



Le Soleil: une étoile magnétique et active, source de particules énergétiques

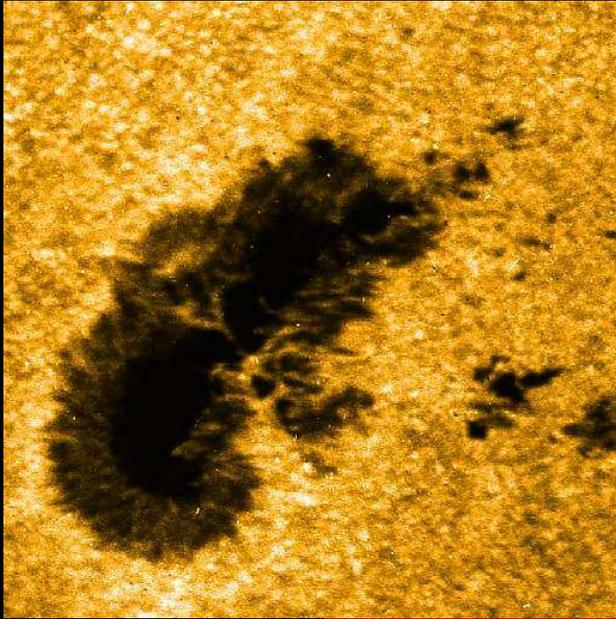
Nicole Vilmer
LESIA
Observatoire Paris



Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Conférence du bureau des longitudes
7 Mars 2012

Le Soleil et son influence sur la Terre



Taches à la surface du Soleil



Aurores boréales



Fiche d'identité du Soleil

Age : 4,5 milliards d'années Rayon : 696 000 km (110 * rayon Terre)
Masse : 1,99 1030 kg (333000 * masse Terre)

Composition chimique (en nombre d'atomes) : Hydrogène : 94 %,
Hélium : 6 %, et des traces principalement des éléments suivants :
Oxygène, Carbone, Azote, Magnésium, Néon, Silicium, Fer, Soufre, Calcium, Argon,
Sodium, Aluminium,... (tous les éléments sont présents)

Densité moyenne : 1410 kg/m³

Gravité à la surface : 274 m/s² (28 * gravité Terre)

Luminosité (énergie lumineuse totale rayonnée /s) : 3.9×10^{23} kW
Température de Surface : 5800 K (effective)

Température de Couleur : 6200 K (pic d'émission dans le vert à 470 nm)

Rotation sur lui-même (rotation sidérale) : 25 j à l'équateur, 37 j aux pôles

Perte de masse : 1 milliard de kg/s

Distance moyenne (Terre) : 149 597 892 km

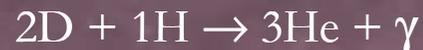
Structure interne du Soleil

-**le coeur** : siège des réactions thermonucléaires

6,3 10^{14} J par kg d'Hydrogène

610 millions de tonnes d'H brûlées / s (comparé à 2×10^{27} tonnes)

10^{38} réactions/seconde



émission de neutrinos et de rayonnement gamma



-**la zone radiative** : transport de l'énergie par rayonnement
au-delà de 175000 km du centre, arrêt des réactions nucléaires

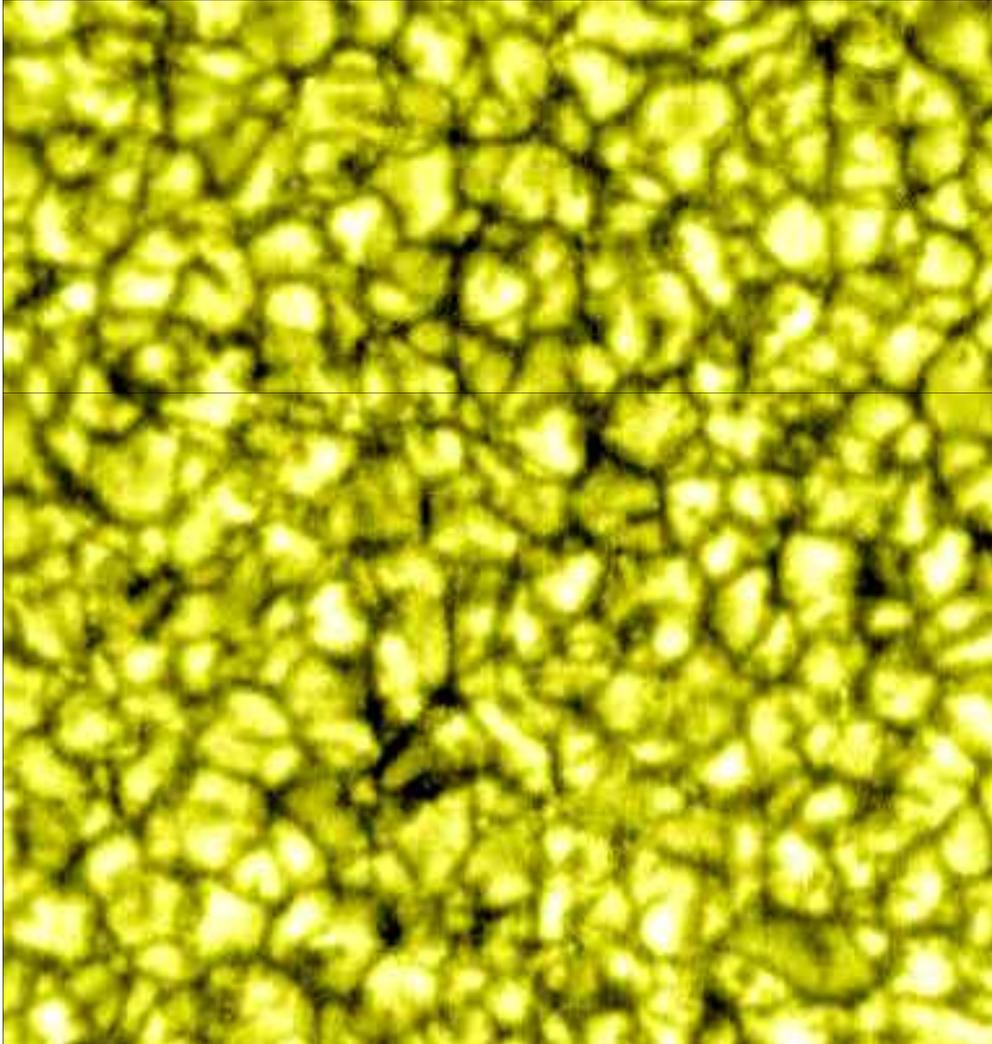
Rayonnement gamma diffusé par les particules chargées
se propage vers l'extérieur

La température passe de $15 \cdot 10^6$ à $2 \cdot 10^6$ K.

Milieu très dense : 1 000 000 années pour traverser la zone

-**la zone convective** : énergie transportée par convection car
rayonnement absorbé par H et He devenus froids : la matière
chaude monte et la matière froide descend: granulation solaire

Le Soleil : une étoile qui rayonne



Granulation à la surface

- *Taille : 1000 km (entre 150 km et 2500 km).*
- *Durée de vie : 10 à 15 minutes.*
- *Vitesse : La vitesse des granules individuels est de l'ordre de 2 km/s, soit 7200 km/h.*

$$\Delta T = 400K$$

Un photon émis au coeur met 1 million d'années avant d'atteindre la surface ;
les multiples absorptions/ré-émissions subies au cours de sa progression du coeur vers la surface ont transformé sa longueur d'onde :
gamma ,X, UV, visible

Le Soleil : une étoile qui rayonne

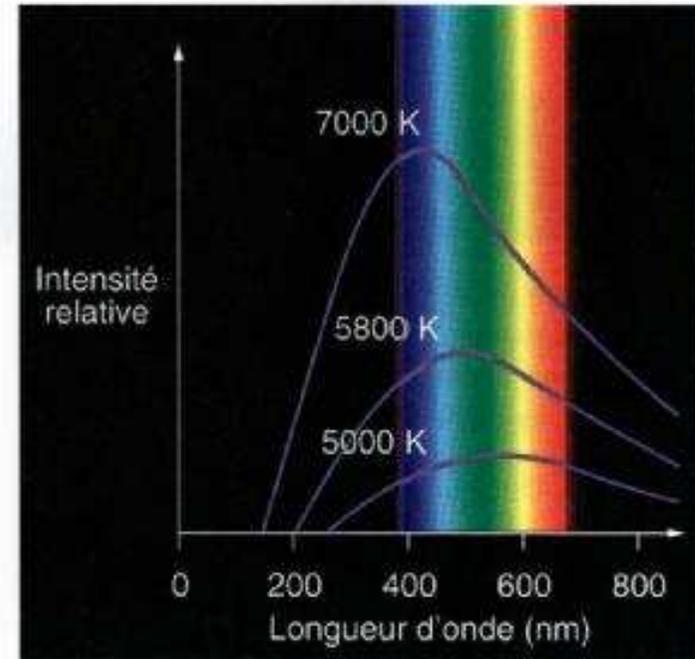
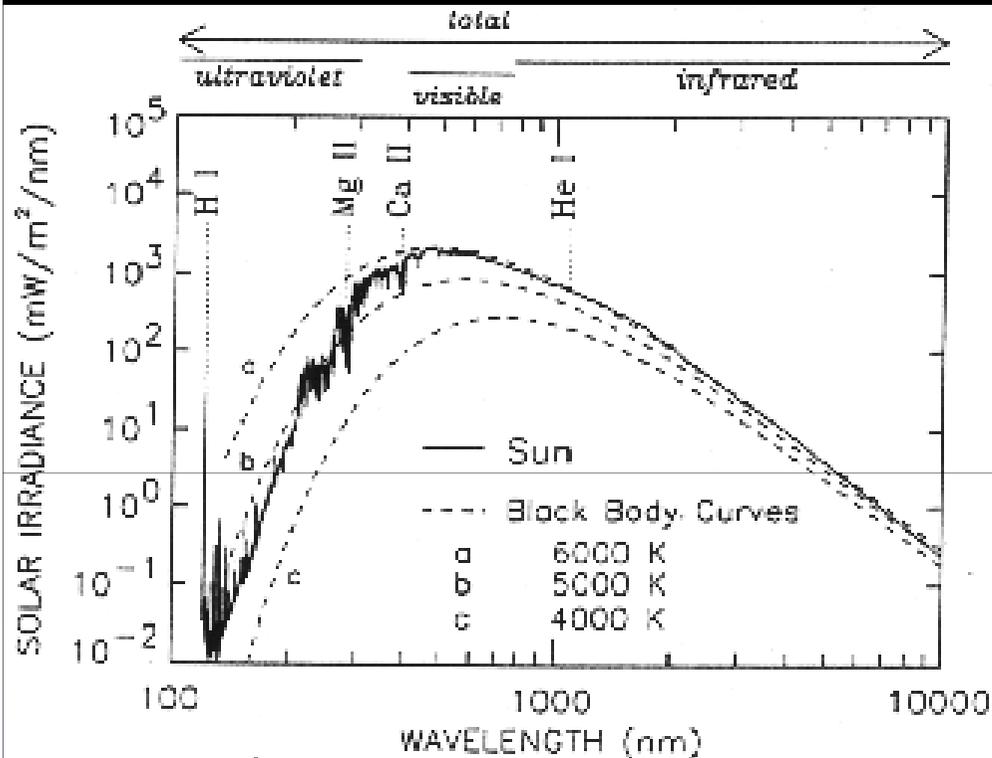


Figure 5.2

$$\lambda_{\max} T = \text{Cte (loi de Wien)}$$

Le maximum d'émission du Soleil est dans le bleu-vert

Absorption par l'atmosphère terrestre
Sensibilité de l'œil

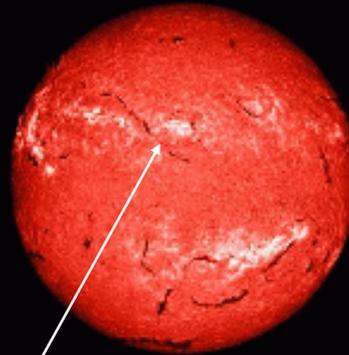
⇒ Nous voyons le Soleil jaune...

SPECTROHELIOGRAMMES

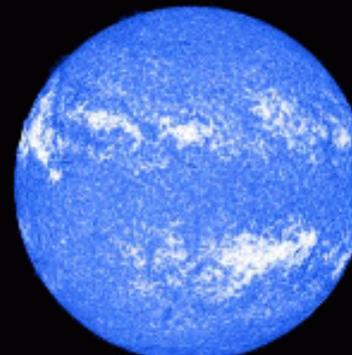
L'atmosphère du soleil

Quelques rappels sur les observations de l'atmosphère solaire

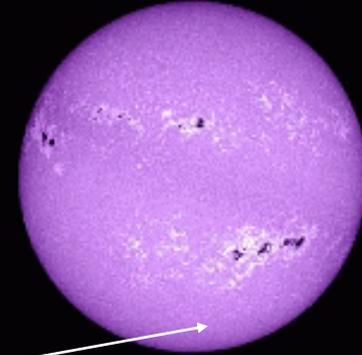
Dans le visible



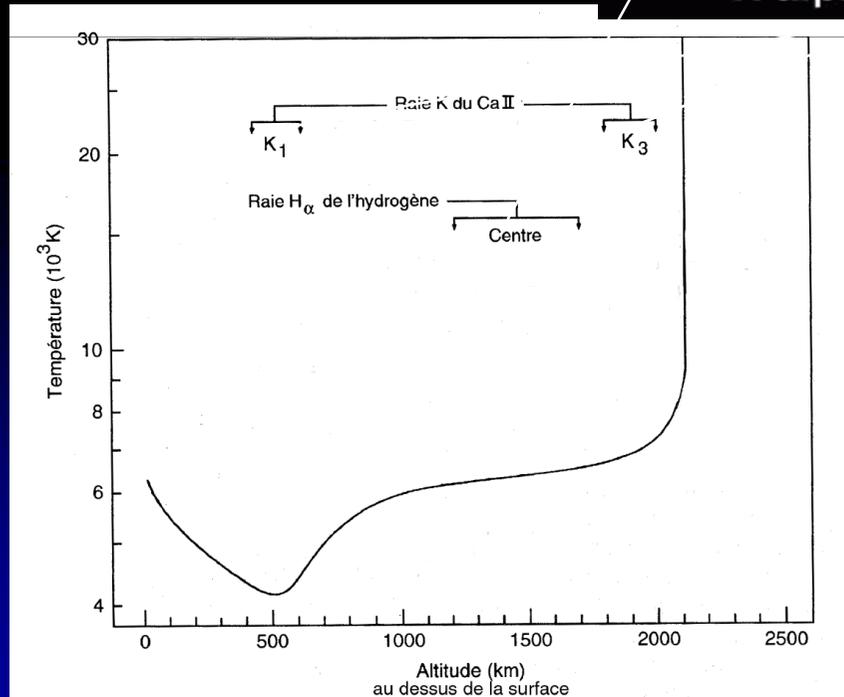
H alpha



K3



K1v



Altitude de formation de raies et du continu dans la chromosphère.

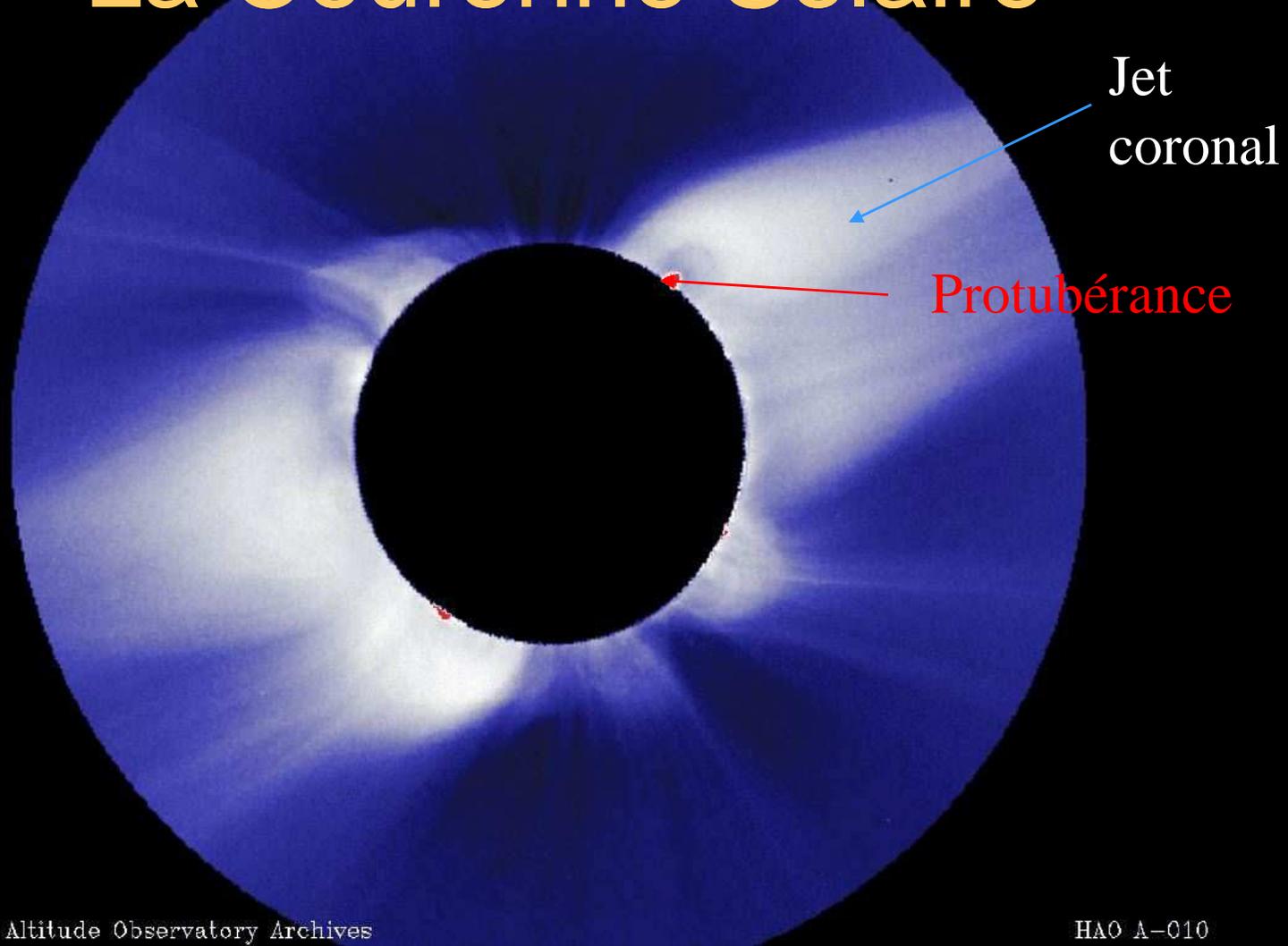
L'activité solaire est lié aux champs magnétiques

Les phénomènes éruptifs solaires se produisent dans l'atmosphère solaire

Observations régulières faites à Meudon
<http://bass2000.obspm.fr/home.php>

18 March 1988; White Light

La Couronne Solaire



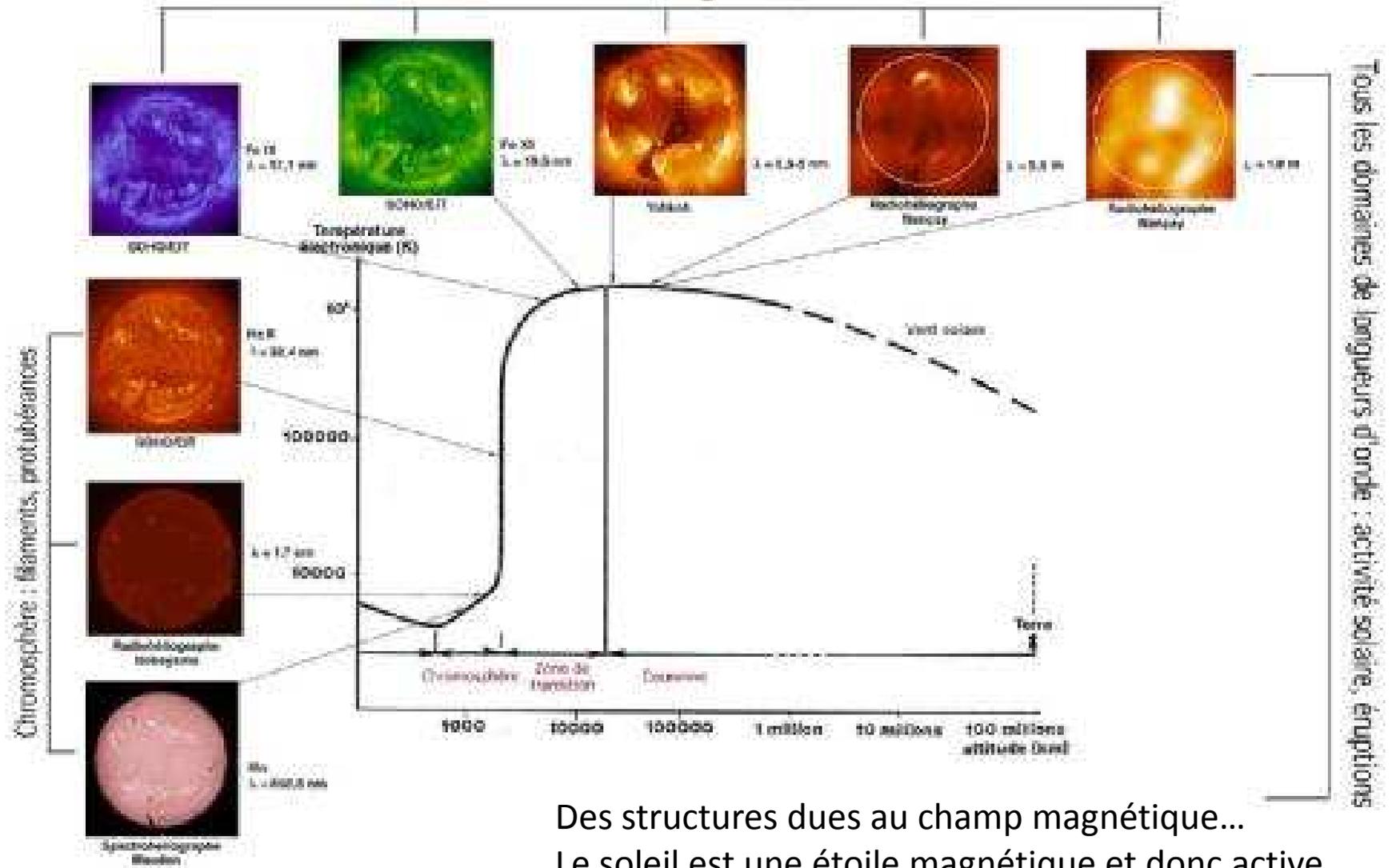
Source: High Altitude Observatory Archives

HAO A-010

... un plasma chaud ($>10^6$ K) plus chaud que la surface, structurée par le champ magnétique

Bien observée en rayons X/EUV et en ondes radio

Couronne solaire : boucles magnétiques, trous coronaux

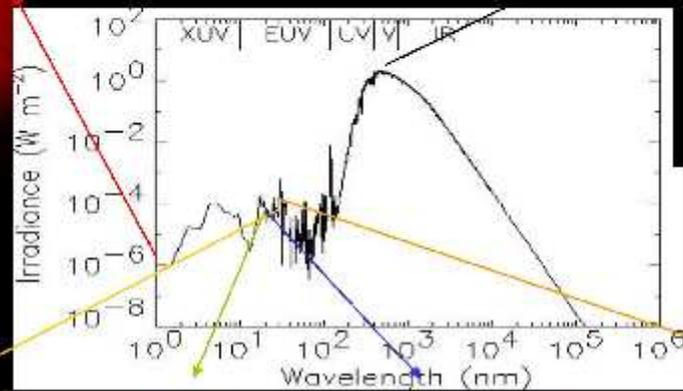


Des structures dues au champ magnétique...
Le soleil est une étoile magnétique et donc active

Le Soleil : une étoile qui rayonne



YHOKHO/SXR
 $\lambda \sim 1 \text{ nm}$
 $\log T = 6.5 - 8$



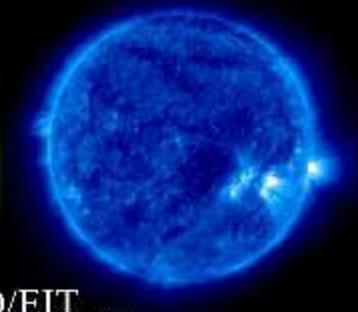
Lumière blanche,
 $\lambda = 500 - 700 \text{ nm}$
 $\log T = 3.8$



2005/10/13 13:36
 Fe XV, $\lambda = 28.4 \text{ nm}$
 $\log T = 6.6$



005/10/13 13:36
 Fe XII, $\lambda = 19.4 \text{ nm}$
 $\log T = 6.2$



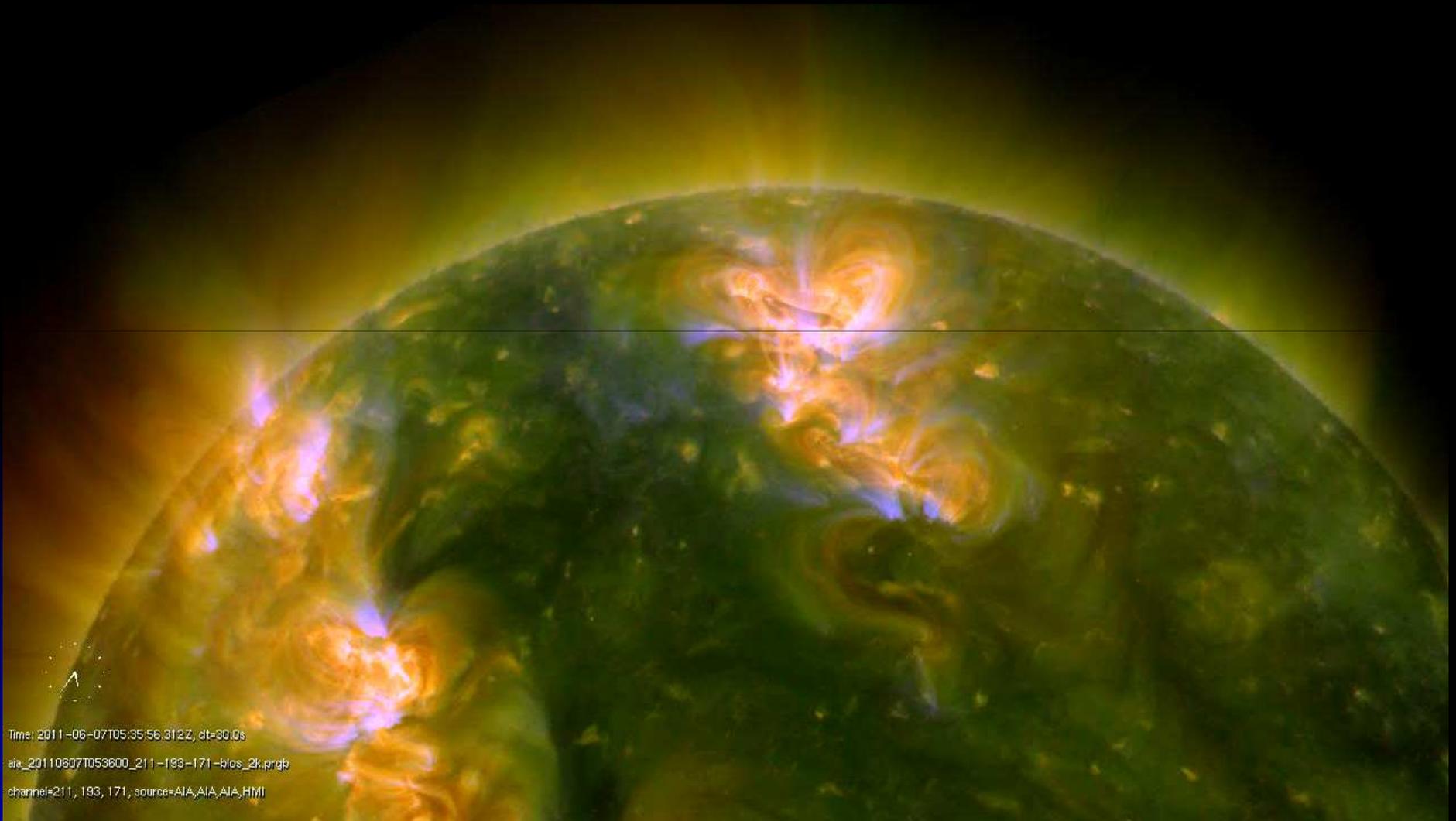
2005/10/13 13:00
 Fe IX/X, $\lambda = 17 \text{ nm}$
 $\log T = 5.9$



2005/10/13 07:18
 He II, $\lambda = 30.4 \text{ nm}$
 $\log T = 5.2$

SOHO/EIT

Le Soleil: une étoile active !



Time: 2011-06-07T05:35:56.312Z, dt=30.0s
aia_20110607T053600_211-193-171-blos_2k.prgb
channel=211, 193, 171, source=AIA,AIA,AIA,HMI

SDO/AIA: 211 A (2 MK) ; 193 (1.6MK) ; 171
(0.6MK)

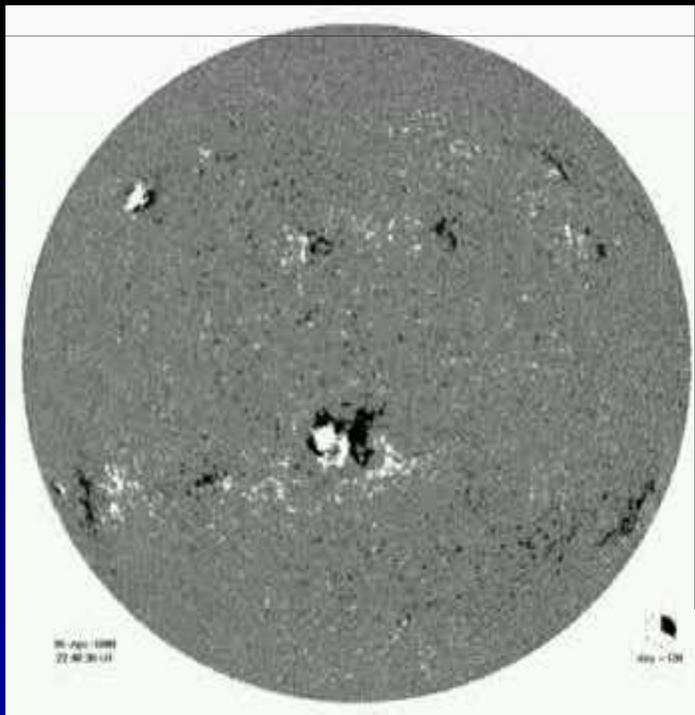
Le Soleil: une étoile magnétique !

Le champ magnétique est généré dans la zone de convection sous la surface (~1/3 du rayon solaire)

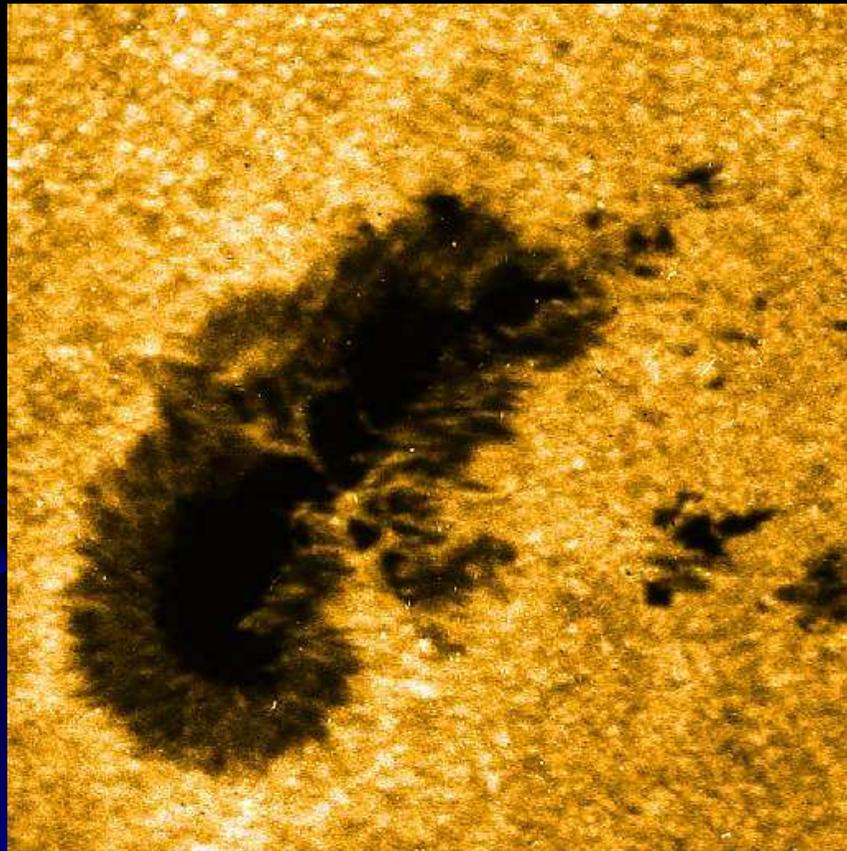
produit par les courants électriques = écoulements de plasma (gaz de particules chargées)

Taches: une des manifestations externes du champ magnétique interne.

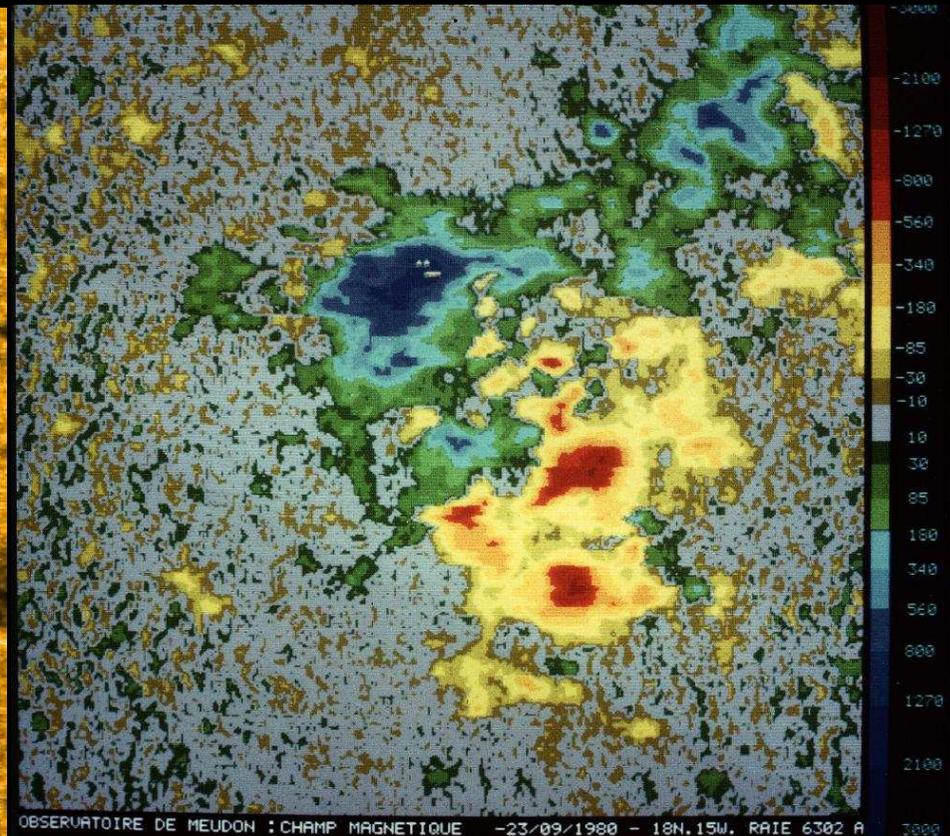
B sur les petites échelles est remplacé en 40h.



Un ingrédient essentiel: Le Champ magnétique à la surface du Soleil

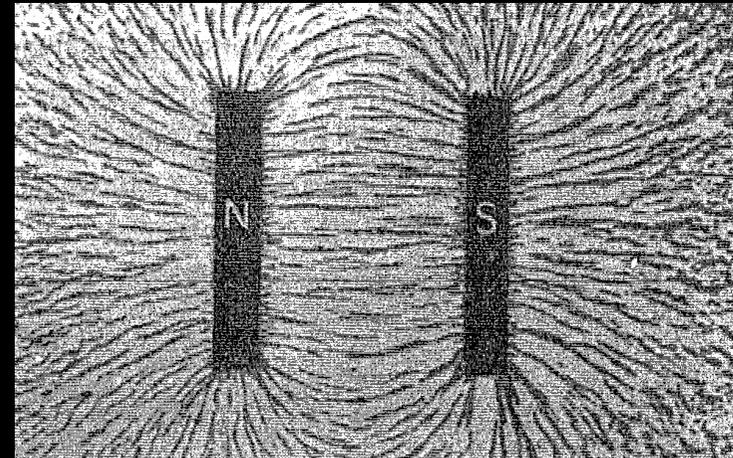
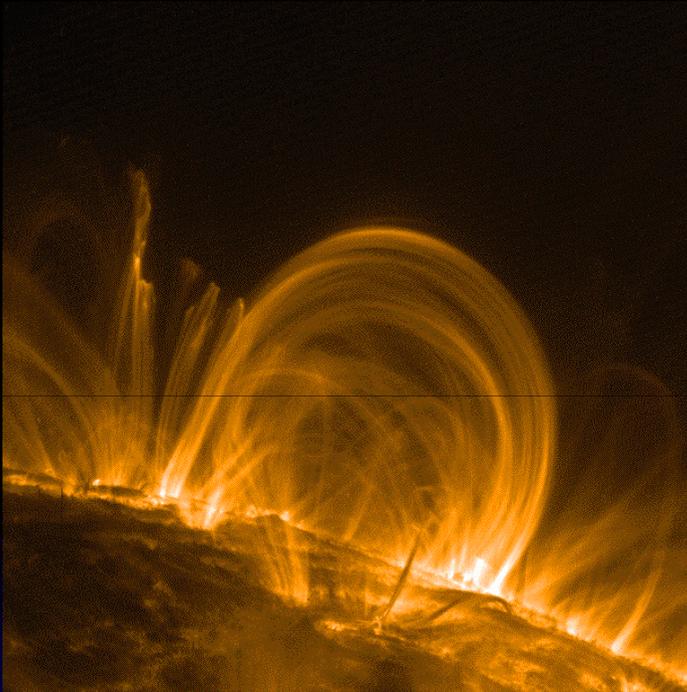


Des Taches à la surface du soleil
T= 4200K



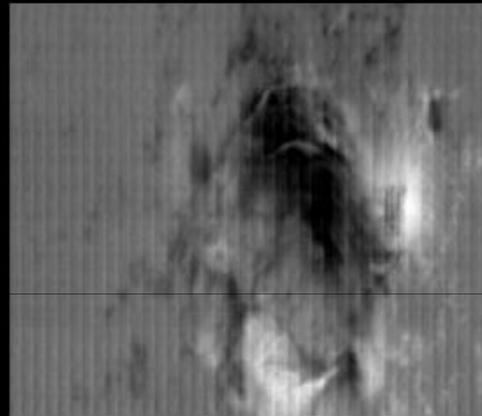
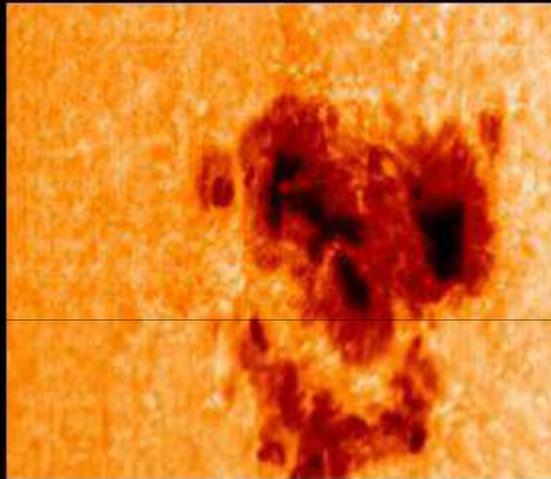
liées à la concentration de
champs magnétiques
10000 fois celui de la terre

Un ingrédient essentiel: le champ magnétique dans la couronne



- Champ magnétique dans la couronne tracé par le gaz ionisé chaud (« **plasma** ») qu'il enferme (image en EUV, satellite *TRACE*)
- Analogie: champ magnétique d'un aimant rendu « **visible** » par la limaille de fer

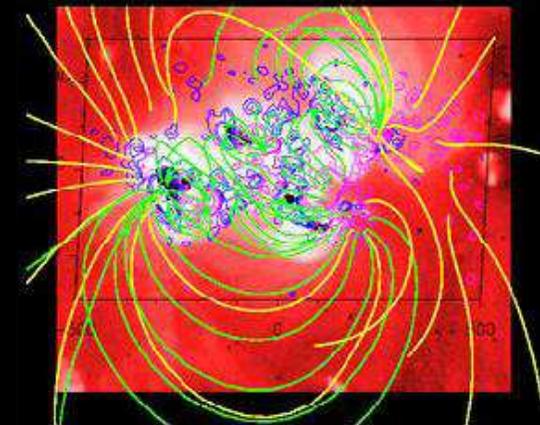
Un ingrédient essentiel: le champ magnétique dans la couronne



Signature des taches dans le visible (à gauche) et dans l'UV (à droite)

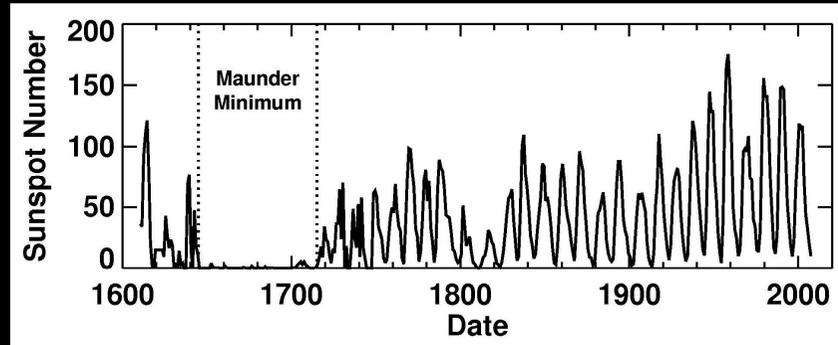
Champ magnétique au milieu

Le champ magnétique est difficile à mesurer mais peut aussi se calculer grâce à des modèles

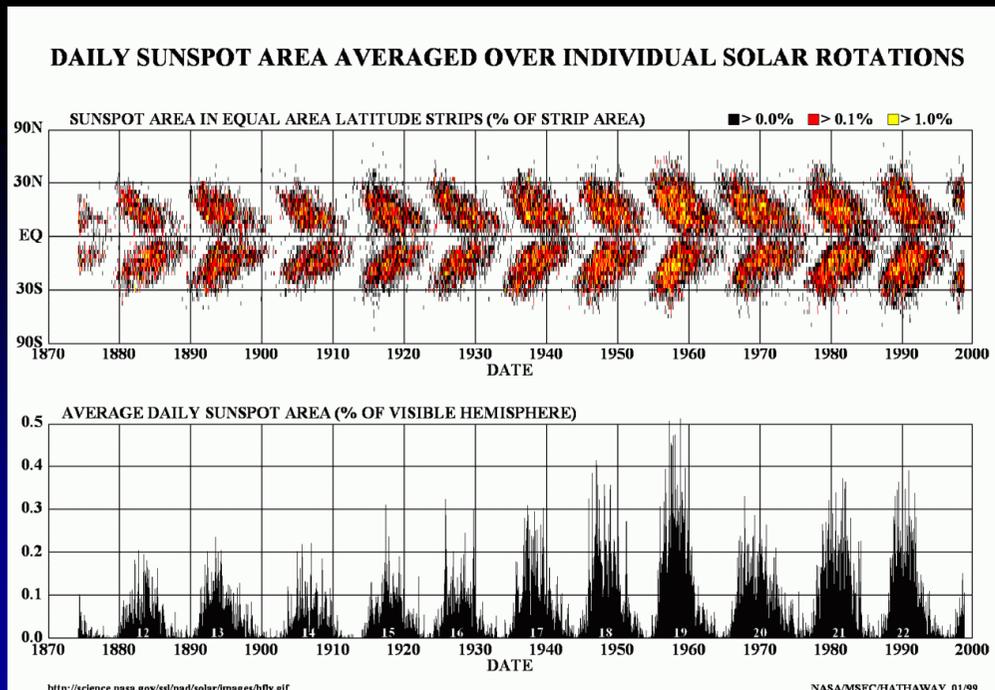


Le cycle d'activité solaire

11 (22) ans



Le nombre de taches varie sur une échelle de 11 ans



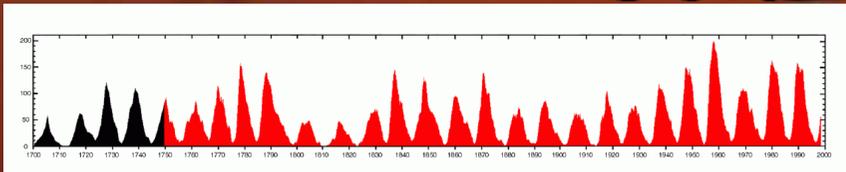
La position des taches à la surface du soleil varie avec le cycle

Le champ magnétique s'inverse tous les 22 ans

Cycle magnétique : 22 ans

Pas un cycle régulier...

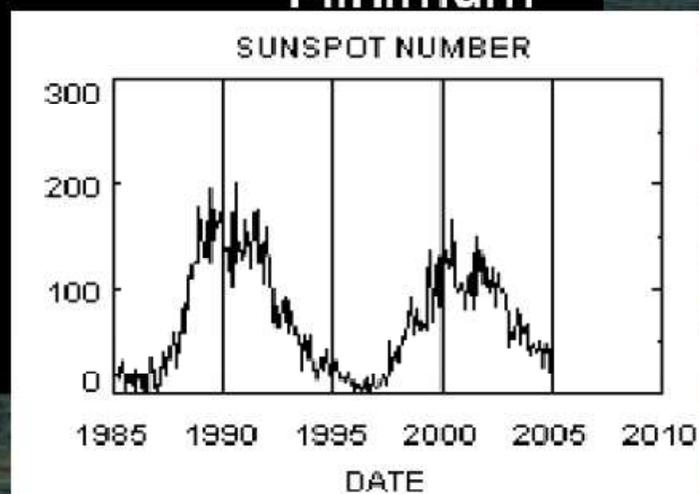
Solar Cycle



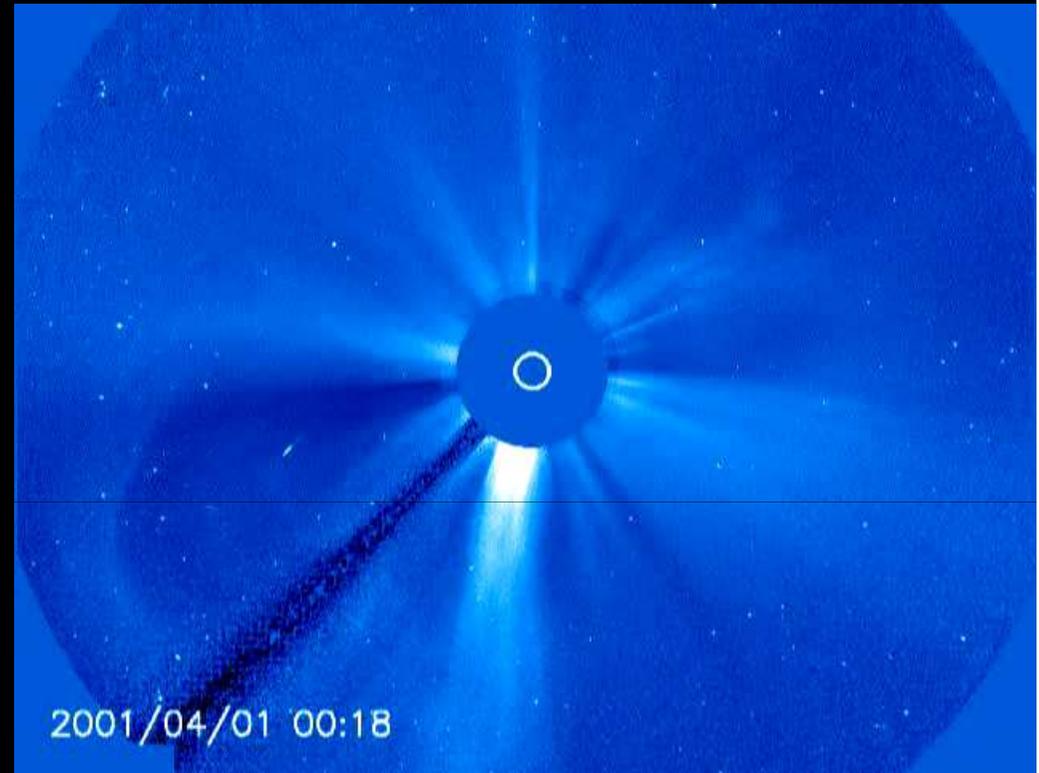
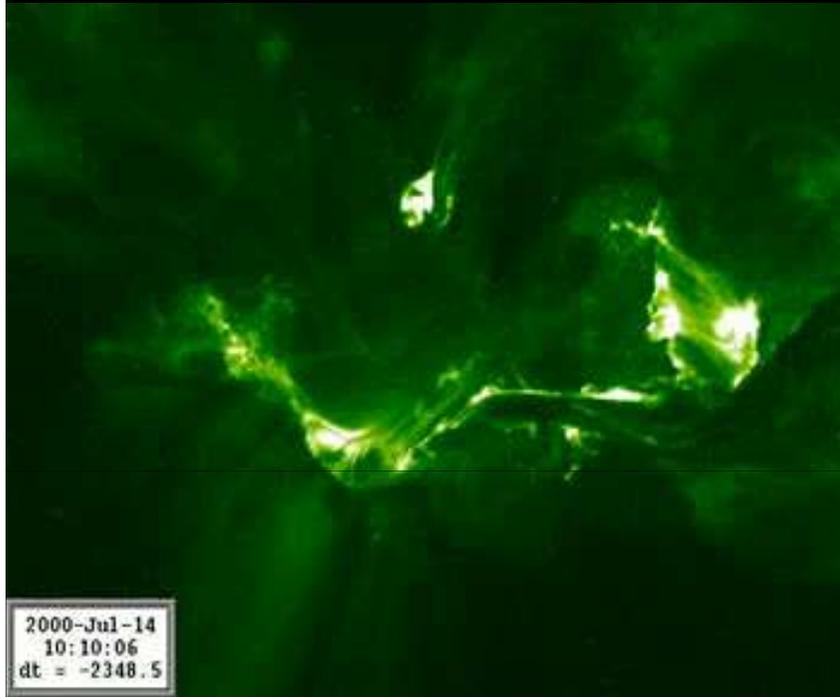
Grande variabilité de la couronne solaire
vue en rayons X

Solar
Minimum

Solar Maximum



Evolution magnétique et activité solaire



- Éruption solaire (EUV; EIT/SoHO), énergie $\rightarrow 10^{25}$ J, en ~ 1000 s
des millions de fois la consommation annuelle d'énergie électrique de la France
- Éjections de masse (CME, lumière blanche; LASCO/SoHO), énergie $\rightarrow 10^{25}$ J

Les éruptions solaires



Traditionnellement observées dans la raie
 $H\alpha$ de l'hydrogène
Observations héliographe de Meudon
28 Octobre 2003

Phénomènes associés à une région active,
à la présence de champs magnétiques
complexes

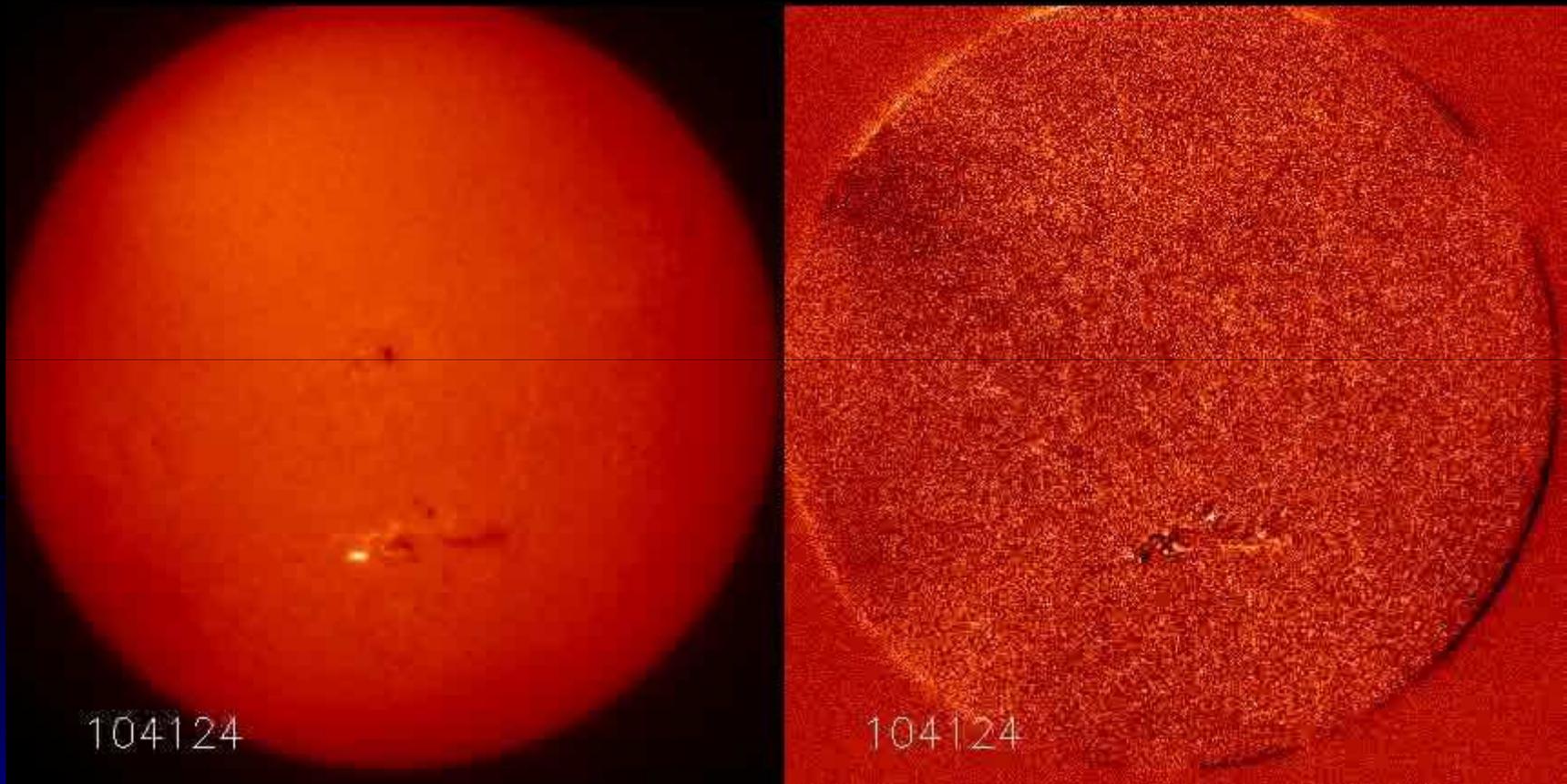
031028.094548

Champ magnétique longitudinal
Observé par SOHO/MDI
28 Octobre 2003

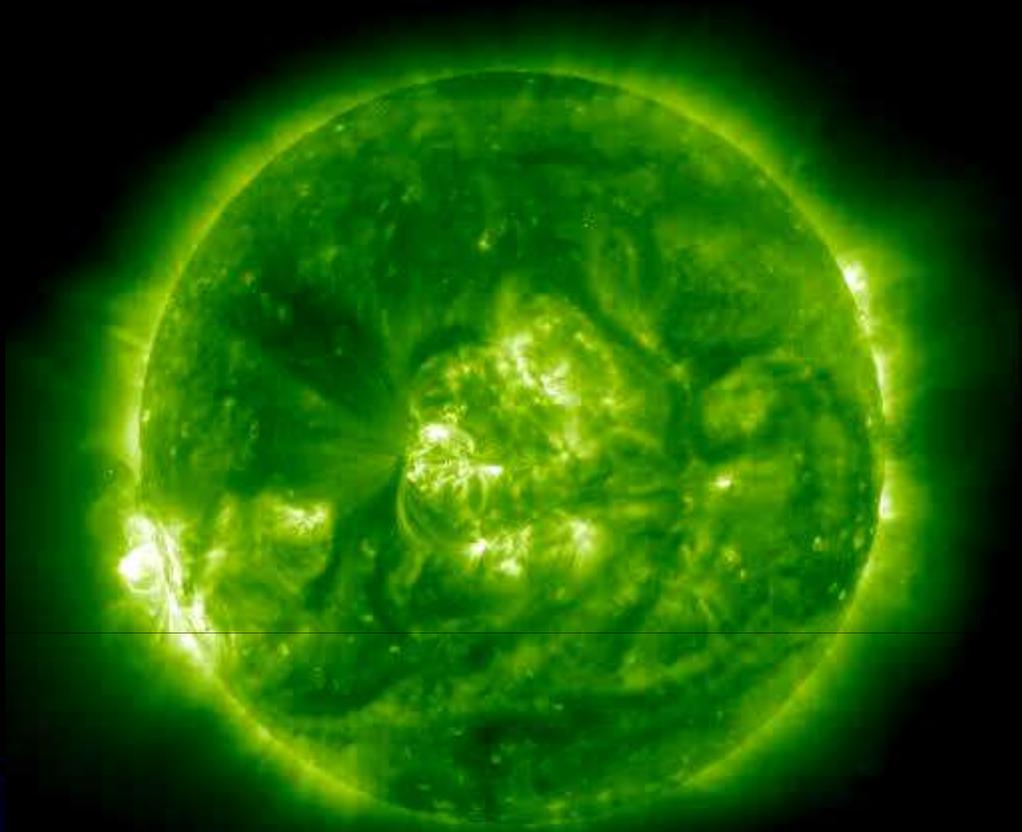


'23:59:03.31'
'2003-10-24T

Les éruptions solaires



Eruptions et onde de « Moreton » observée par l'héliographe de Meudon



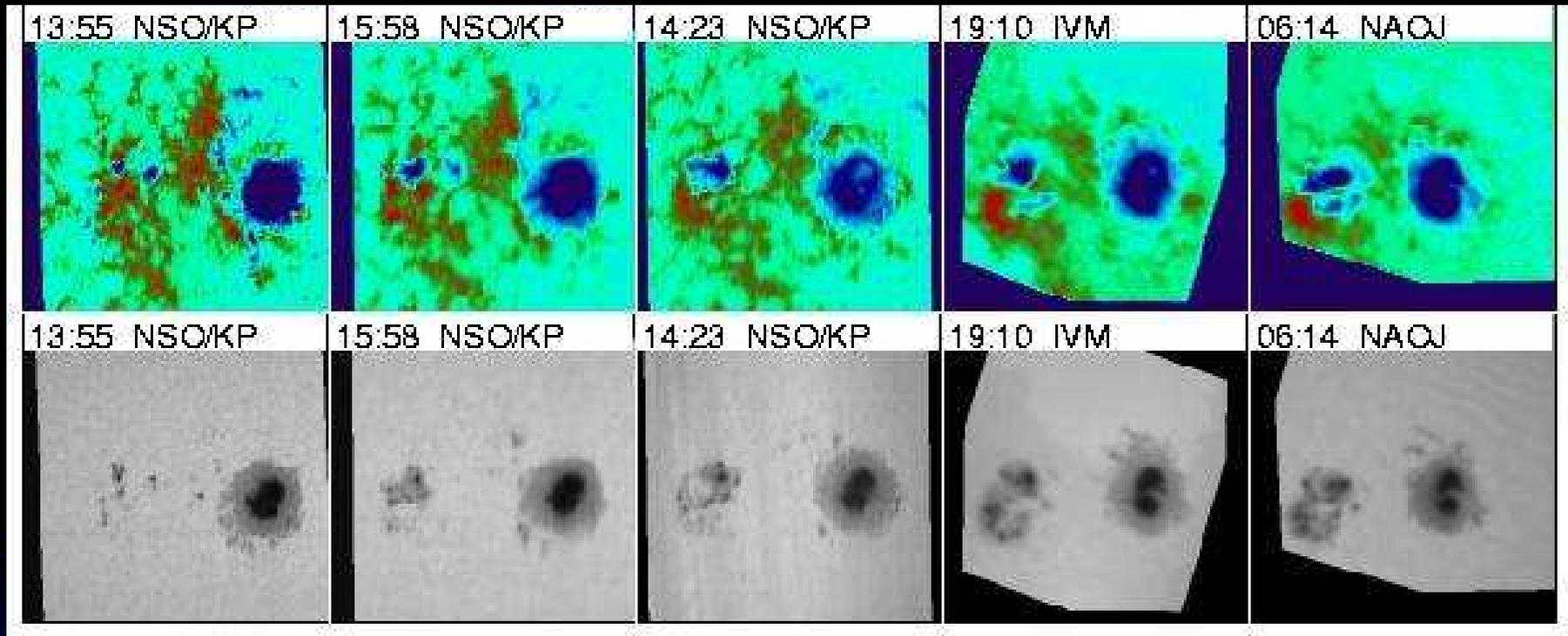
Éruption solaire ($H \alpha$, et ici en EUV;
EIT/SoHO), énergie $\rightarrow 10^{25}$ J, en
 ~ 1000 s:
des millions de fois la consommation
annuelle d'énergie électrique de la
France

2003/10/23 00:00



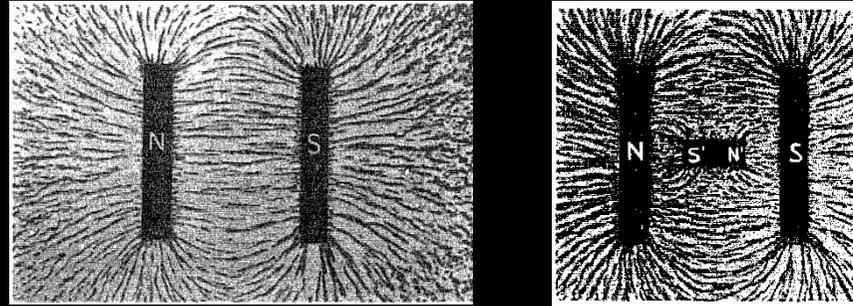
2003/09/26 01:52

Un processus clef: la reconnexion magnétique (1)

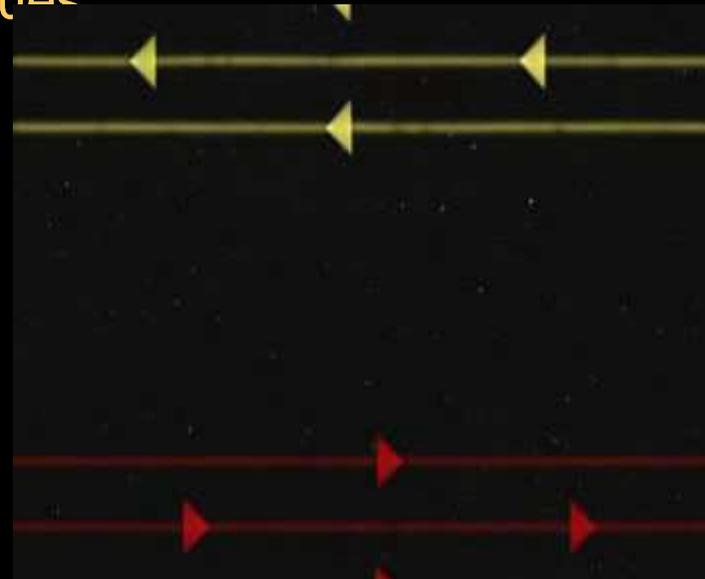
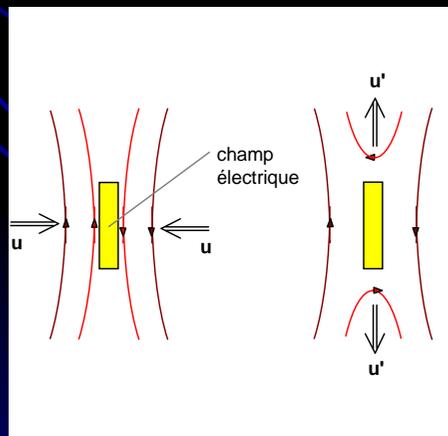


- Emergence de champ magnétique de l'intérieur du Soleil, sous l'effet des mouvements de convection sous la photosphère
- En bas: images journalières d'un groupe de taches; noter les changements dans la tache de gauche
- En haut: champ magnétique (le long de la ligne de visée) dans la même région; polarités opposées rouge/bleu; noter apparition d'une polarité opposée à la polarité pré-existante dans la partie gauche des cartes

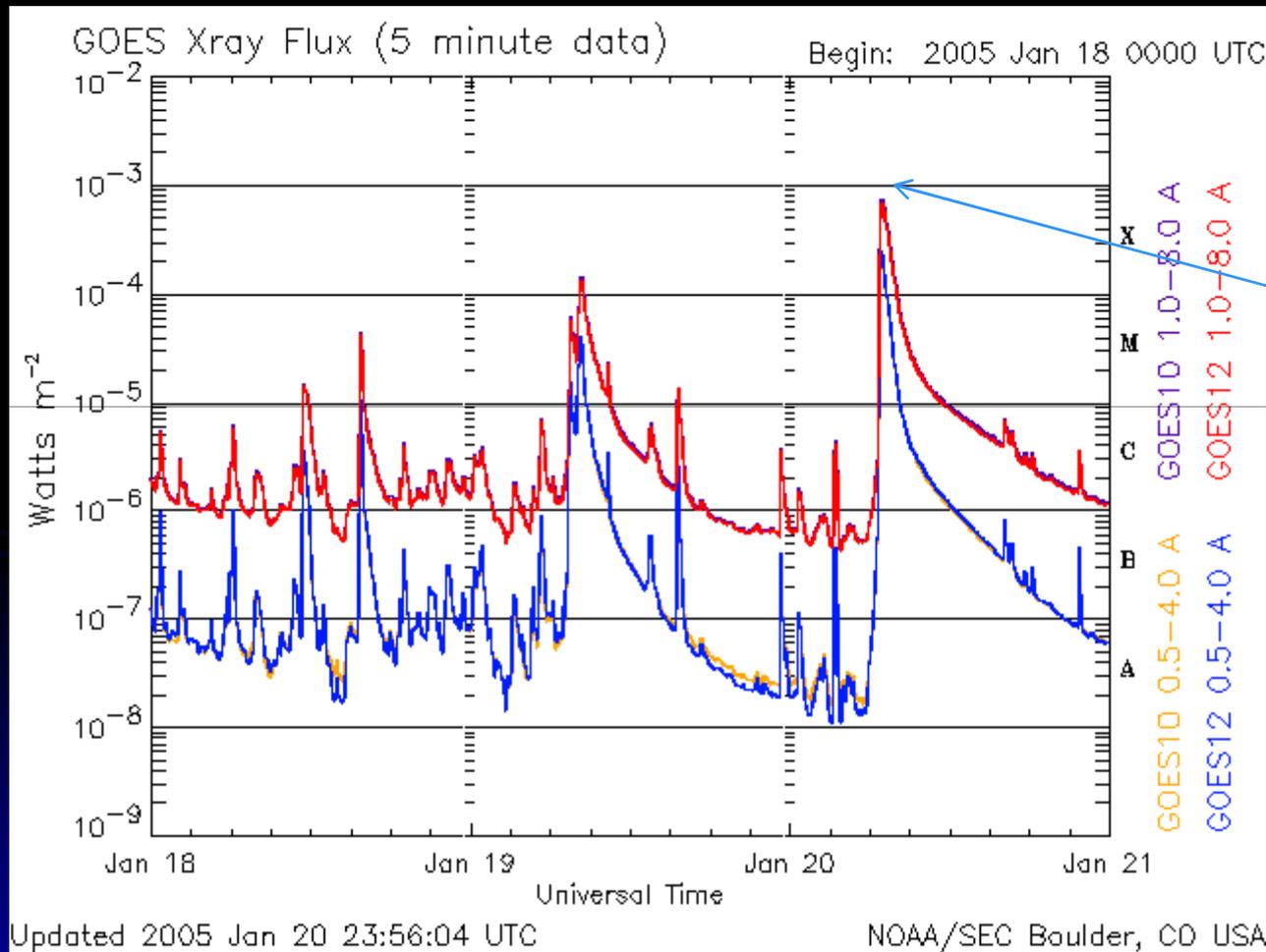
Un processus clef: la reconnexion magnétique (2)



- Analogie: perturbation du champ magnétique d'un aimant par un autre, à orientation opposée \Rightarrow reconfiguration des lignes de champ; initialement $N \rightarrow S$, après introduction du deuxième aimant: $N \rightarrow S$ à l'extérieur, nouvelles connexions $N \rightarrow S'$ et $N' \rightarrow S$ au voisinage du deuxième aimant
- Reconnexion: annihilation \mathbf{B} , conversion de l'énergie emmagasinée, détachement de structures magnétiques

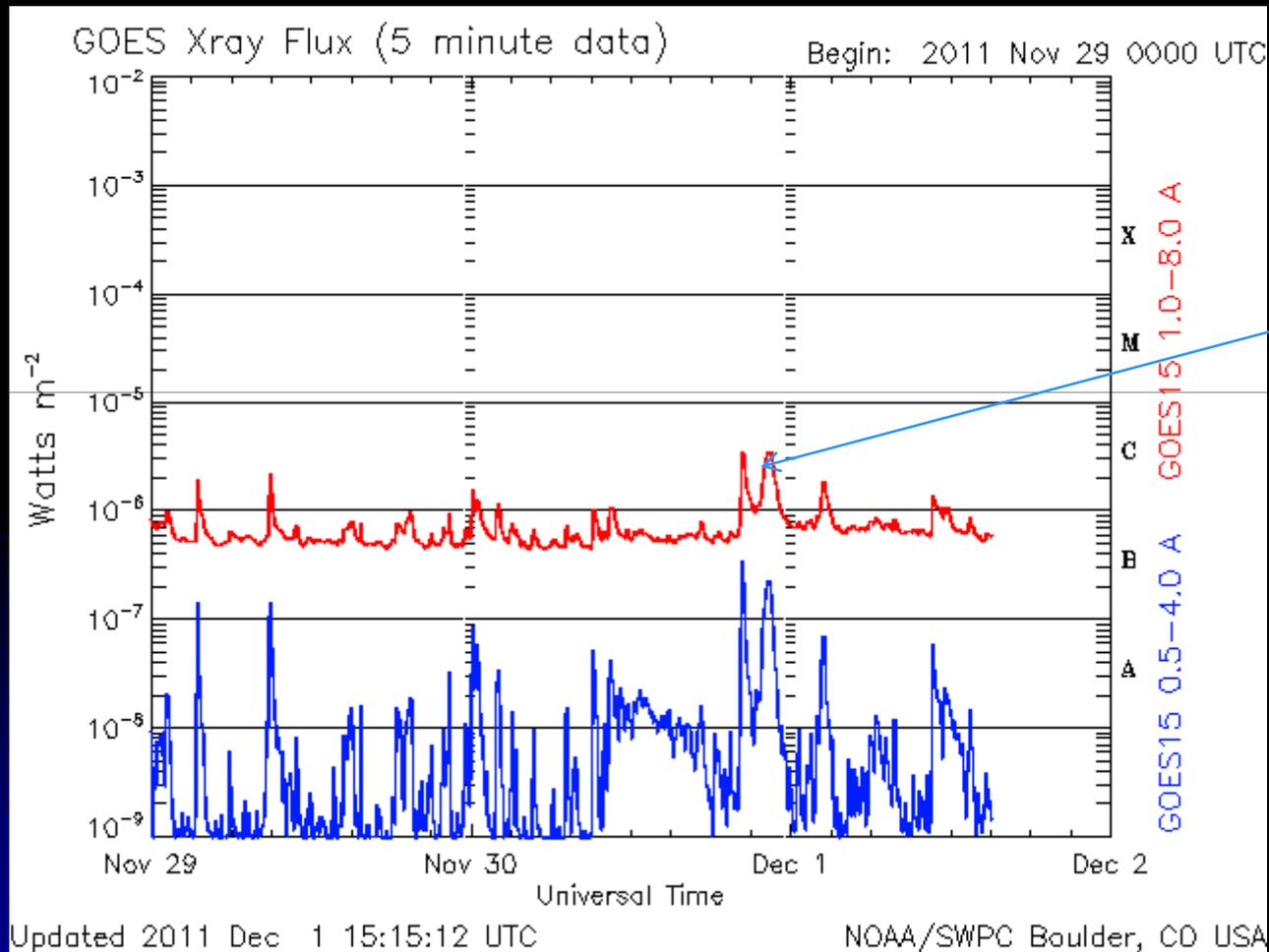


Les éruptions solaires en rayons X mou: Les observations de GOES



Eruption de classe
X 9 du 20 Janvier 2005

Les éruptions solaires en rayons X mou: Les observations de GOES

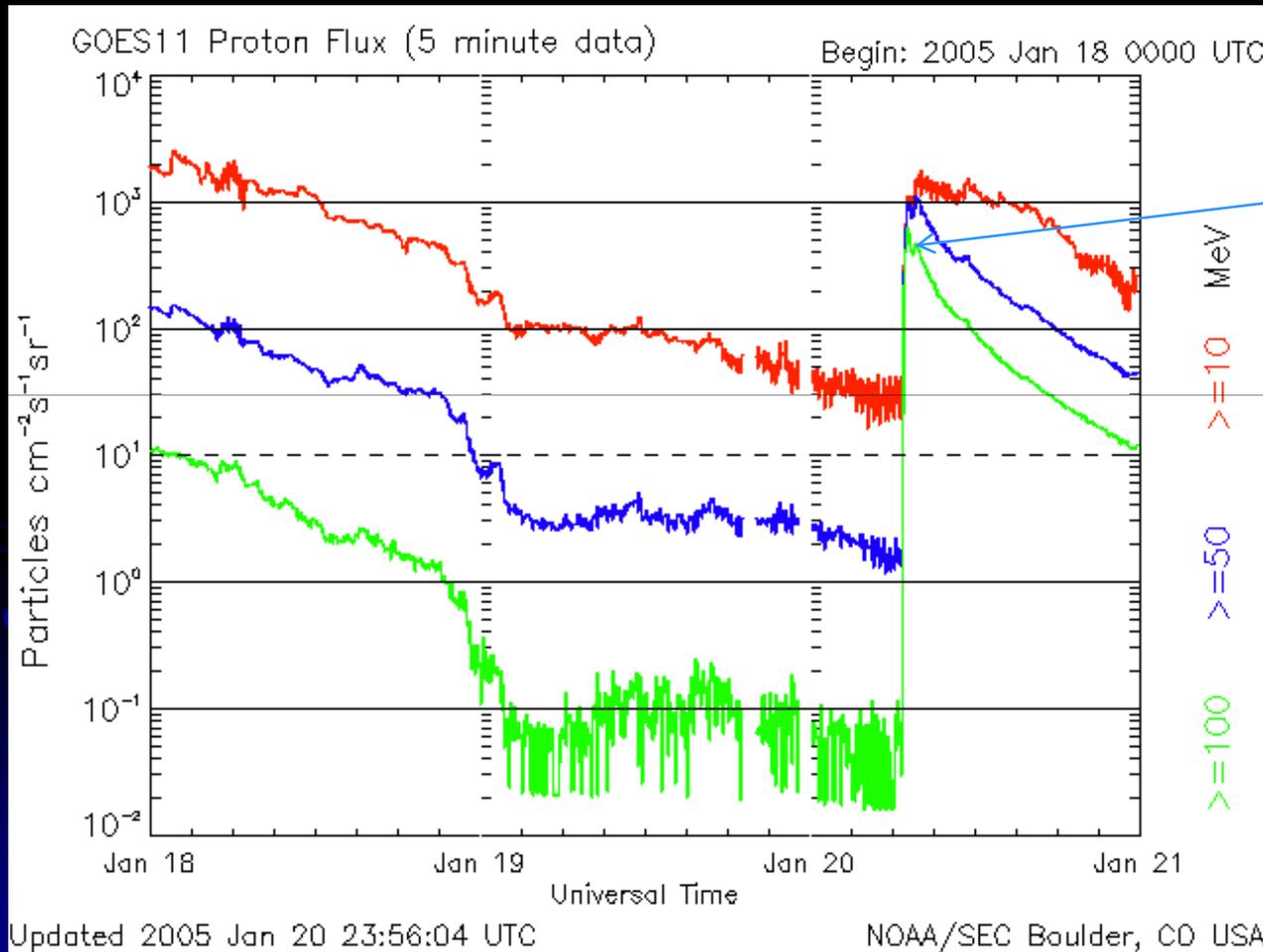


Les observations du
1 Décembre 2011

Eruptions de classe C 3

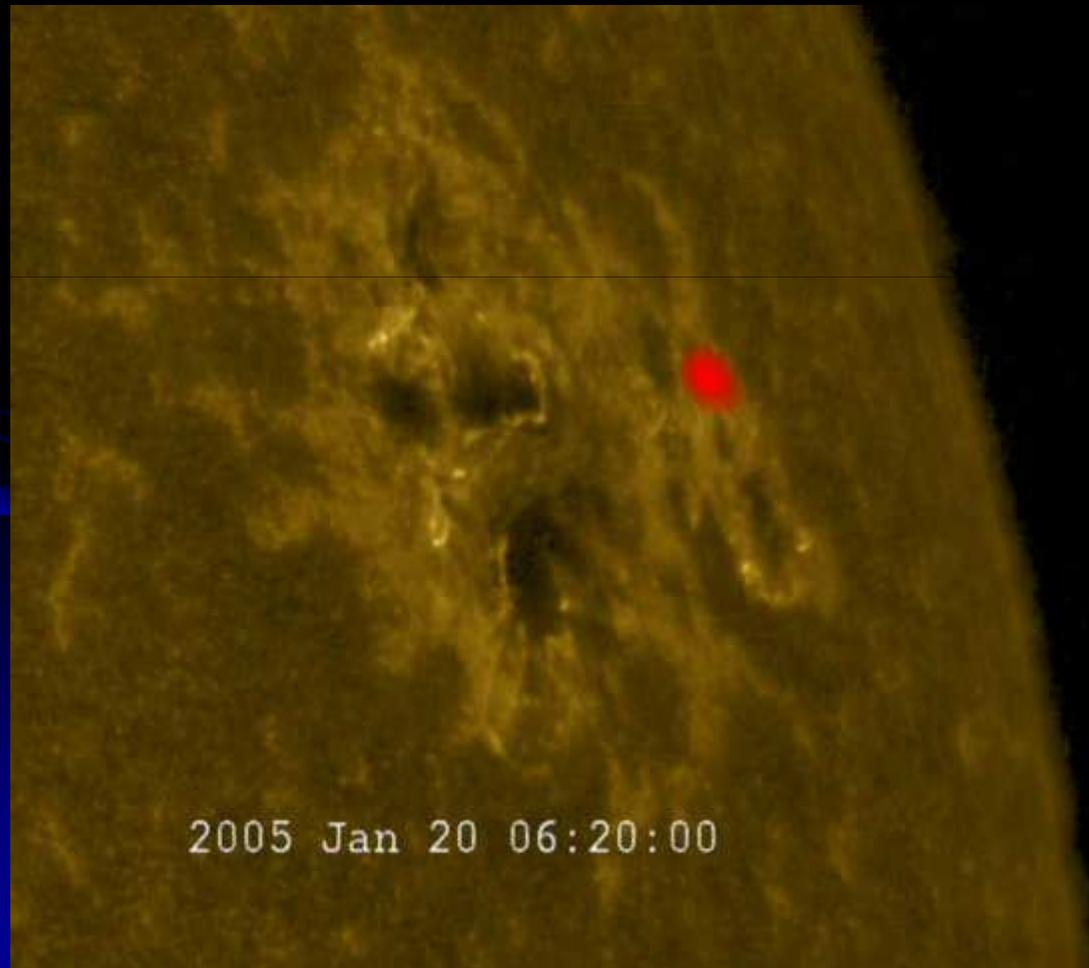
300 fois moins intense...

Le Soleil accélérateur de particules: Les Protons au niveau de l'orbite terrestre



Protons associés à
l'éruption de classe
X 9 du 20 Janvier 2005

Une éruption énergétique presque au minimum d'activité solaire!!



TRACE + RHESSI

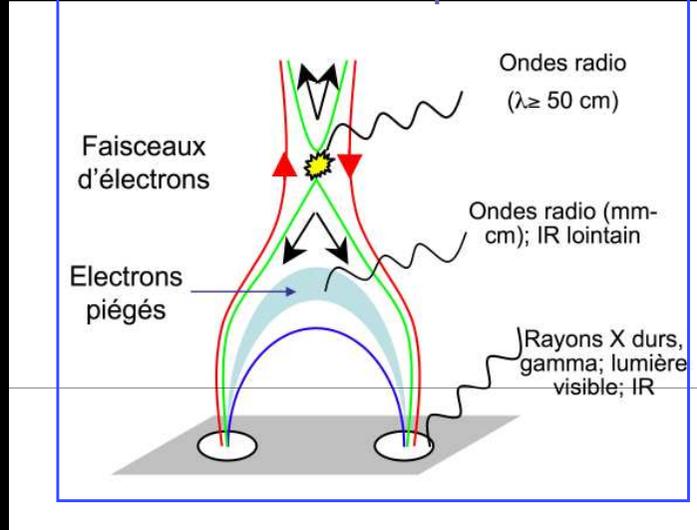
Le 20 Janvier 2005!!

2005 Jan 20 06:20:00

Particules au soleil, particules dans le milieu interplanétaire

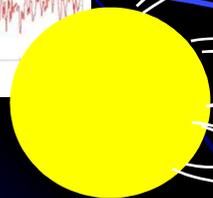
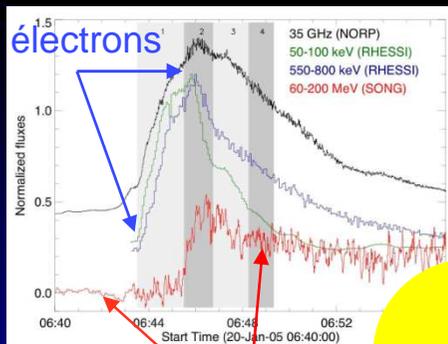
X, gamma, radio, in situ:
suivre les particules
énergétiques du Soleil à
la Terre

Un scénario simple:

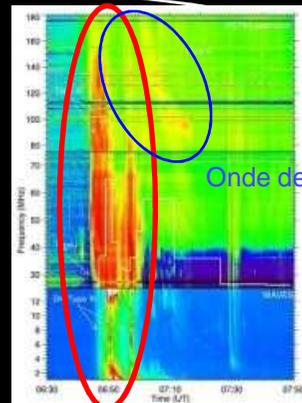


● Différents épisodes d'accélération des protons relativistes:

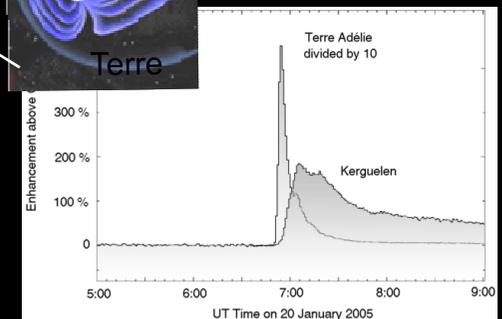
- basse couronne éruptive,
- puis choc coronal ?



Faisceaux e^-



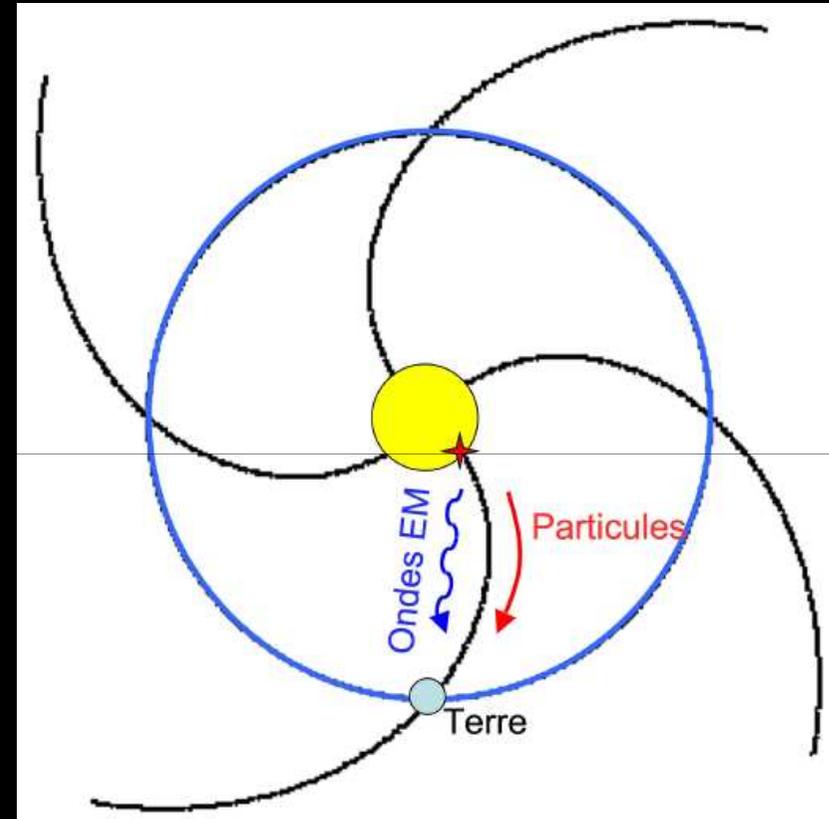
Protons relativistes



Particules de haute énergie du Soleil

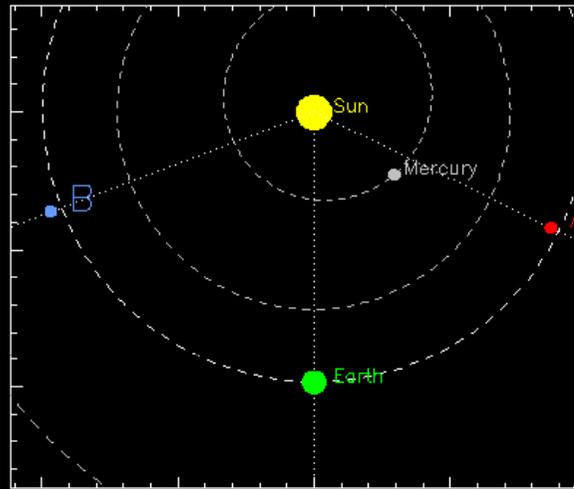
Comment se propagent-elles du Soleil à la Terre ?

- Les particules chargées sont accélérées au Soleil et se propagent vers la Terre le long du champ magnétique interplanétaire.
- Modèle simple du milieu interplanétaire: champ magnétique dont les lignes forment des spirales sous l'effet (a) de l'expansion du vent solaire, (b) de la rotation du Soleil.
- Attente: les particules chargées atteignent le satellite si l'éruption a lieu près de l'autre bout de la spirale.

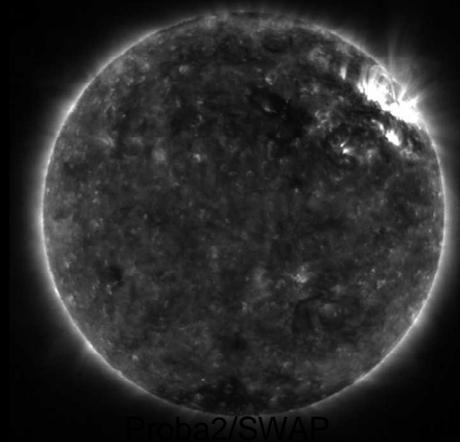


Particules de haute énergie du Soleil

Apport de la vision stéréoscopique

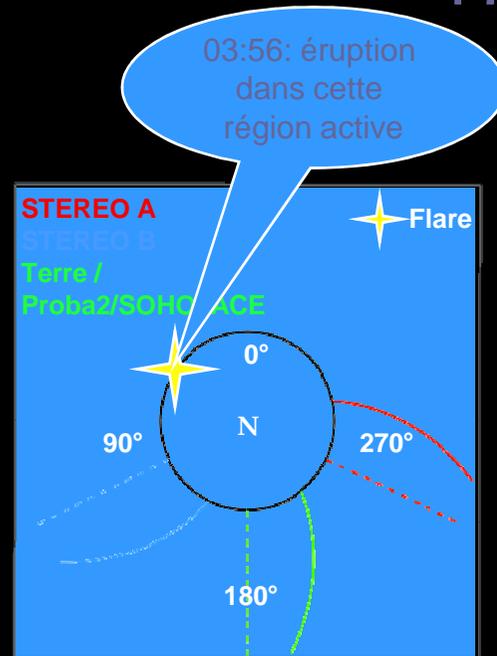


- Trois yeux dirigés vers le Soleil: 2 sondes STEREO (bleu) et Proba2 (ESA/Obs. Royal Belgique)
- Eruption sur la face cachée à la Terre



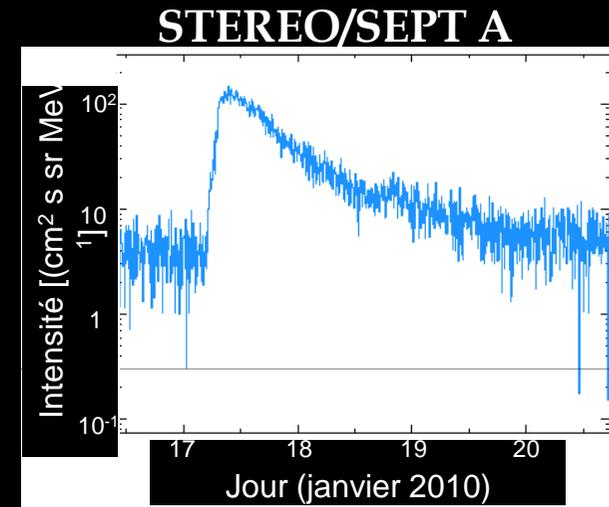
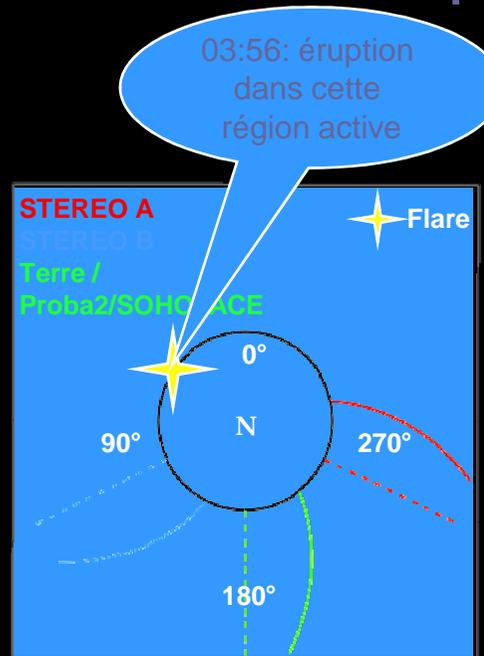
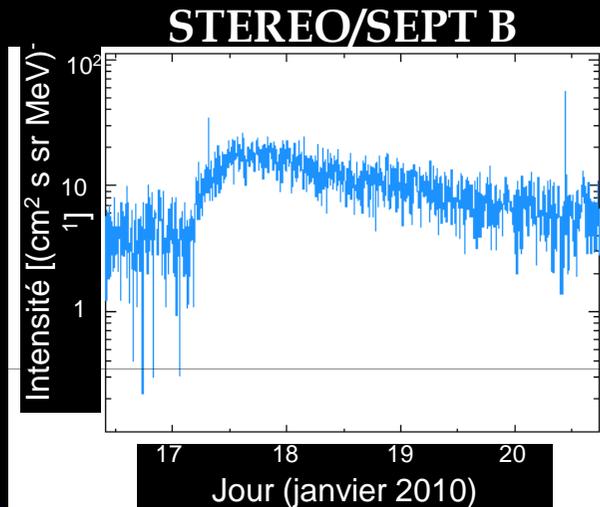
Particules de haute énergie du Soleil

17 Janvier 2010

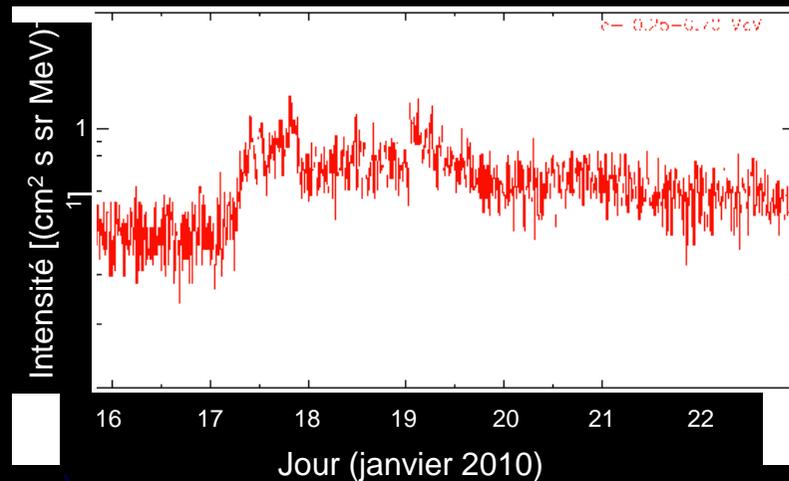


Particules de haute énergie du Soleil

17 Janvier 2010



- Electrons de haute énergie vus par les deux STEREO et des satellites sur la ligne Soleil-Terre.



- Aucun des trois satellites n'est bien connecté à l'éruption !

Les éruptions et les éjections de masse coronale

La relation éruptions / CMEs est toujours objet de débat



Ejections de matière dans la couronne
Que devient la matière éjectée ?

Elle peut atteindre la Terre si l'orientation est la bonne. (halo)

Apr 17 2002 23:59:32

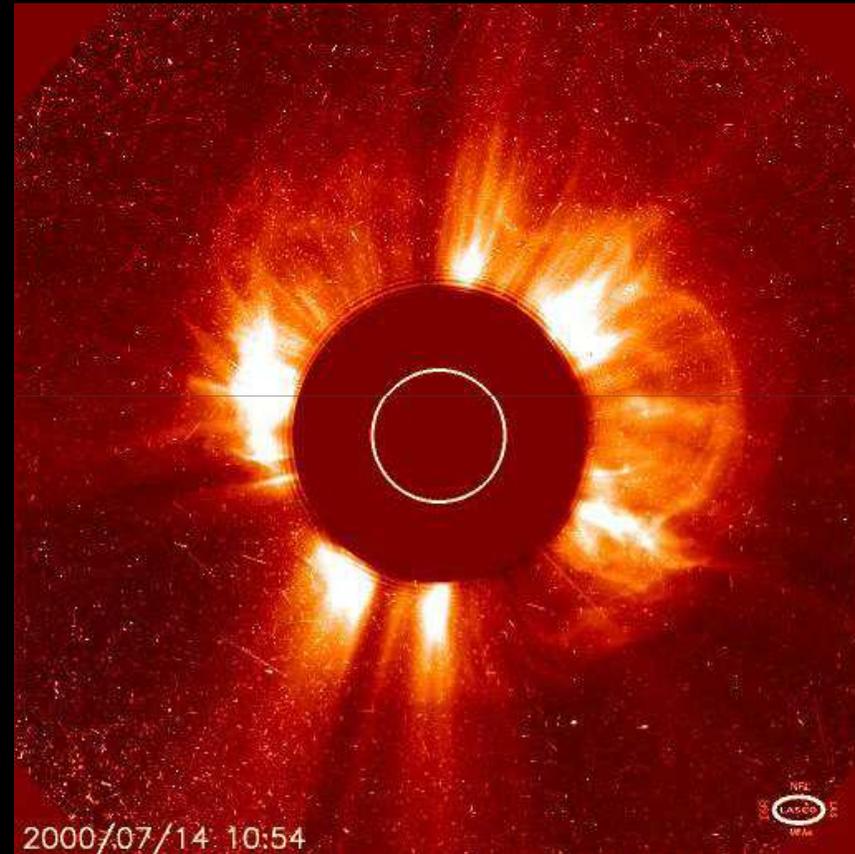
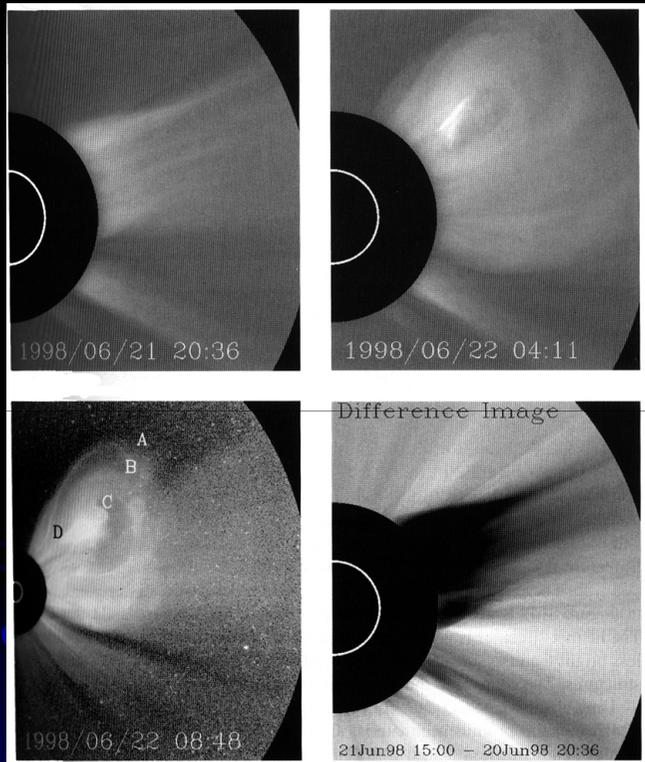
Perte de masse du soleil: $2 \cdot 10^{-10} \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vent solaire

$M_{\text{CME}} = 10^{14} - 10^{16} \text{ g}$ en moyenne 1 par jour (<1% perte vent solaire)

$v \sim 10 - 10^3 \text{ km/s}$

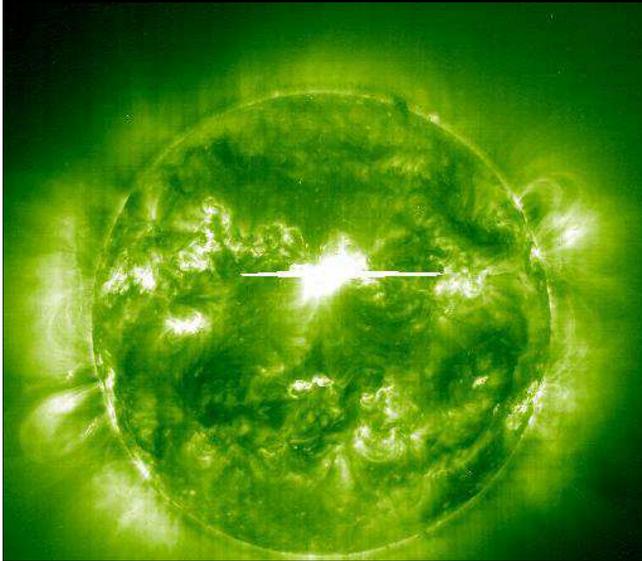
$E \sim 10^{26} \text{ Joule}$

Morphologie et cinématique des éjections

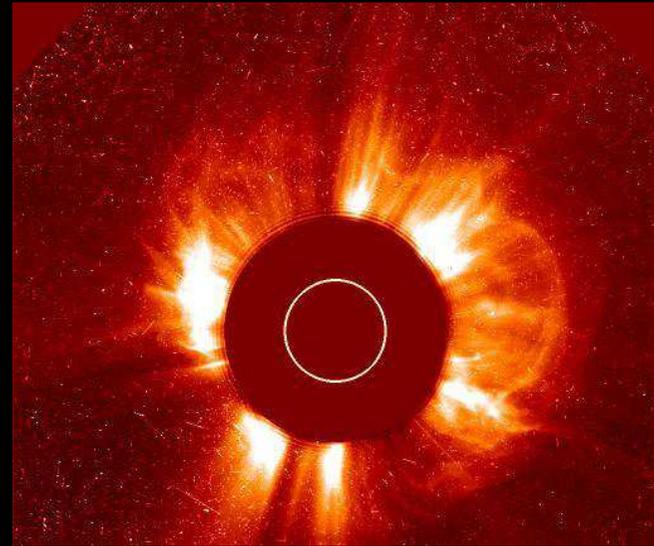


Suivi de différentes structures du CME
Permet de déduire hauteur, vitesse et
accélération

Les éjections de masse vers la Terre



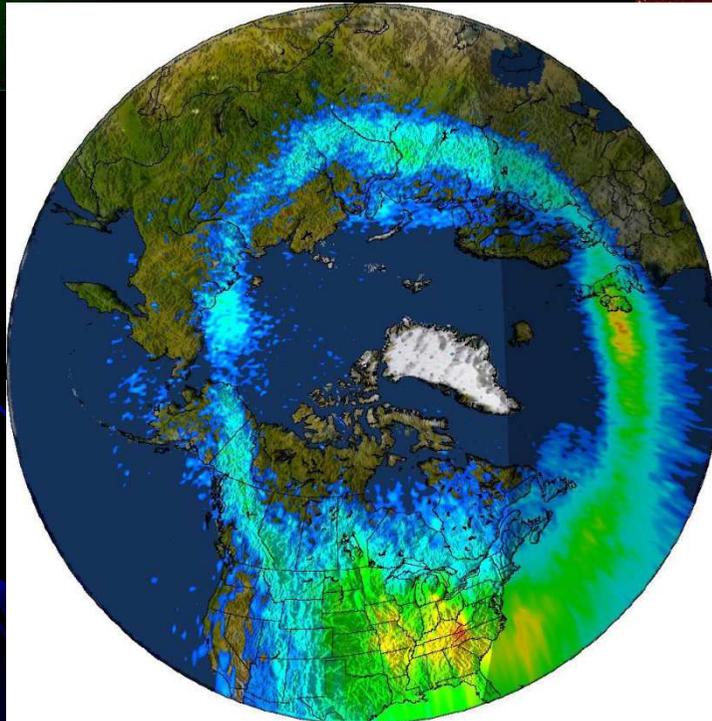
2000/07/14 10:24



07/14 10:54



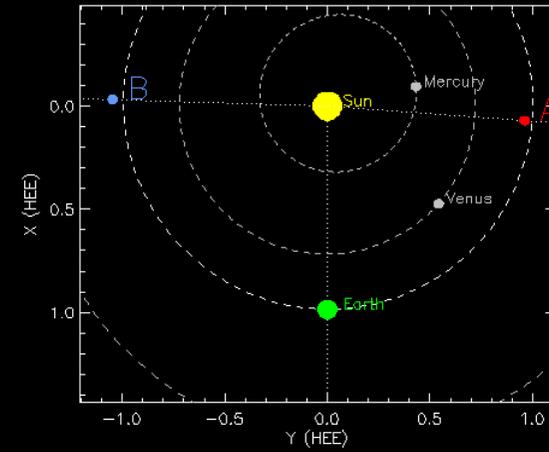
Source au soleil



Halo

Aurores boréales
A basse latitude

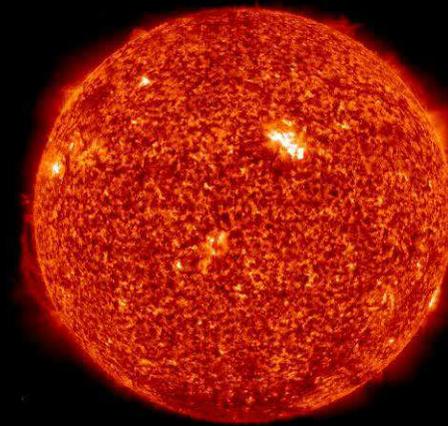
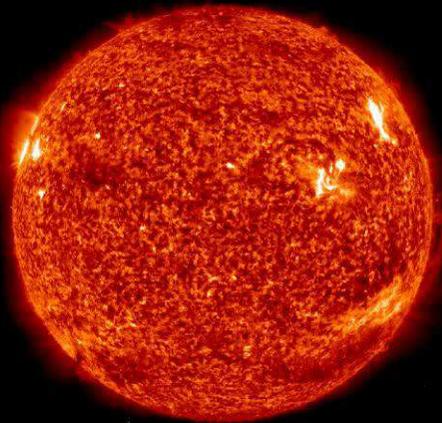
Apport des observations des sondes STEREO



B EUV:10-12-06 11:17:08

olo:10-12-06 11:21:32

A EUV:10-12-06 11:16:16



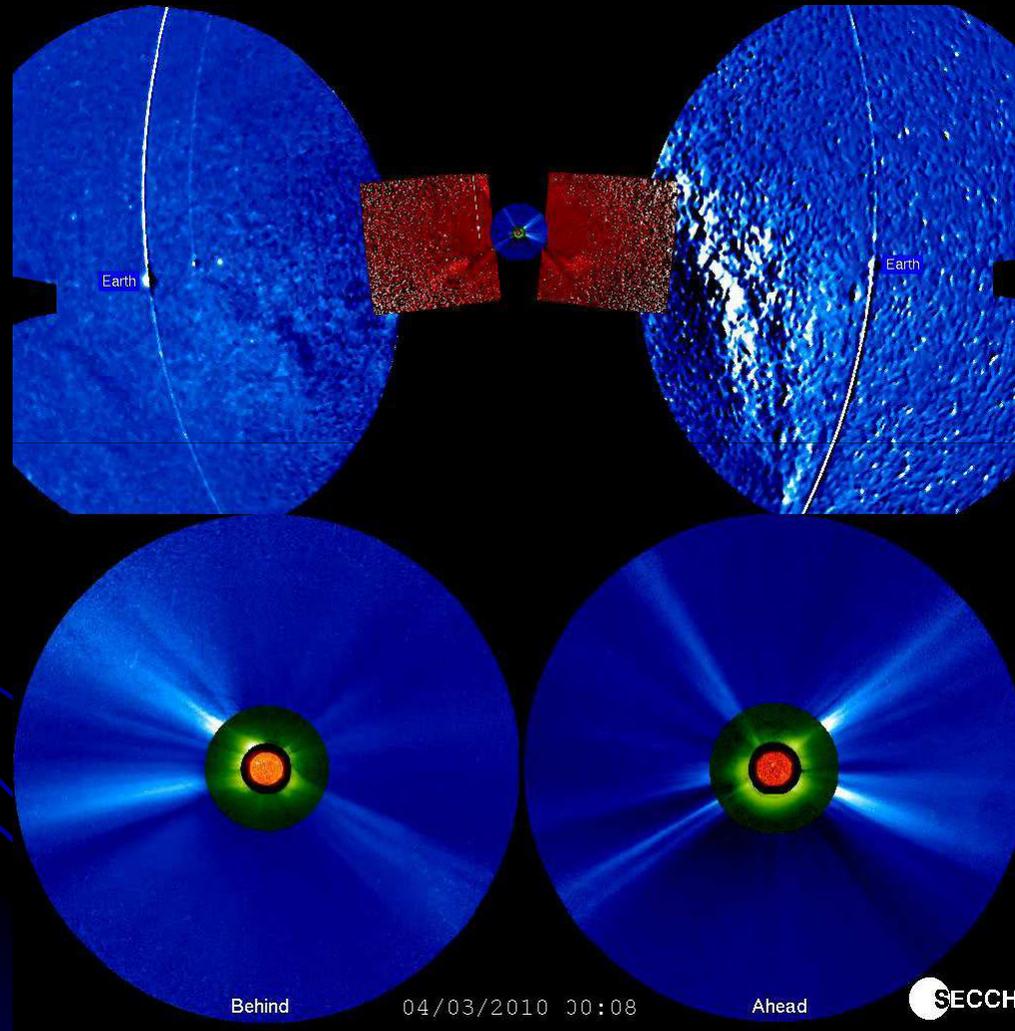
Vue de la Terre

FESTIVAL

SECCHI

STEREO A + SDO + STEREO B
3 points de vue

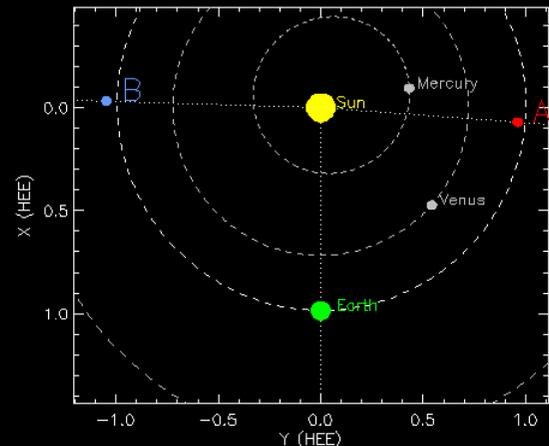
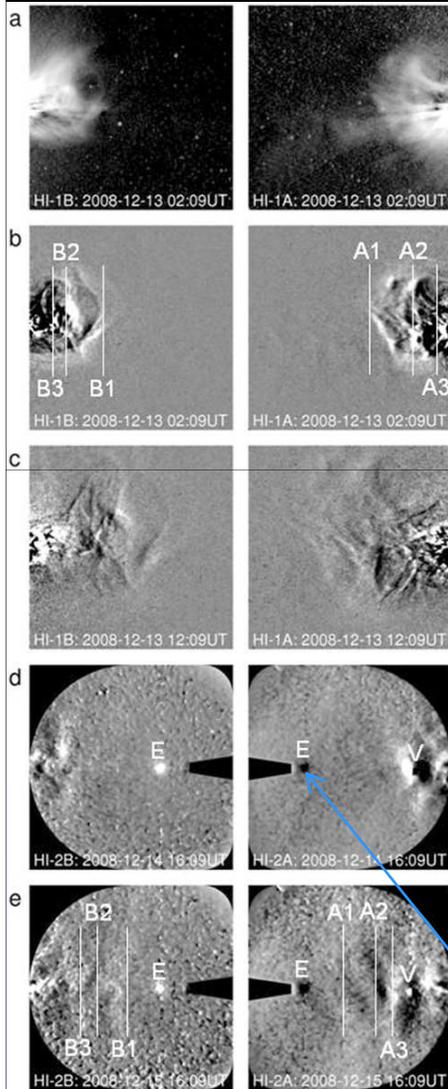
La vision stéréoscopique (à 3 dimensions...)



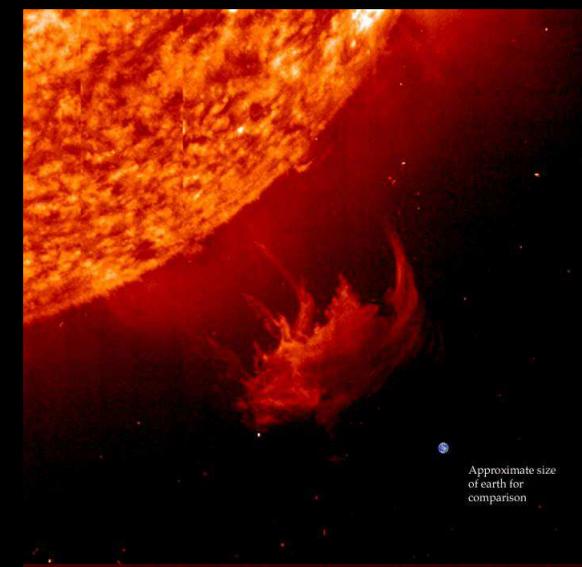
Propagation des éjections de masse coronale

Avec STEREO, il est possible de suivre les perturbations du soleil jusqu'à la terre

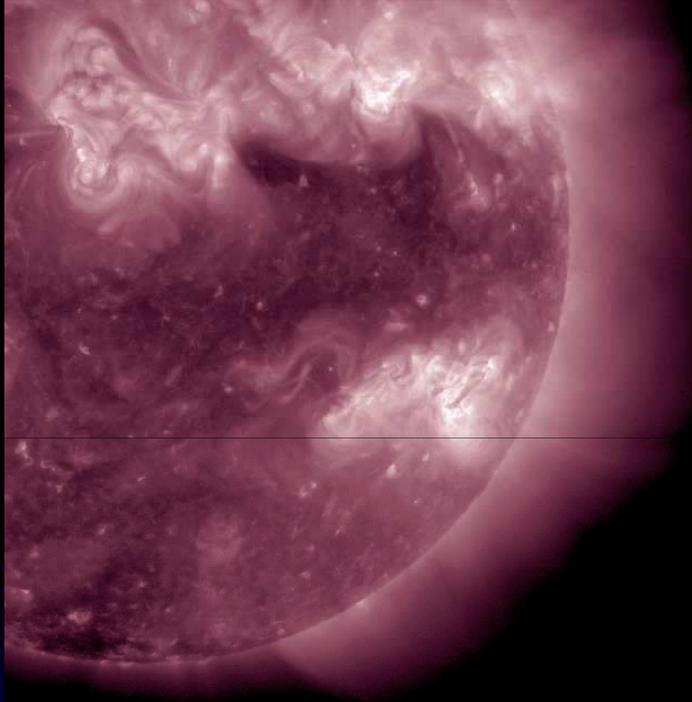
Il est cependant encore difficile de prévoir dès le démarrage d'une éjection si elle aura des effets géomagnétiques et lesquels car il faudrait pouvoir connaître l'orientation du champ magnétique dans l'éruption... La réponse est dans la mesure de B au soleil et dans la couronne...



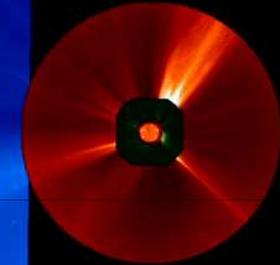
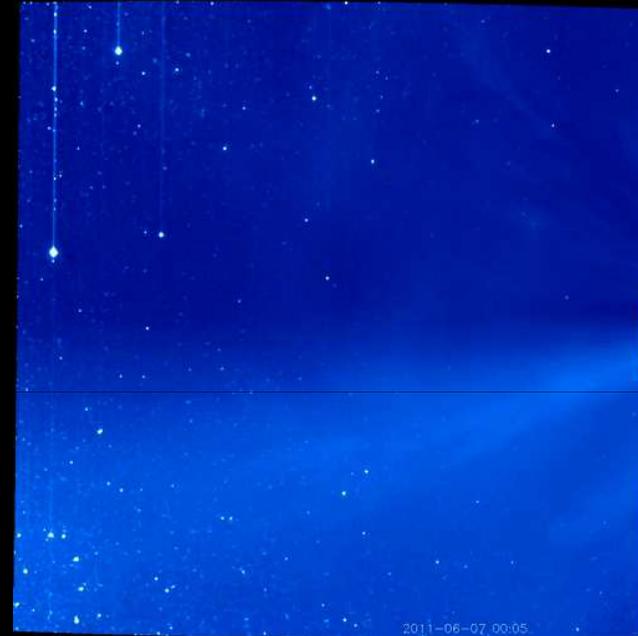
Terre



L'éruption du 7 Juin 2011: La CME dans l'espace interplanétaire



Vue de la terre



Vue sur le côté par STEREO

- CME de masse ($\sim 5e^{12}$ kg) et de vitesse moyenne (STEREO/COR & HI)
- ICME rasant la terre: atteint l'orbite terrestre le 9-10 juin
 - → faible incidence géomagnétique

Relations Soleil-Terre

Rayonnements ionisés: X-UV (8 minutes)

Vent solaire et Ejection de masse
coronales
(2 à 4 jours)

Magnétosphère
terrestre

Particules énergétiques d'origine solaire
10 minutes à quelques heures

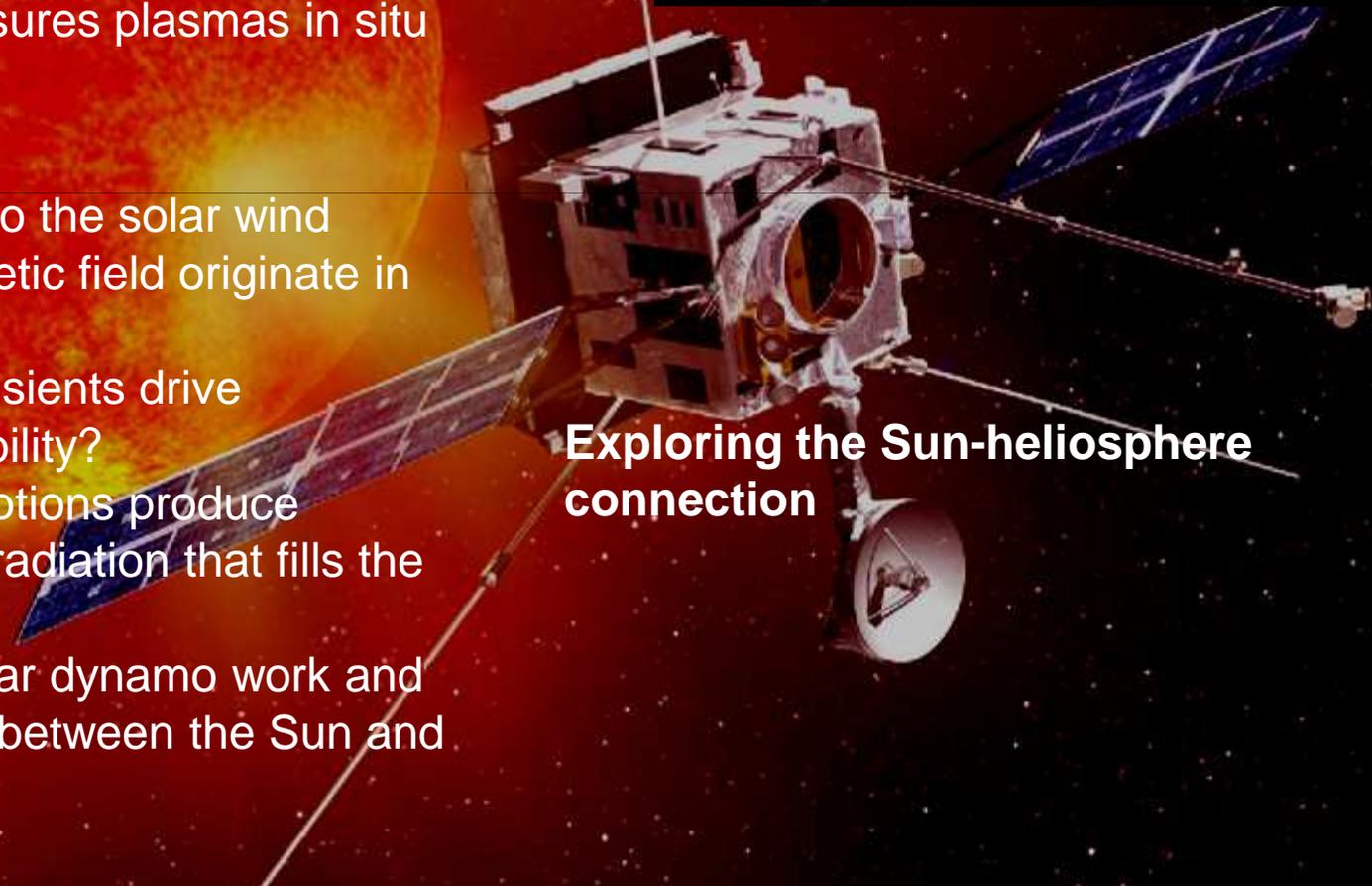
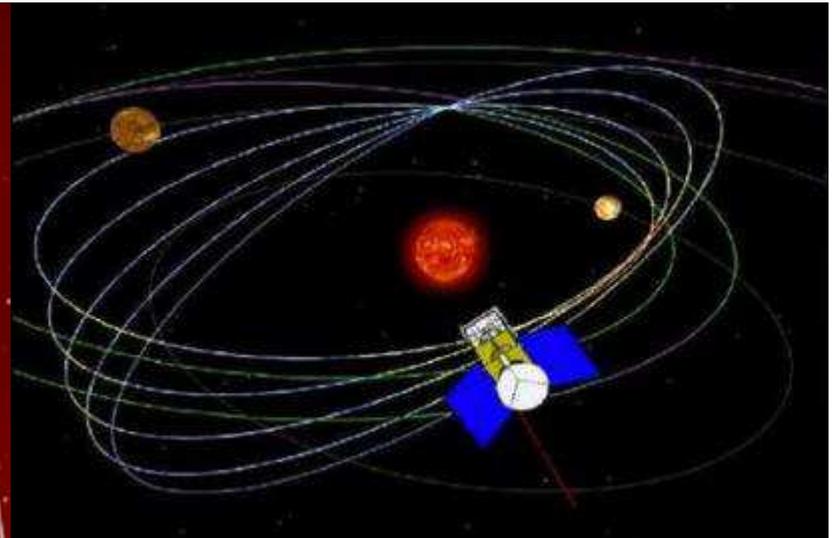


Le Futur:
Solar Orbiter (ESA programme Cosmic
Vision)
(collaboration de la NASA)

Vision rapprochée : 0.28 AU
Période de corotation avec le Soleil
Observation hors du plan de l'écliptique
Combinaison mesures plasmas in situ
et imagerie

- How and where do the solar wind plasma and magnetic field originate in the corona?
- How do solar transients drive heliospheric variability?
- How do solar eruptions produce energetic particle radiation that fills the heliosphere?
- How does the solar dynamo work and drive connections between the Sun and the heliosphere?

Exploring the Sun-heliosphere connection



Le Futur: Solar Probe + (NASA)

Structure, dynamique des champs magnétiques dans les régions sources de vents solaires rapides et lents

Mécanismes d'accélération et de transport des particules énergétiques solaires

Plasmas et poussières au voisinage du soleil

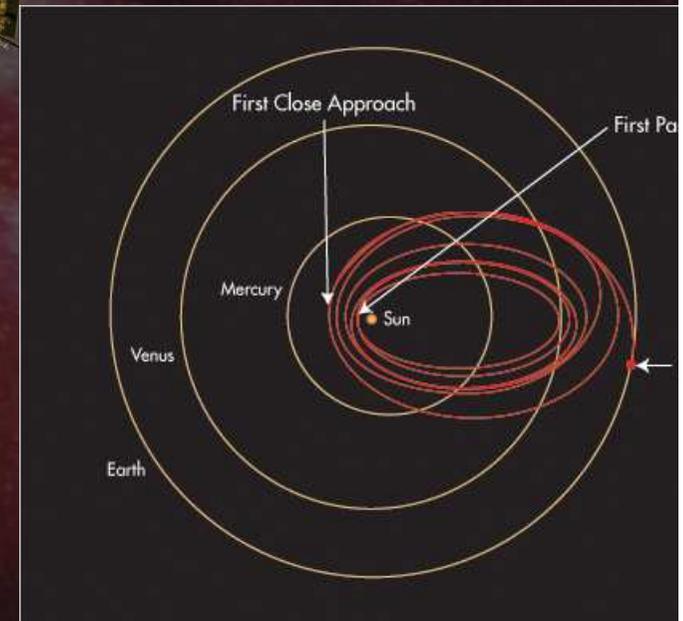
Lancement

30 Juillet 2018

Plusieurs rencontres avec Venus

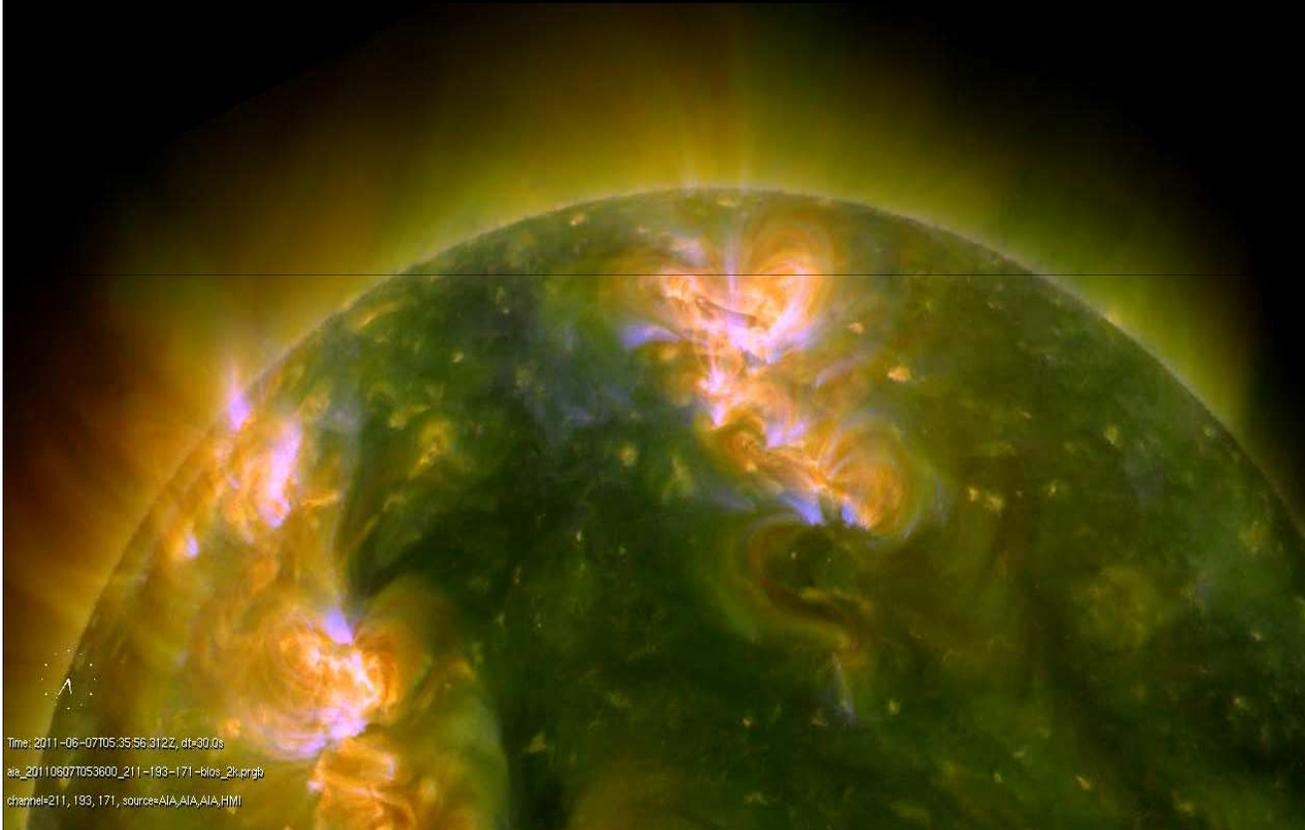
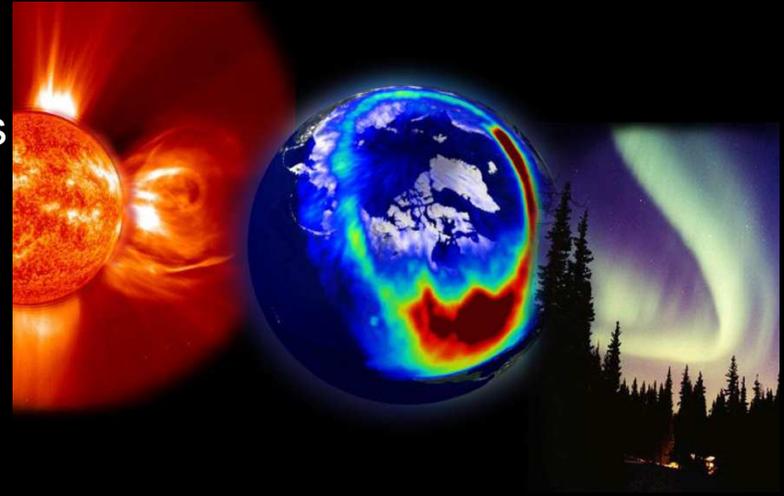
Première approche du soleil à 8.5 Rayons solaires

19 Décembre 2024



Le Soleil reste une étoile mystérieuse...
Mais sa proximité permet : une grande richesse des observations et une grande quantité d'observations

- Prototype pour la physique stellaire
- Laboratoire de physique des plasmas naturels
- L'étoile qui influence notre environnement



Time: 2011-06-07T05:35:56.312Z, dt=30.0s
aia_20110607T053600_211-193-171-blos_2k.png
channel=211, 193, 171, source=AIA,AIA,AIA,HMI

SDO/AIA: 211 A (2 MK) ; 193 (1.6MK) ; 171 (0.6MK)

Merci à mes collègues du LESIA
G. Aulanier, K.L. Klein, E. Pariat
M. Maksimovic