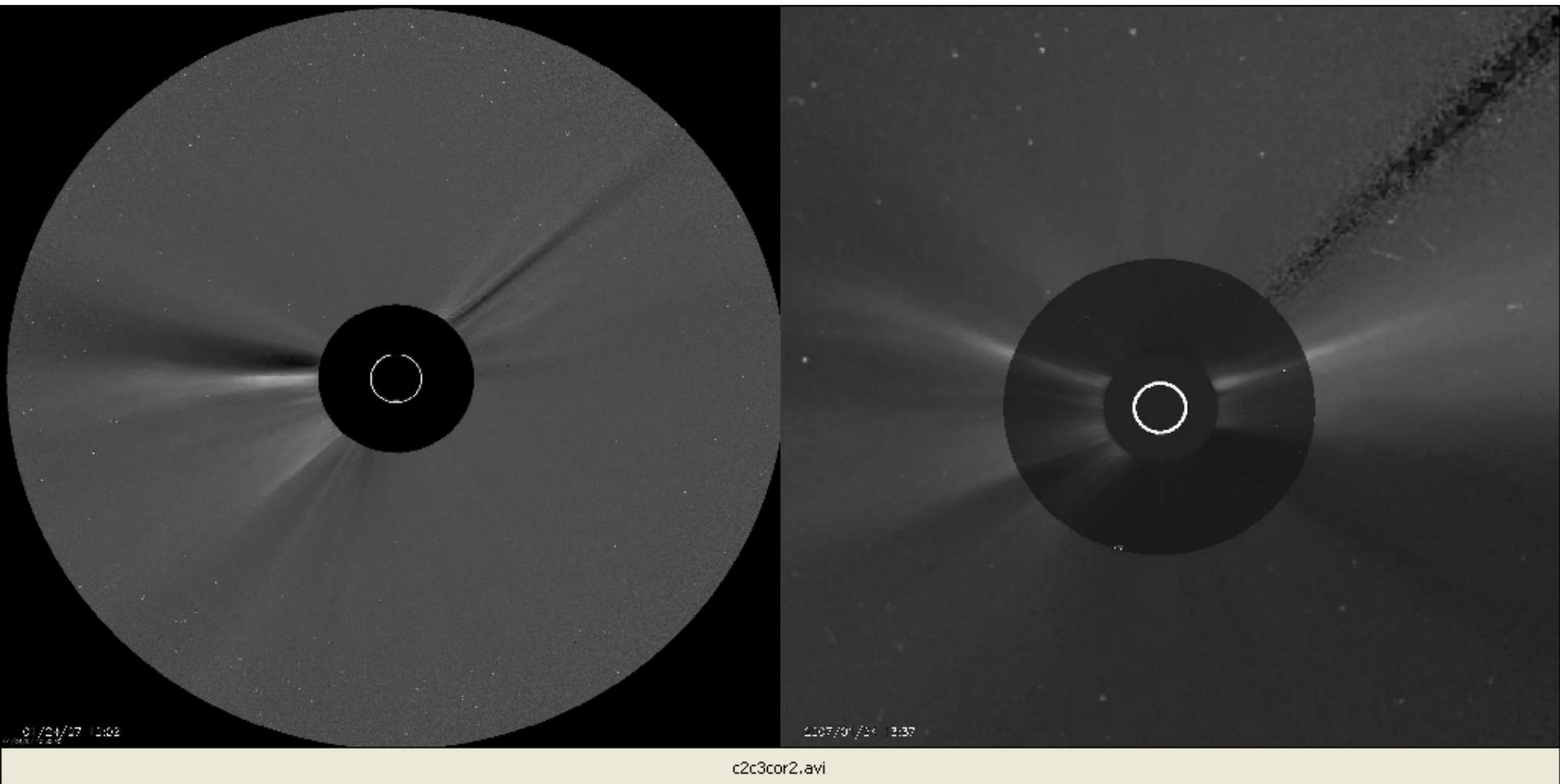
Protubérances

Protubérances/filaments = matière froide ($< 10\,000\text{ °K}$)
dans couronne chaude (1 million $^{\circ}\text{C}$) et ténu

MOVIE_1_quiescent_filament_1_bw_solphys.mov







STEREO (1 coronographe) et SOHO (2 coronographes)

Le suivi d'une éjection de masse coronale du Soleil à la Terre

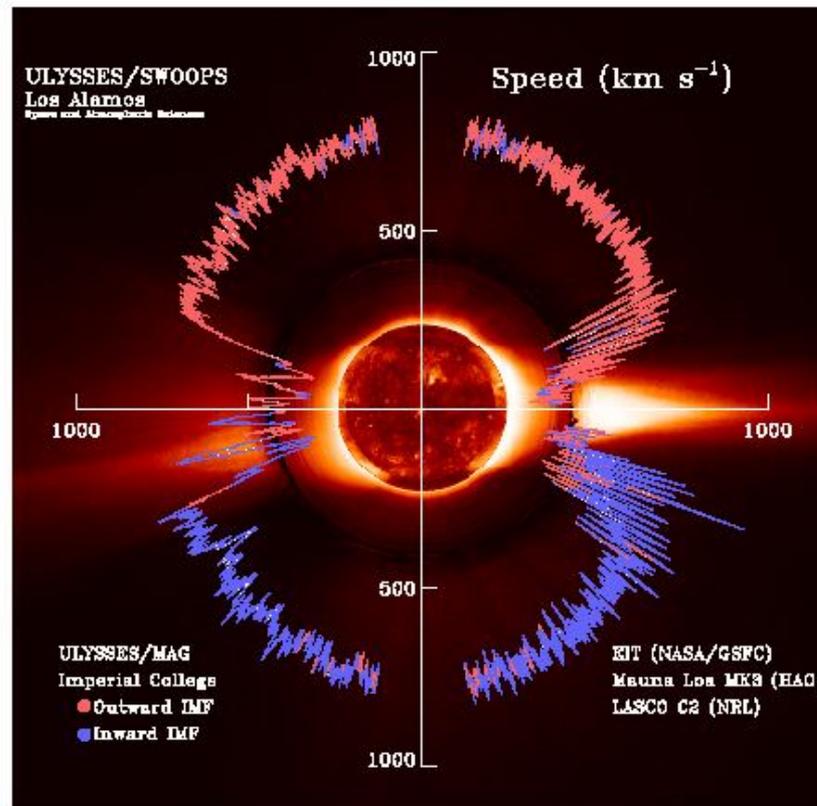
- Coronographe COR2 + 2 imageurs héliosphériques (HI1 & HI2)
- STEREO A et B, lancés le 25 octobre 2006

Histereo.mpg

Quand le Soleil perd du poids : le(s) vent(s) solaire(s)

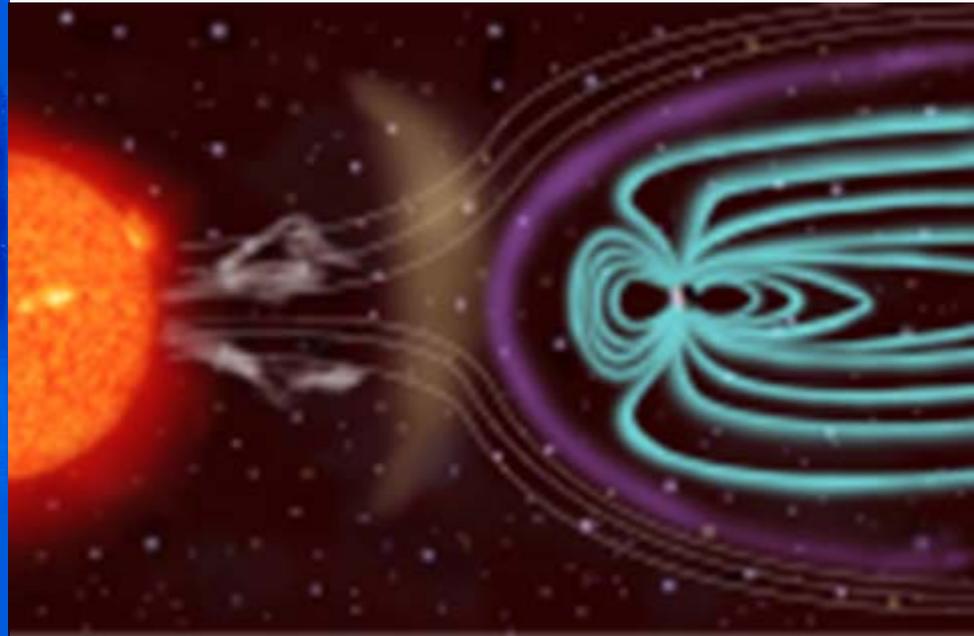
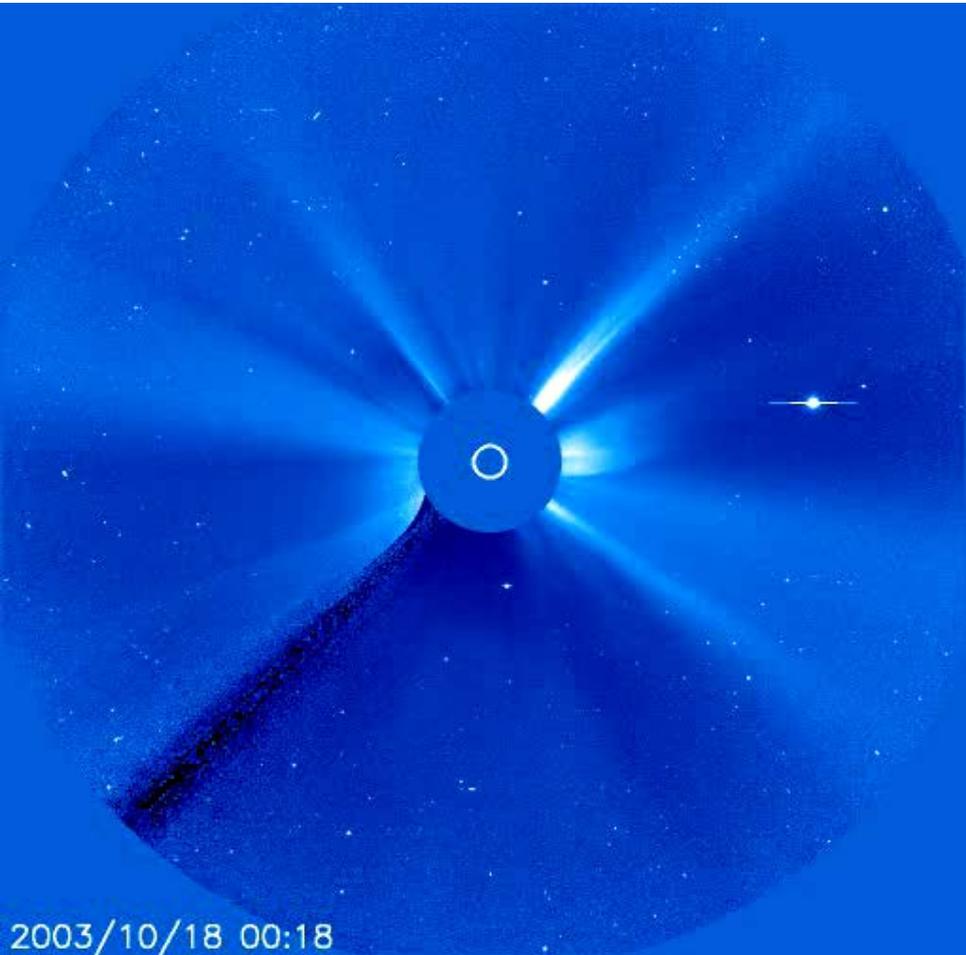
Perte de masse : million de tonnes par seconde

Ce vent est une brise (vitesse entre 400 et 800 km/s)





Nous vivons dans le soleil

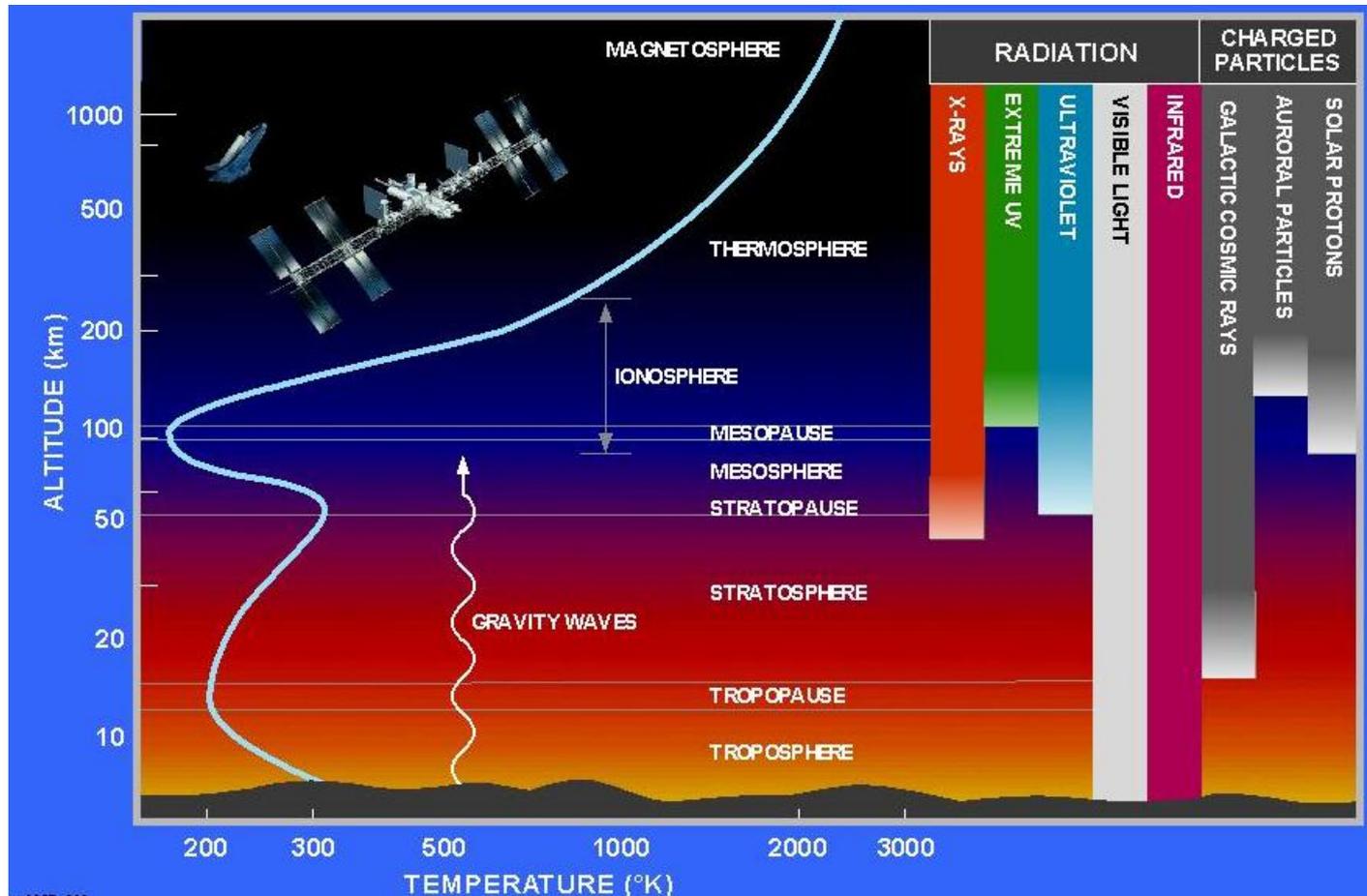


Le Soleil et la Terre

- Soleil =
 - Source de lumière
- et
- Source de particules chargées
 - **Vents solaires** : rapide et lent
 - **Ejections de masse coronale** : nuages de « plasma » de toutes tailles et masses
 - Particules chargées très énergétiques (issues des éruptions)
- +
- Particules TRES énergétiques, d'origine extra-galactique :
les rayons cosmiques
- dont la pénétration dans le système solaire est gouvernée ... par le Soleil

Le Soleil et la Terre

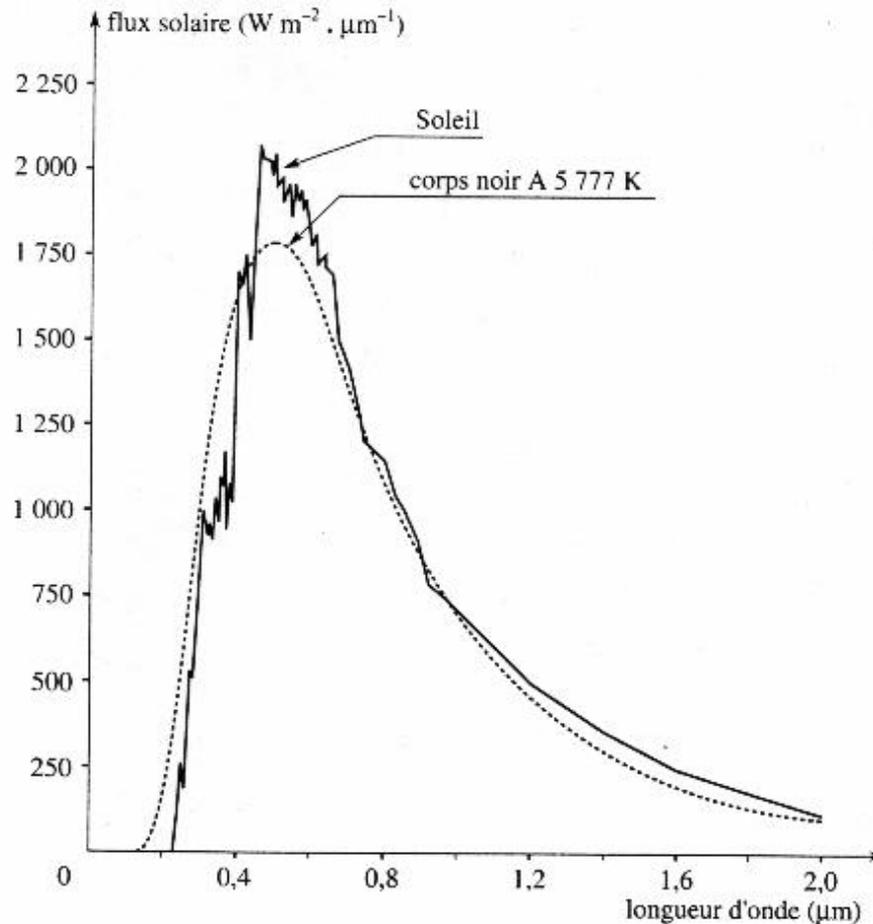
- Et la Terre ?



Le Soleil et la Terre

- Soleil : Source de lumière
 - 1370 W / m² reçus à la Terre (hors atmosphère) (1/4 en moyenne)

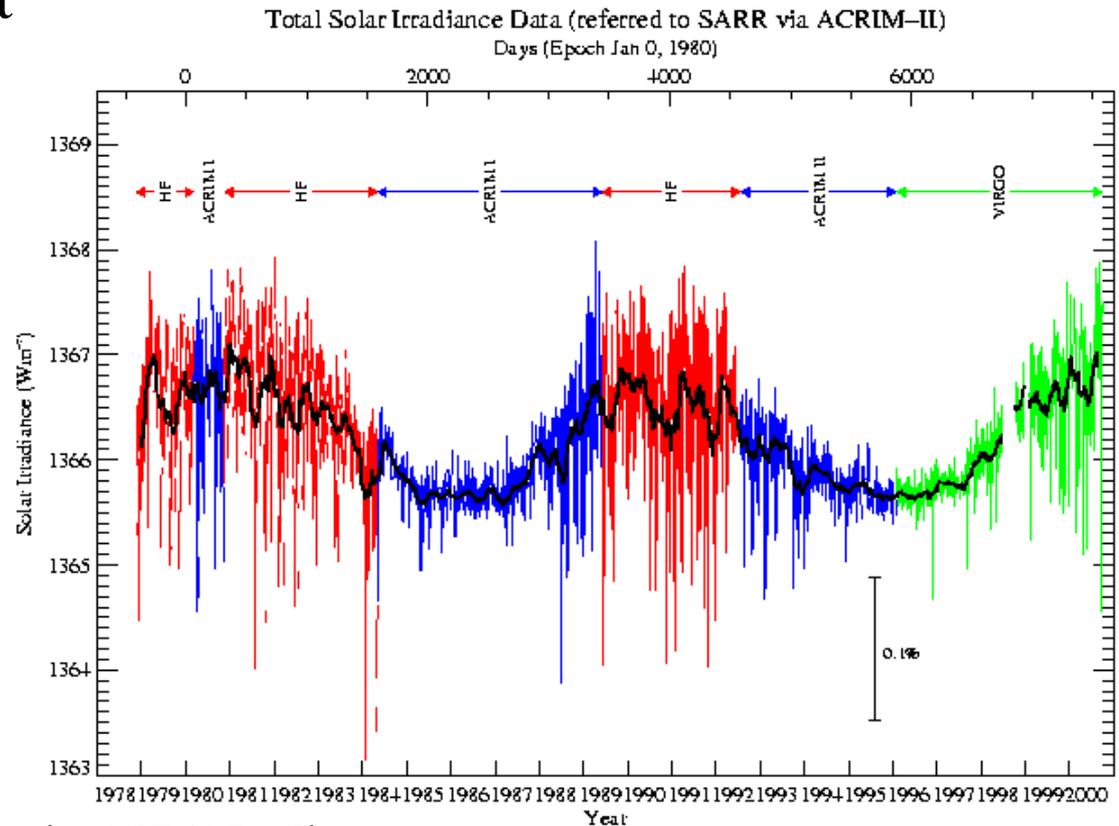
- UV, X, ..
- IR, Radio



Le Soleil et la Terre

Variations de l'ordre de 1 W/m²

Virgo/SOHO : en vert



Remerciements à Claus Fröhlich (VIRGO/SOHO)

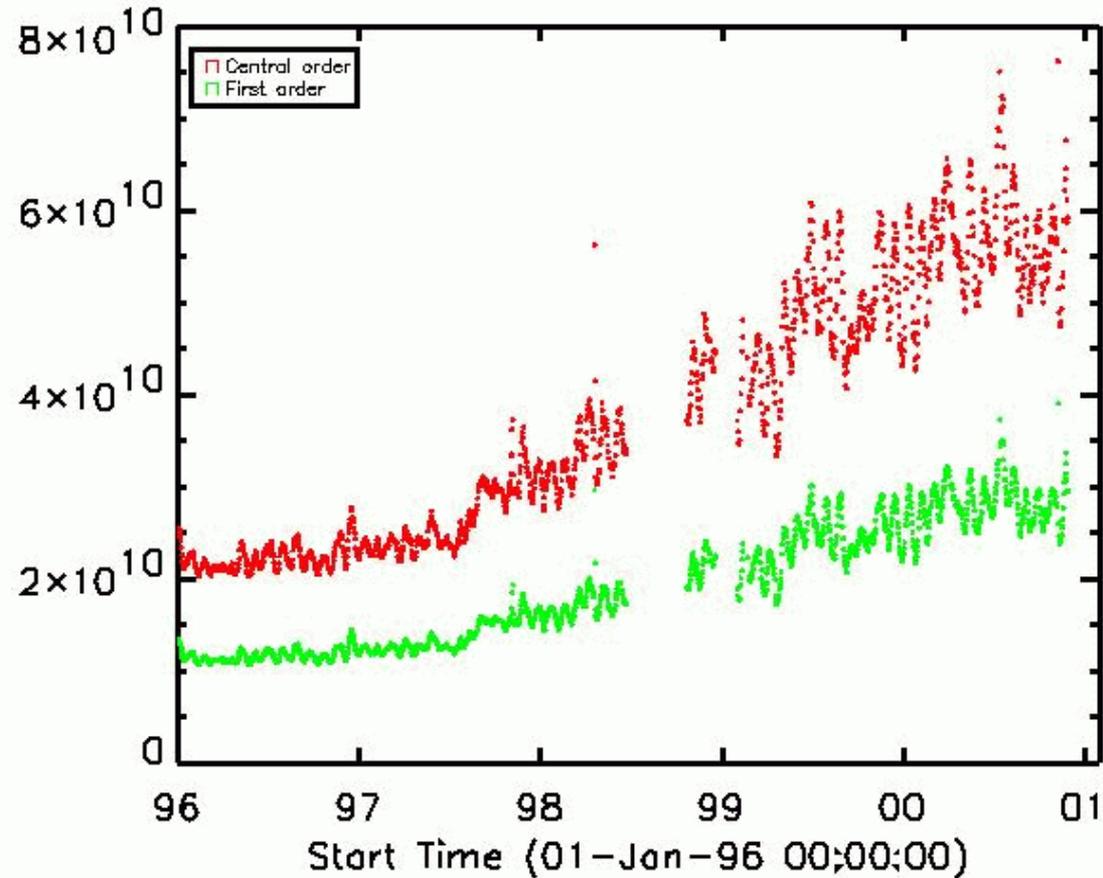
Fröhlich, C., Fröhlich, S., and Schmutz, W., 2000. In collaboration with the VIRGO Team. Dec 01, 2000

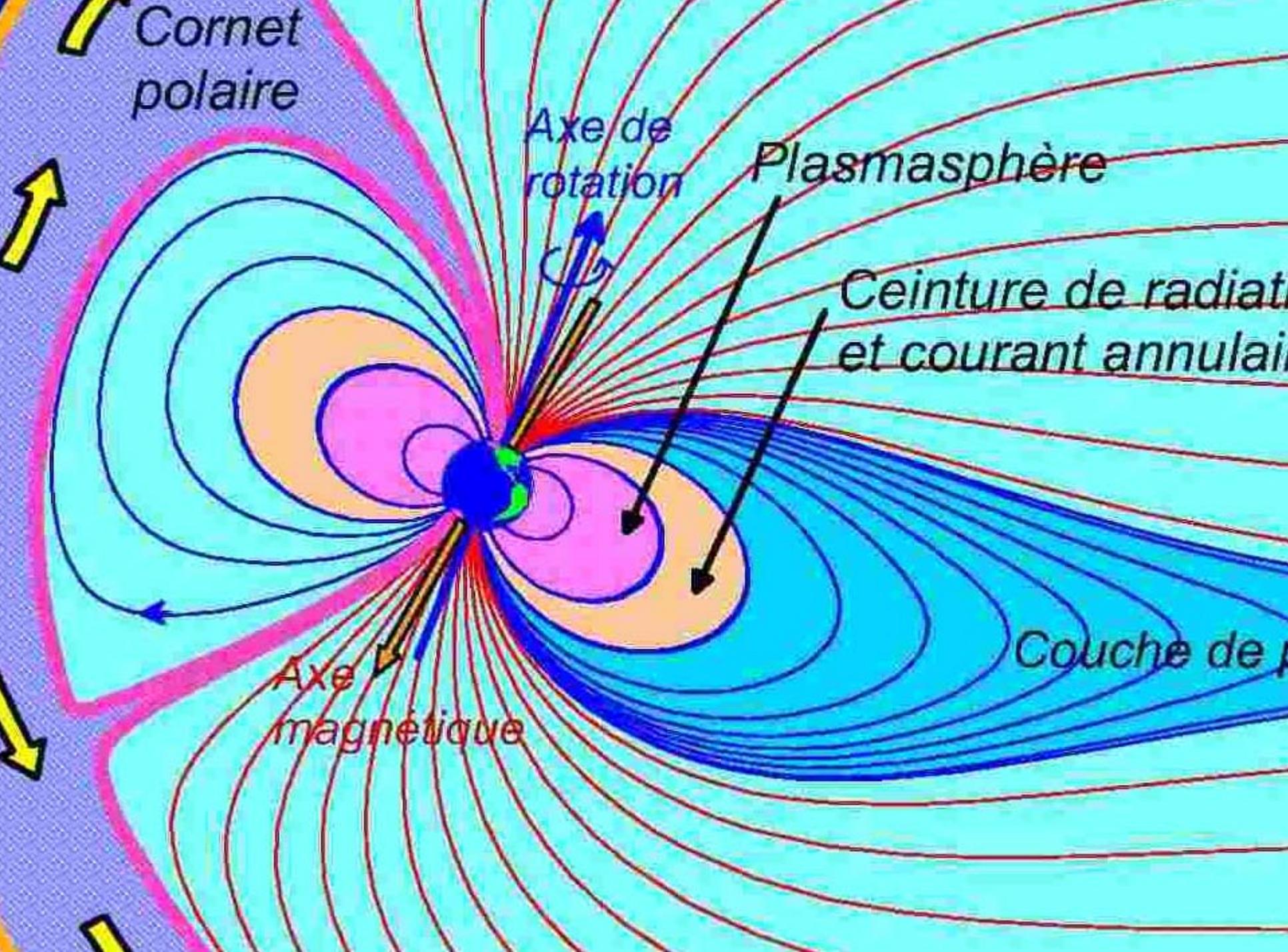
Orsay, JCV, 07/05/2009

Le Soleil et la Terre

- **Variations plus fortes dans l'UV :**
- SEM sur SOHO :
- Vert : 1-50 nm
- Rouge : 30.4 nm (He II)
- Or ce sont ces UV qui vont ioniser l'atmosphère terrestre : l'ionosphère

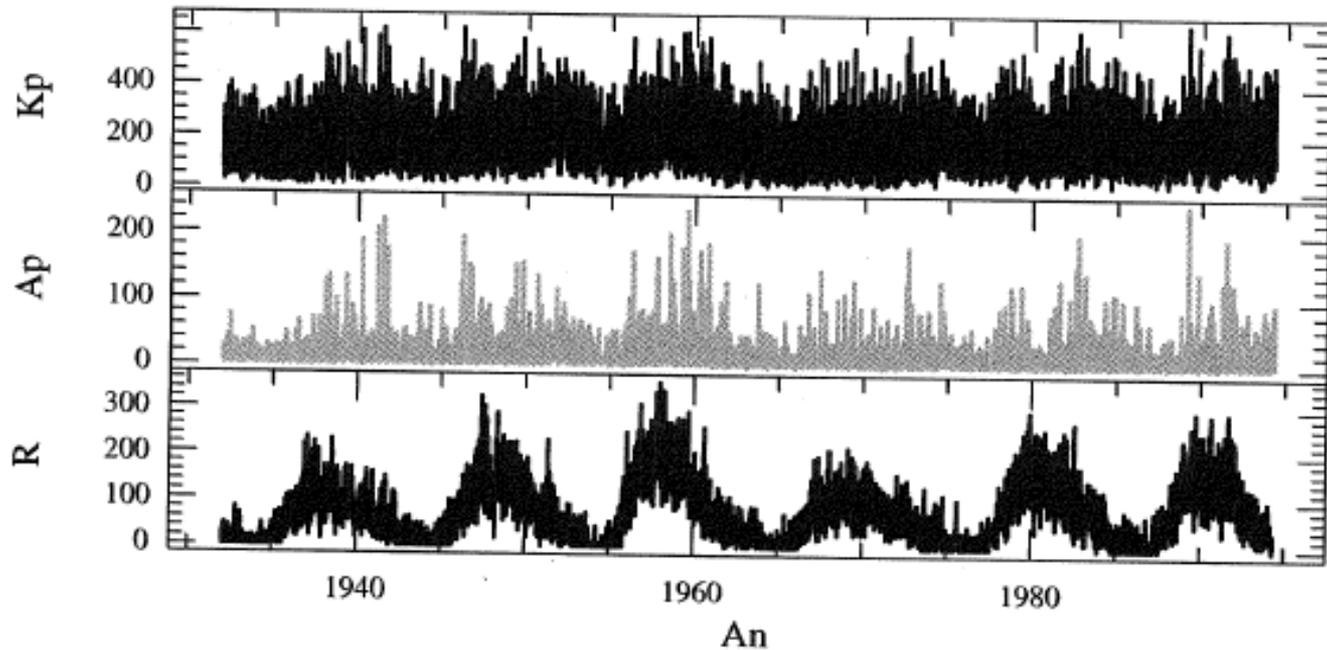
SEM/SOHO





Le Soleil et la Terre

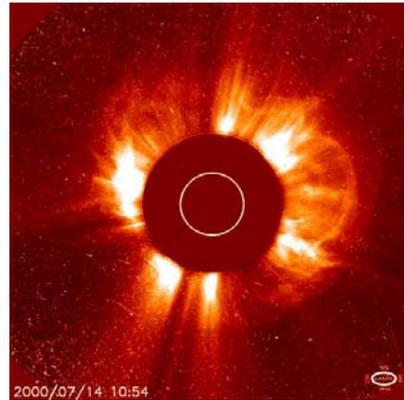
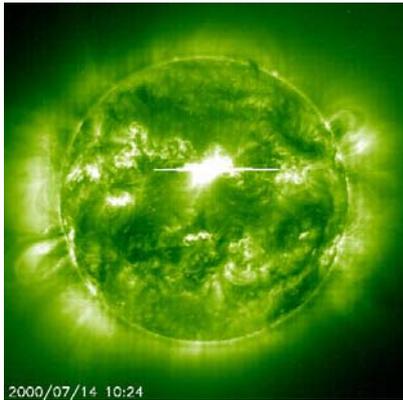
- Magnétisme Terrestre et Activité Solaire



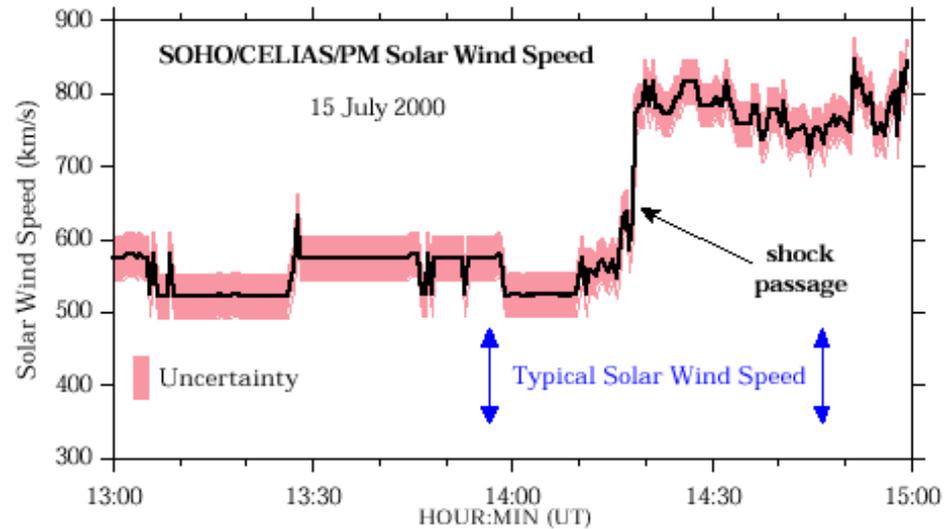
Lilensten & Blelly 1999

Le Soleil et la Terre

- Un exemple : le 14 juillet 2000

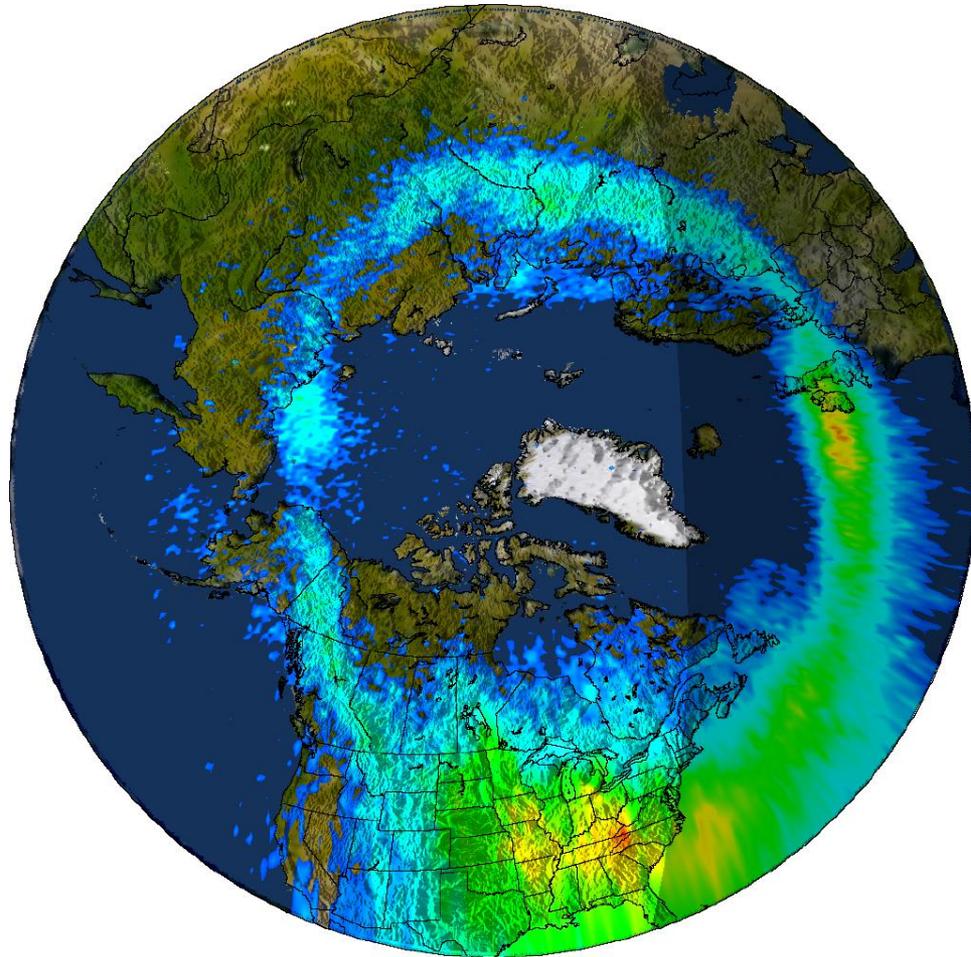


**Ejection de plasma
le 14
En route
vers la Terre !
Arrivée à la Terre
le 15 juillet.**



Le Soleil et la Terre

- **Un exemple : le 14 juillet 2000 (suite et fin):
arrivée à la Terre :
l'ovale auroral**



Le Soleil et la Terre

- **Bouclier fragile aux pôles :**
Aurores boréales



Orsay, JCV, 07/05/2009

Le Soleil et la Terre

- **Les courants induits :**
 - **Dans l'atmosphère ... et sur Terre :**
 - **Lignes électriques : disjonction des réseaux (aux tensions de plus en plus élevées et de plus en plus interconnectés)**
13 mars 1989 : 6 millions de Québécois dans le noir pendant 9 heures ...
 - **Transformateurs : Delaware (EU), mars 1989 (10 millions \$)**
 - **Corrosion pipelines (Alaska, Scandinavie)**

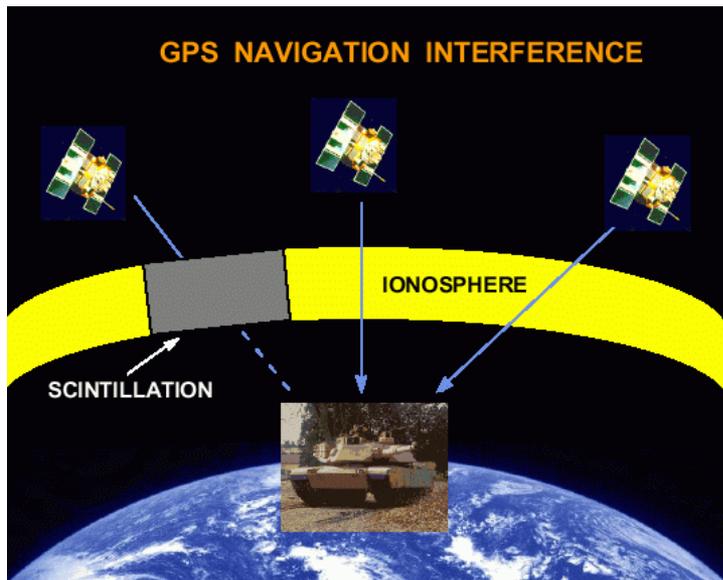


Le Soleil et la Terre

Scintillations dans l'ionosphère (variations locales de densité électronique) :

Plus fortes aux lever-coucher de Soleil, aux équinoxes, **en période de maximum d'activité solaire**

Erreurs de positionnement (jusqu'à 100 m)



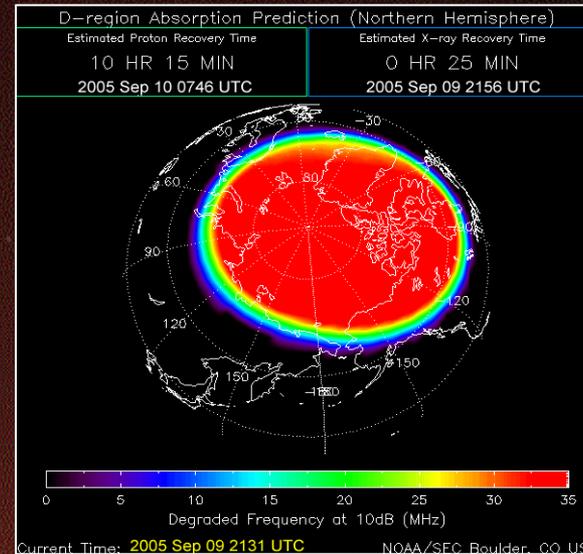
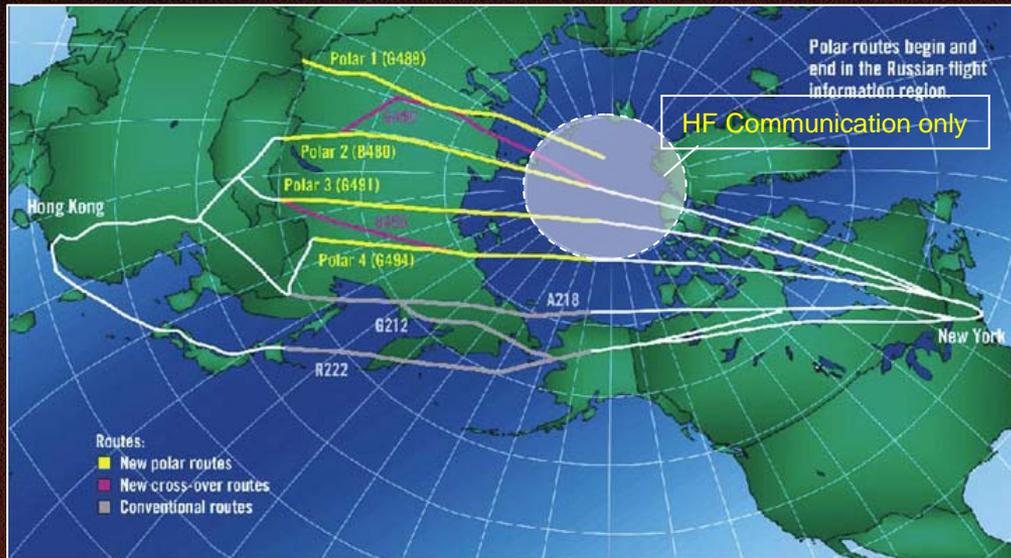
Le International GPS Service se sert du GPS pour mesurer les perturbations ionosphériques

Données immédiatement disponibles à tous (www) !

Le Soleil et la Terre

- **Les pannes de satellites :**
 - **De l'anomalie réparable (erreur électronique) ou la dégradation lente (panneaux solaires)**
 - **A la panne fatale :**
 - Telestar 401 (Jan 11 1997) (la télé...)
 - Galaxy IV (1998) (les mobiles...)
 - **500 millions \$ perdus en 4 ans à cause des orages solaires ? (anomalies pas forcément toutes rapportées ...)**

Les routes polaires des compagnies aériennes



Courtesy
NASA

- Les vols polaires (à l'intérieur du cercle 82°) utilisent les liaisons HF (3 – 30 MHz).
- La Federal Aviation Regulation Sec. 121.99 – aircraft impose une liaison radio sur TOUT le trajet.
- Les compagnies aériennes re-routent souvent les vols hors des passages polaires pendant les orages magnétiques au prix de près de \$100,000 par vol.

Le Soleil et la Terre

- **Les humains : particules solaires à hautes énergies**

Sorties dans l'espace :



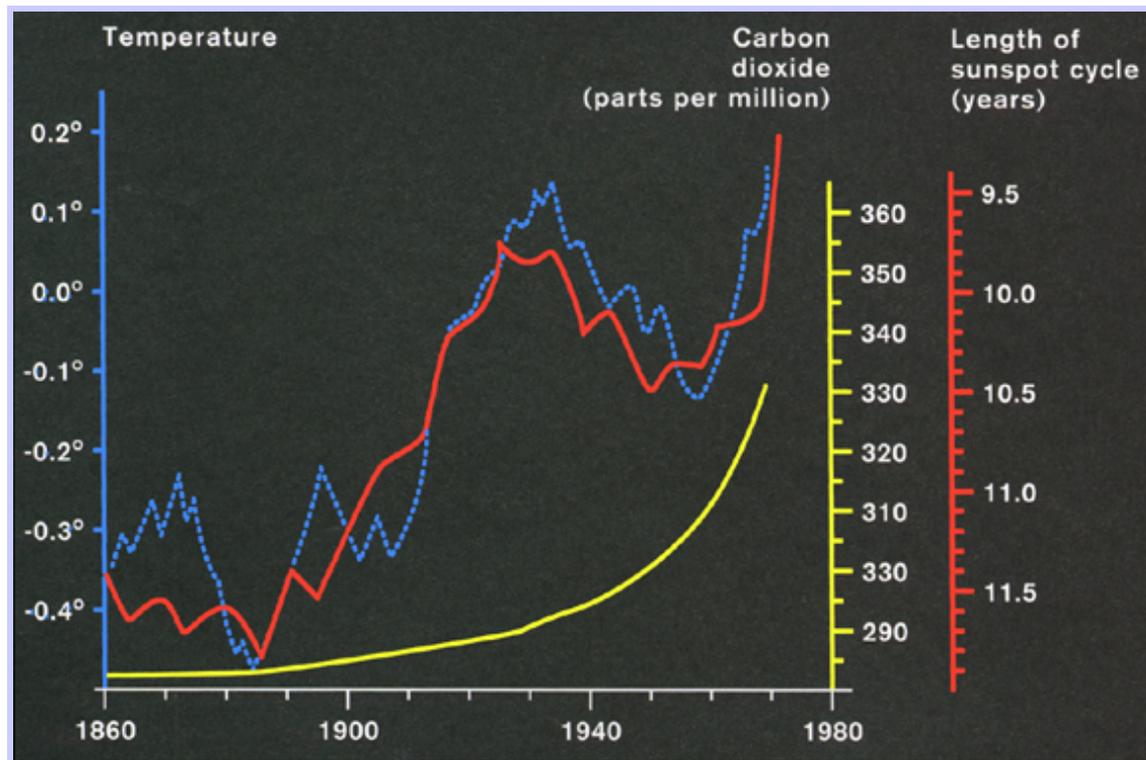
Navette, ISS, ... OK

**Exploration de la Lune et de Mars
...!!!**

- **Equipages et passagers aériens :**
 - **Vols stratosphériques**
 - **SIEVERT : service d'alerte sur les doses encourues**

Vers une météorologie de l'espace

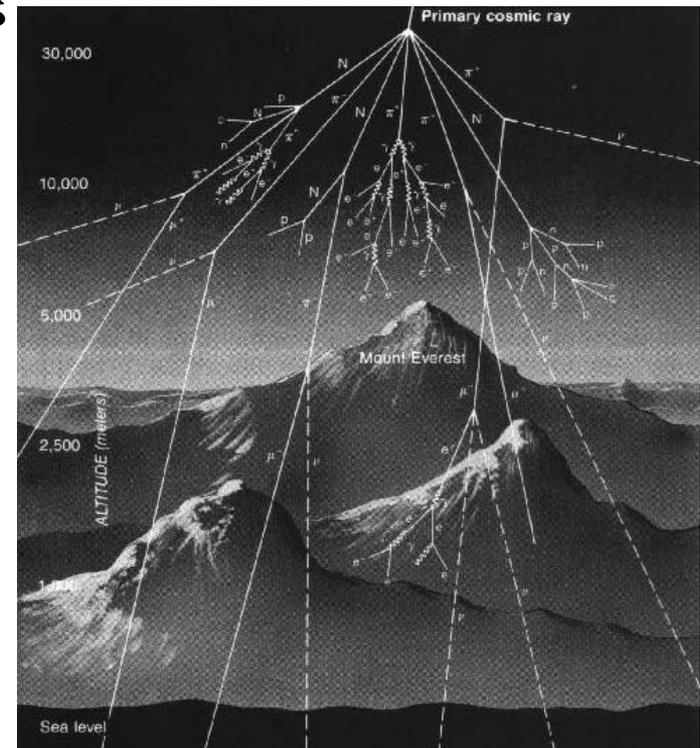
- Mesurer l'impact des cycles solaires sur le climat :



Vers une météorologie de l'espace

- Comprendre les mécanismes d'impact des cycles solaires sur le climat :

De nouveaux candidats : les rayons cosmiques et leur effet sur les nuages

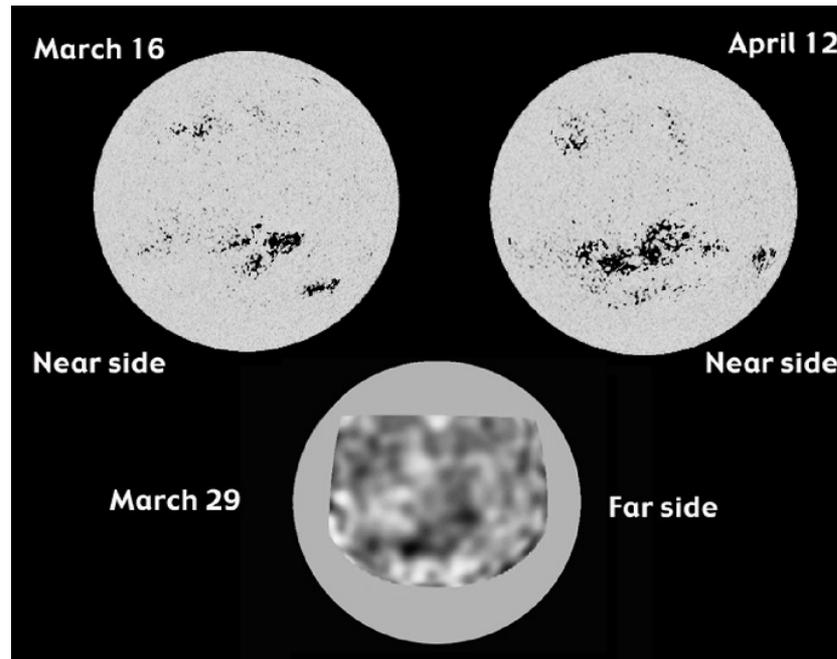


Vers une météorologie de l'espace

- **Prévoir : voir la face cachée du Soleil :**

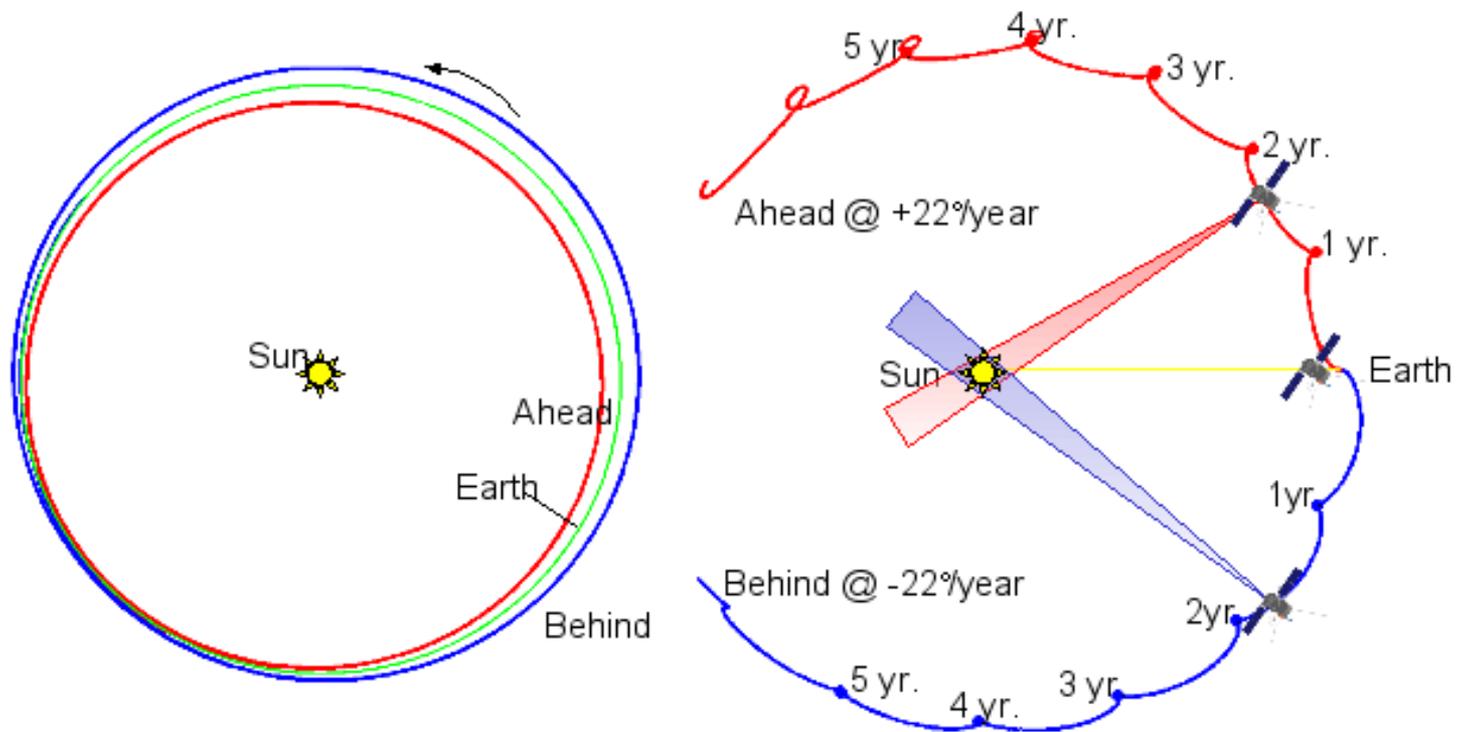
Grâce à des techniques combinant information sismique et holographie, on peut « voir » la face cachée du Soleil et détecter les éruptions de derrière !

STEREO



Orsay, JCV, 07/05/2009

Les deux sondes STEREO

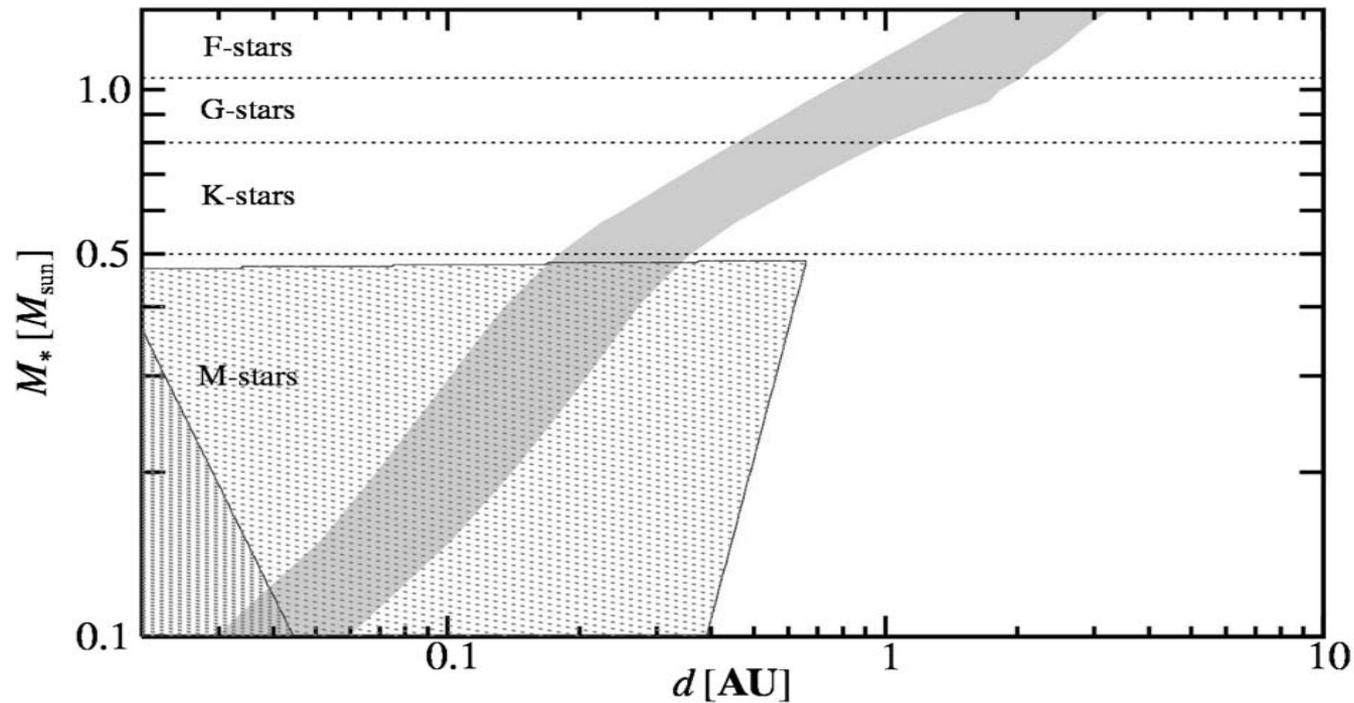


Questions

- **D'autres Terres ?????? Oui !!**
- **Habitées ?**
 - **Quelques conditions (nécessaires) de maintien de la vie :**
 - **Rayonnement, particules issues de l'étoile mère : « raisonnables »**
 - **Variations « modérées » de l'étoile ...**

Soleil : une étoile active et éruptive parmi d'autres

Influence des CME (éjections de masse coronale) sur l'habitabilité des planètes

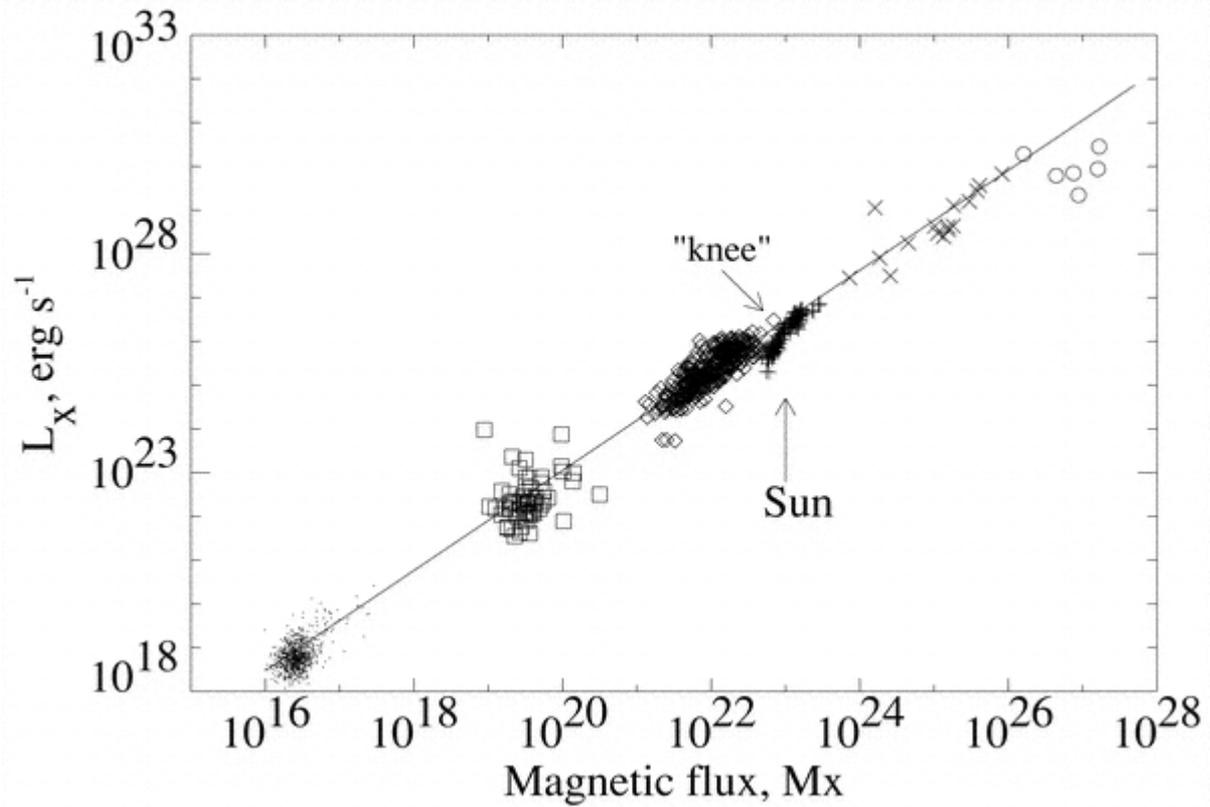


(Khodachenko et al., 2007, Astrobiology)

Orsay, JCV, 07/05/2009

Questions

- D'autres Terres ?????? Oui !!
- Habitées ?
 - Quelques conditions (nécessaires) de maintien de la vie :
 - Rayonnement, particules issues de l'étoile mère : « raisonnables »
 - Variations « modérées » de l'étoile ...
- Comparer l'activité du Soleil avec celle d'autres étoiles (de « type solaire » ou non)



Pevtsov et
al. 2003

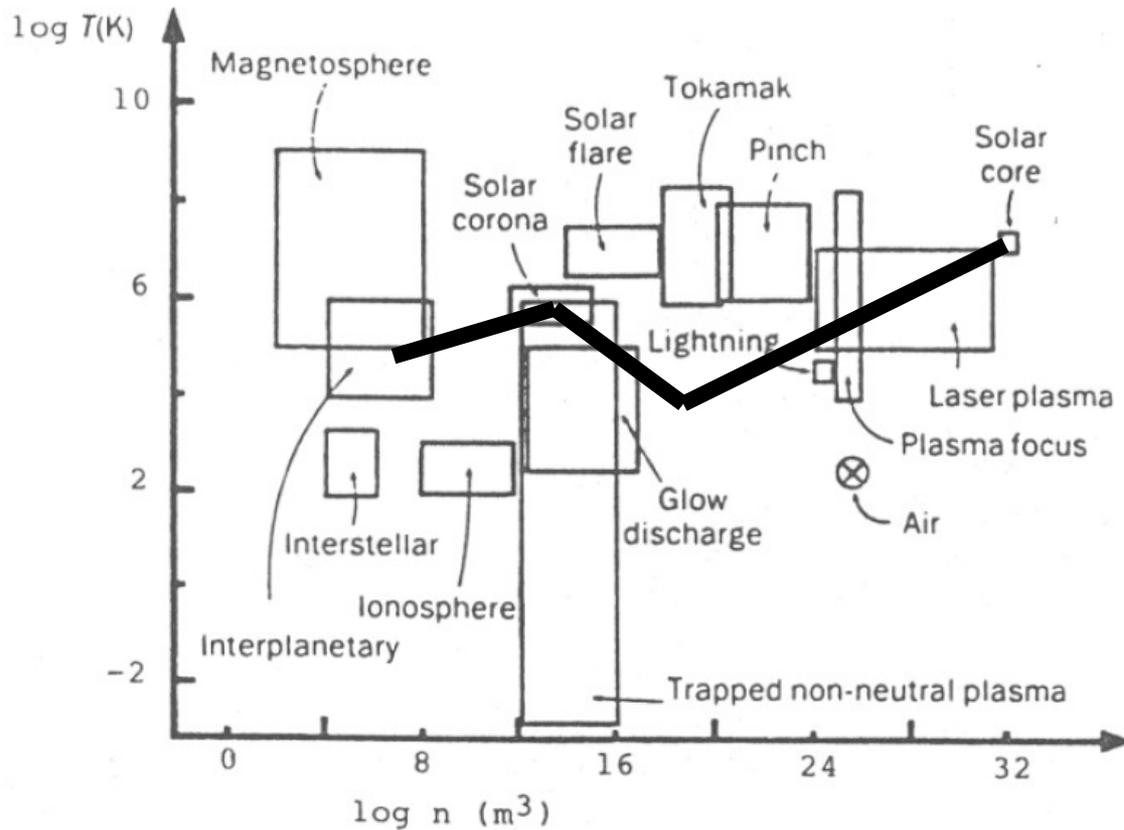
Fig. 1.— X-ray spectral radiance L_X vs. total unsigned magnetic flux for solar and stellar objects. Dots: Quiet Sun. Squares: X-ray bright points. Diamonds: Solar active regions. Pluses: Solar disk averages. Crosses: G, K, and M dwarfs. Circles: T Tauri stars. Solid line: Power-law approximation $L_X \sim \Phi^{1.15}$ of combined data set.

Questions

- **Pour Notre Terre :**

Explorer, mesurer, comparer, comprendre,
tous les paramètres « externes » qui modifient
notre environnement : et en particulier le Soleil et
ses relations avec la Terre

Le Soleil, vaste laboratoire de plasmas



Petrasso , *Nature*, 1990

Questions

- **Pour Notre Terre :**

Explorer, mesurer, comparer, comprendre, tous les paramètres « externes » qui modifient notre environnement : et en particulier le Soleil et ses relations avec la Terre

(Essayer de) prévoir/prédire

Ne pas oublier les facteurs anthropogéniques

(lire par exemple « Surviving 1000 centuries : can we do it? », R.M. Bonnet & L. Woltjer, 2008, Springer Verlag)

