

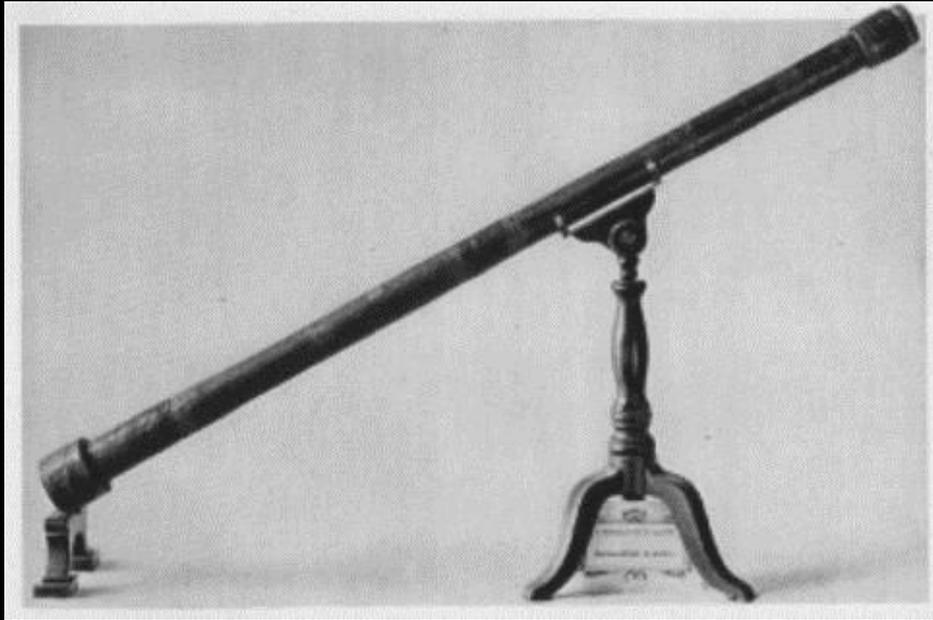


Le Soleil

École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017

L'observation du Soleil



← 1609: *la lunette de Galilée*

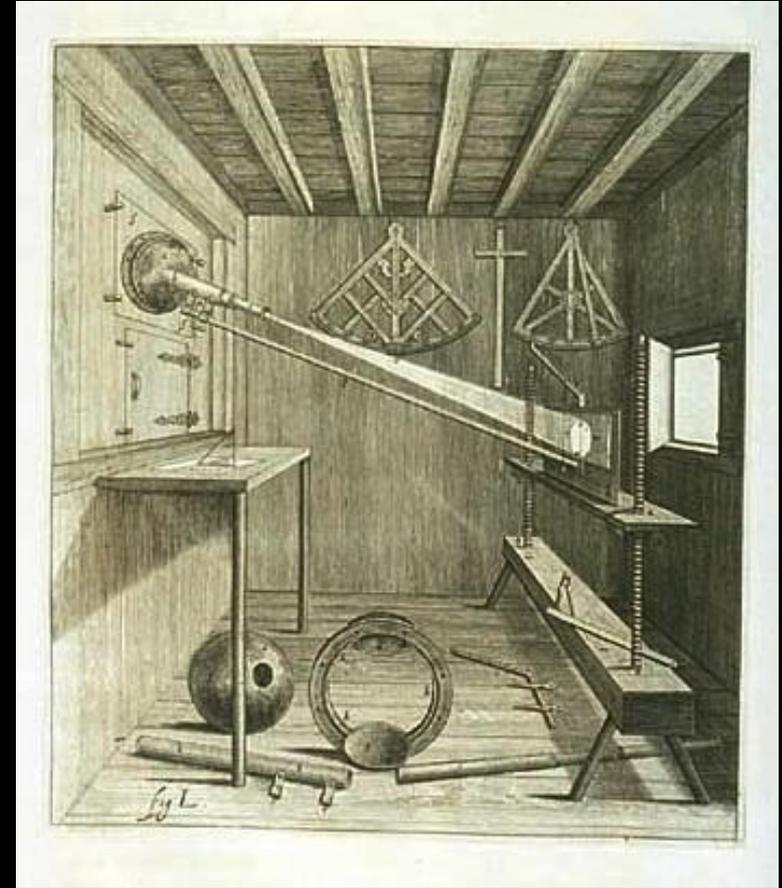
1610: premières observations des taches solaires par Galilée

Thomas Harriot (1560-1621) GB

Galileo Galilei (1564-1642) I

Christoph Scheiner (1573-1650) D

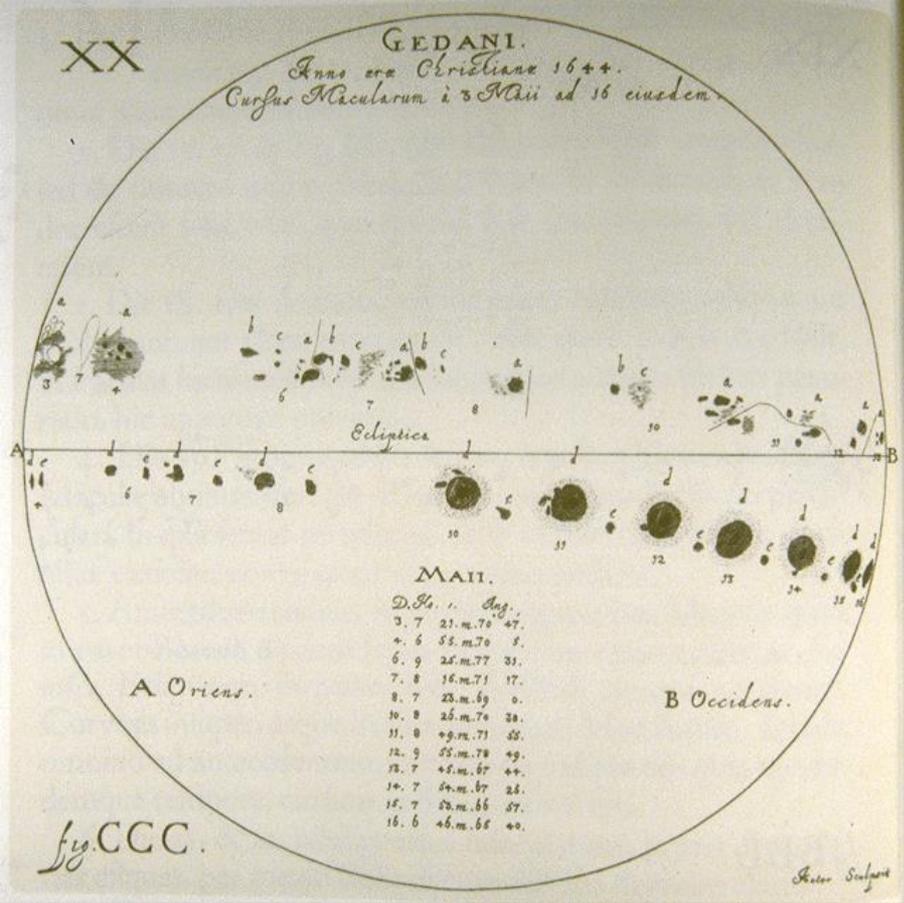
Johannes Fabricius (1564-1617) D



Observation par projection

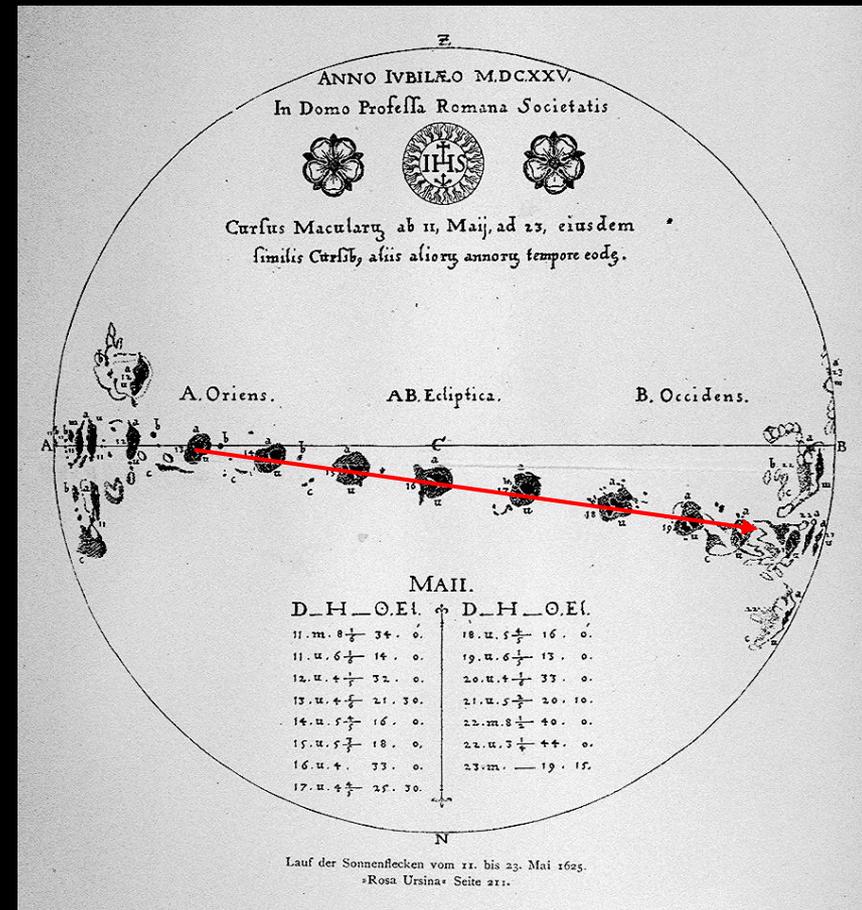
XX

GEDANI.
Anno erae Christianae 1644.
Cursus Macularum à 3 Maii ad 16 eiusdem.



← Dessins d'Hevelius (1611-1687), en 1644, tiré de Selenographia (publié en 1647)

4000 jours d'observation entre 1642 et 1684 !



Dessin de Christoph Scheiner (1573-1650) observations 1625-1626



Le siècle de l'astrométrie

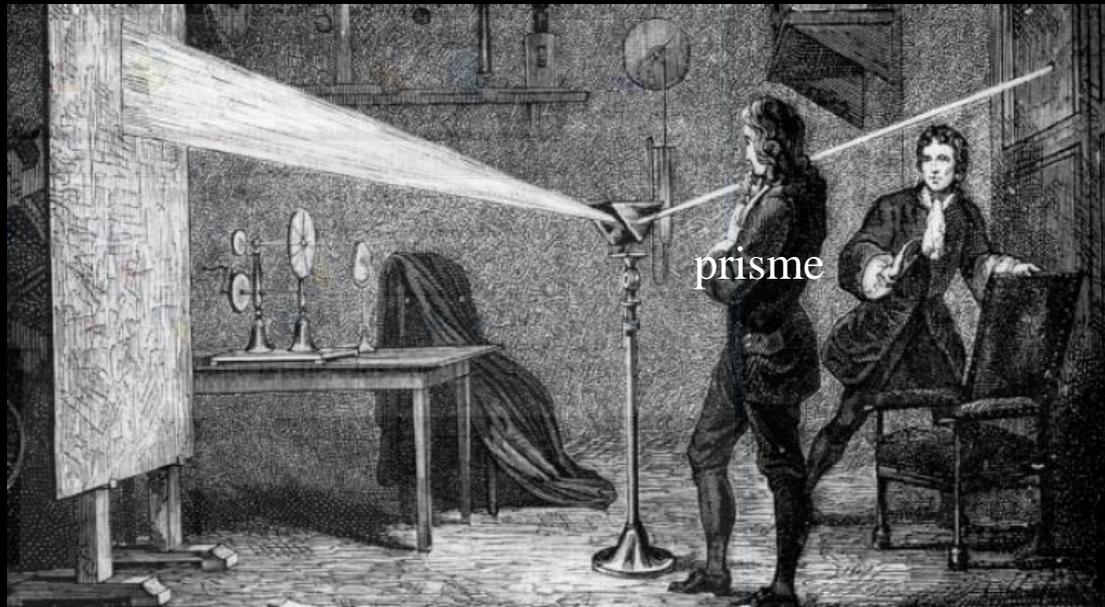
→ *Mesures du diamètre solaire
(déduction de l'excentricité de l'orbite
terrestre)*

→ *Mesures de position des taches*

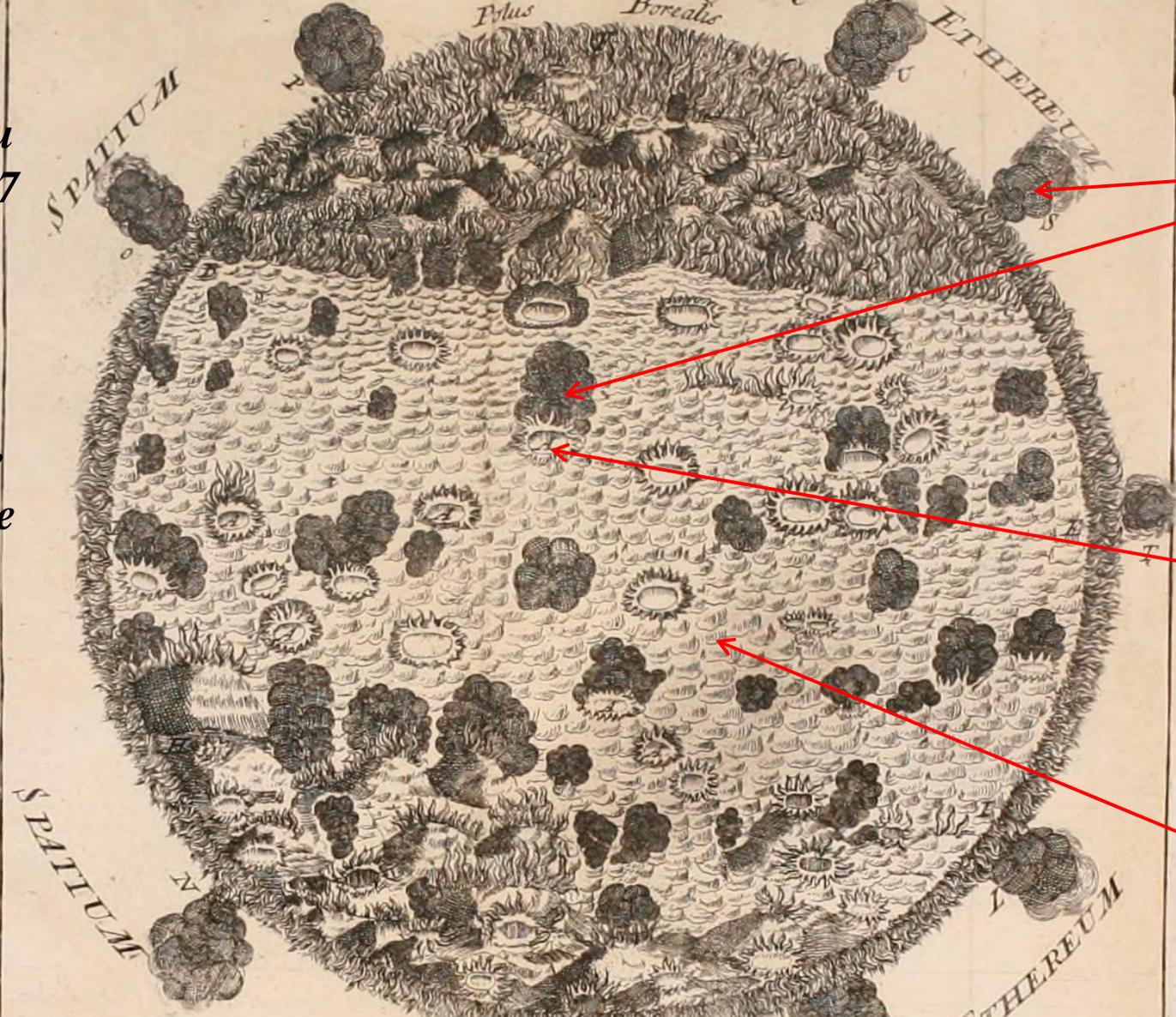
Observateurs du diamètre au XVII/XVIIIème siècle →

| no | author | date | method | N | RI(") |
|----|----------|------|--------|------|-------|
| 1 | Mouton | 1660 | PP | 86 | 959.4 |
| 2 | Auzout | 1666 | MI | 2 | 965.2 |
| 3 | Picard | 1670 | MI | 304 | 964.6 |
| 4 | Richer | 1672 | DP | 26 | 961.9 |
| 5 | Picard | 1674 | DP | 154 | 962.9 |
| 6 | La Hire | 1683 | MI | 14 | 963.2 |
| 7 | La Hire | 1684 | DP | 304 | 965.4 |
| 8 | La Hire | 1701 | DP | 6980 | 963.6 |
| 9 | Louville | 1724 | DP | 10 | 962.4 |
| 10 | Bouguer | 1753 | HE | 14 | 957.3 |
| 11 | Mayer | 1759 | DP | 105 | 960.4 |
| 12 | Lalande | 1760 | HE | 12 | 961.1 |
| 13 | Lalande | 1764 | HE | 12 | 961.4 |

1666: Newton (1643-1727) découvre le spectre continu du Soleil



Schema corporis SOLARIS, prout a P.P. Kirchero
et Scheinero Roma Anno 1683 observatum fuit.
Polaris Borealis



SPATIUM

ETHEREUM

SPATIUM

ETHEREUM

FF. Axis Globi Solaris. DE. Aequator Solaris. Polus Australis. BEC. Spacium Solis boreale. HGI. Spacium Solis australe. B. C. H. I. Spacium Solis torridum. P. Q. N. M. etc. Evaporaciones unguis et macularum Origis

Une vision du Soleil en 1727 (Tobias Swinden, 1659-1719, recherches sur la Nature et sur la place de l'enfer), dessin selon Kircher (1601-1680), Mundus subterraneus (1665)

« Les exhalaisons et l'origine des taches »

« Les sources de la lumière » (facules ?)

« la région du Soleil brûlante »

La nature du Soleil

La nature du Soleil et des étoiles a été un sujet continu de questionnement au cours de l'histoire :

- Pour Anaxagore, au Ve siècle avant JC, le Soleil est un rocher incandescent.
- Pour Aristote, au IVe siècle avant JC, les corps célestes sont constitués d'une autre matière que les 4 éléments terrestres. L'Univers est éternel.
- Pour Jean Philopon, philosophe chrétien au VIe siècle, les étoiles sont des soleils.
- Pour Giordano Bruno, fin XVe siècle, les étoiles sont des soleils entourés de planètes.
- Au XIXe siècle, l'émergence de la spectroscopie permet d'analyser la nature du Soleil.

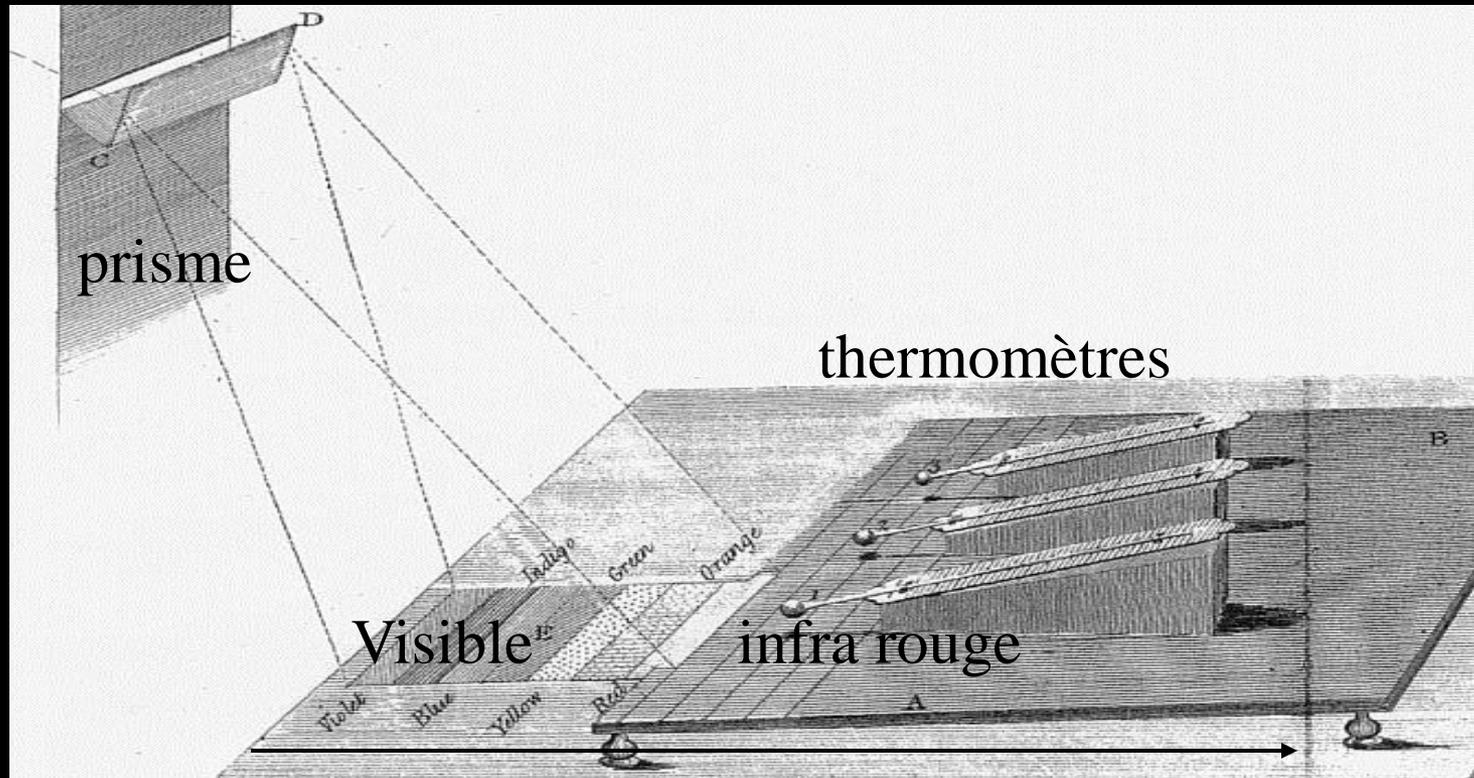
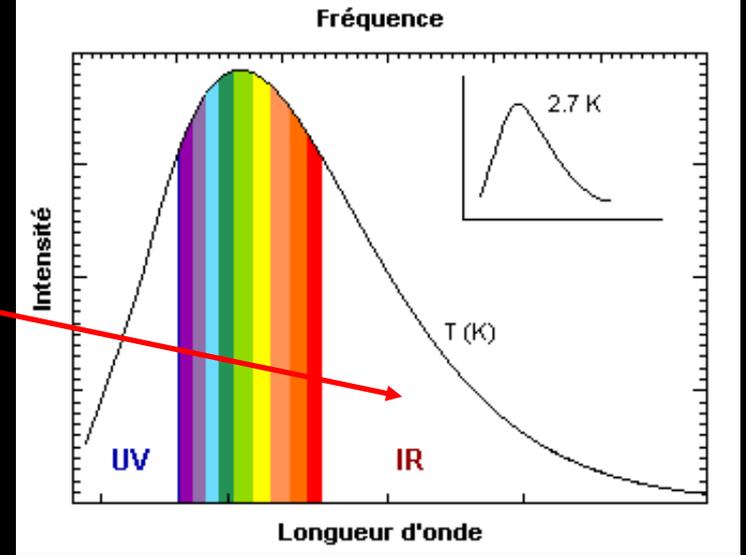
La nature du Soleil

La question énergétique se pose dès le XVIII^e siècle. Comment le Soleil compense-t-il la perte d'énergie par rayonnement (Herschel, 1795) ?

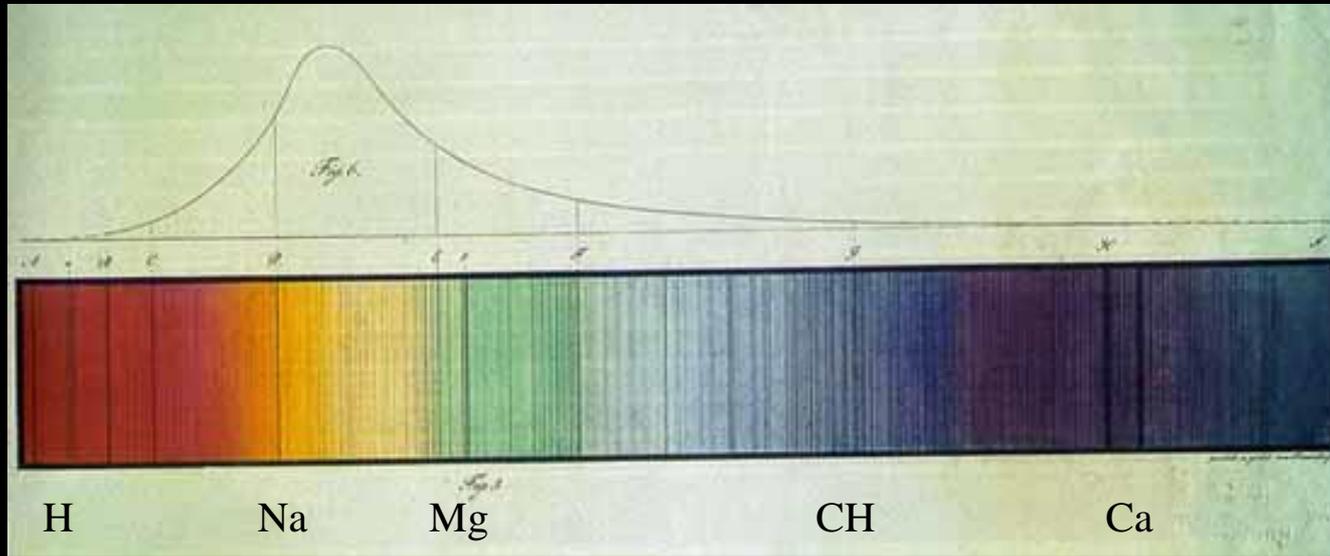
Pour une Terre de 6000 ans (création du monde selon la tradition biblique, ou de quelques millions d'années (Buffon), le mécanisme de Kelvin-Helmholtz convient ; mais lorsque la géologie, par datation des roches terrestres, conduit à un âge supérieur au milliard d'années, les choses se compliquent.

- En 1804, Helmholtz suppose que le Soleil tire son énergie de sa contraction gravitationnelle.
- En 1919, Eddington suppose une origine nucléaire, par fusion de l'hydrogène.
- En 1939, le premier mécanisme de fusion de l'hydrogène est proposé par le physicien Hans Bethe.

1800: William Herschell (1738-1822) découvre le rayonnement infrarouge du Soleil (la moitié de l'énergie solaire !)



1817: Joseph von Fraunhofer (1787-1826) découvre le spectre de raies d'absorption du Soleil

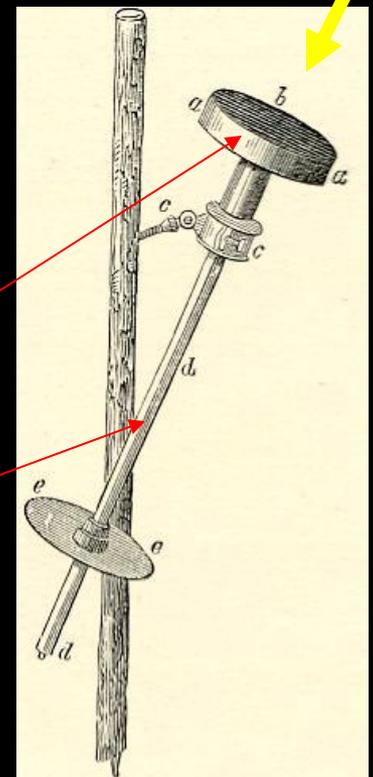


1838: première tentative de mesure de la « constante solaire » avec le pyrhéliomètre de Claude Pouillet (1790-1868)

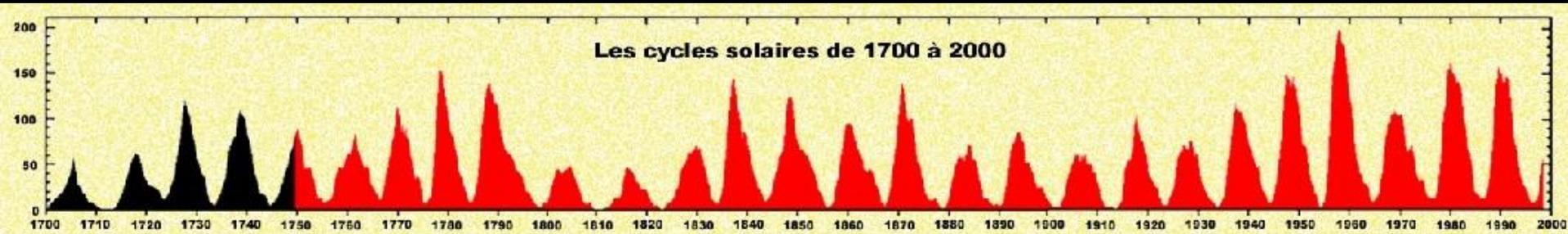
→ Estimation de la température de surface du Soleil et de sa luminosité

Eau + capot noir

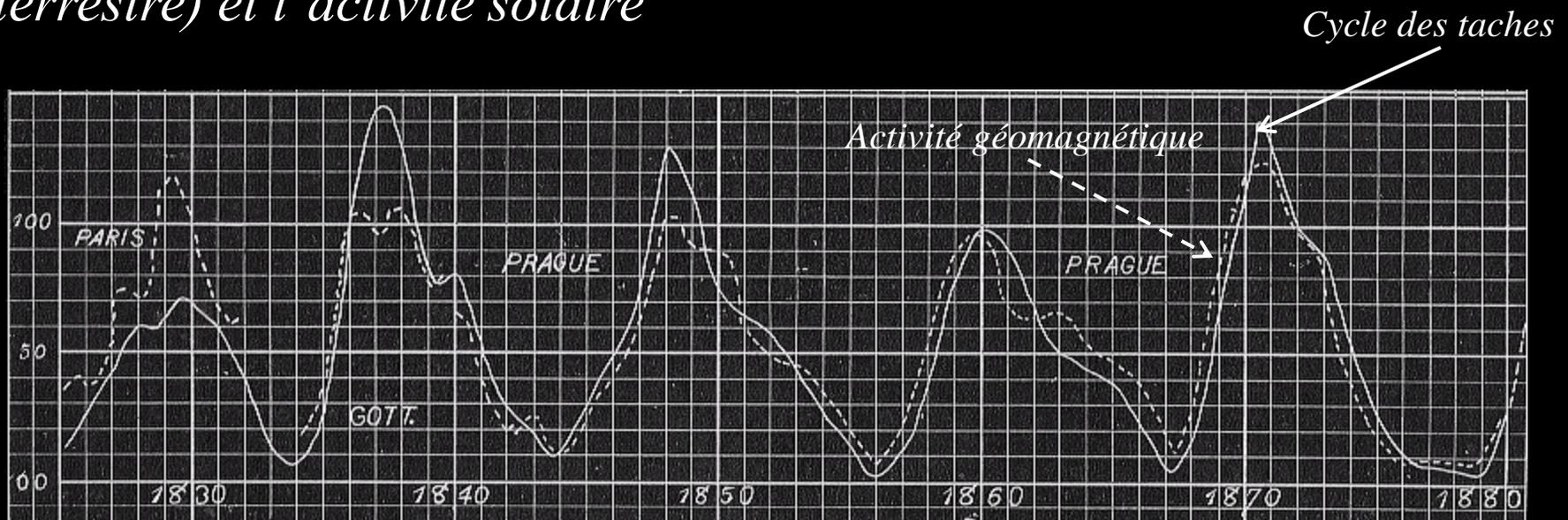
thermomètre



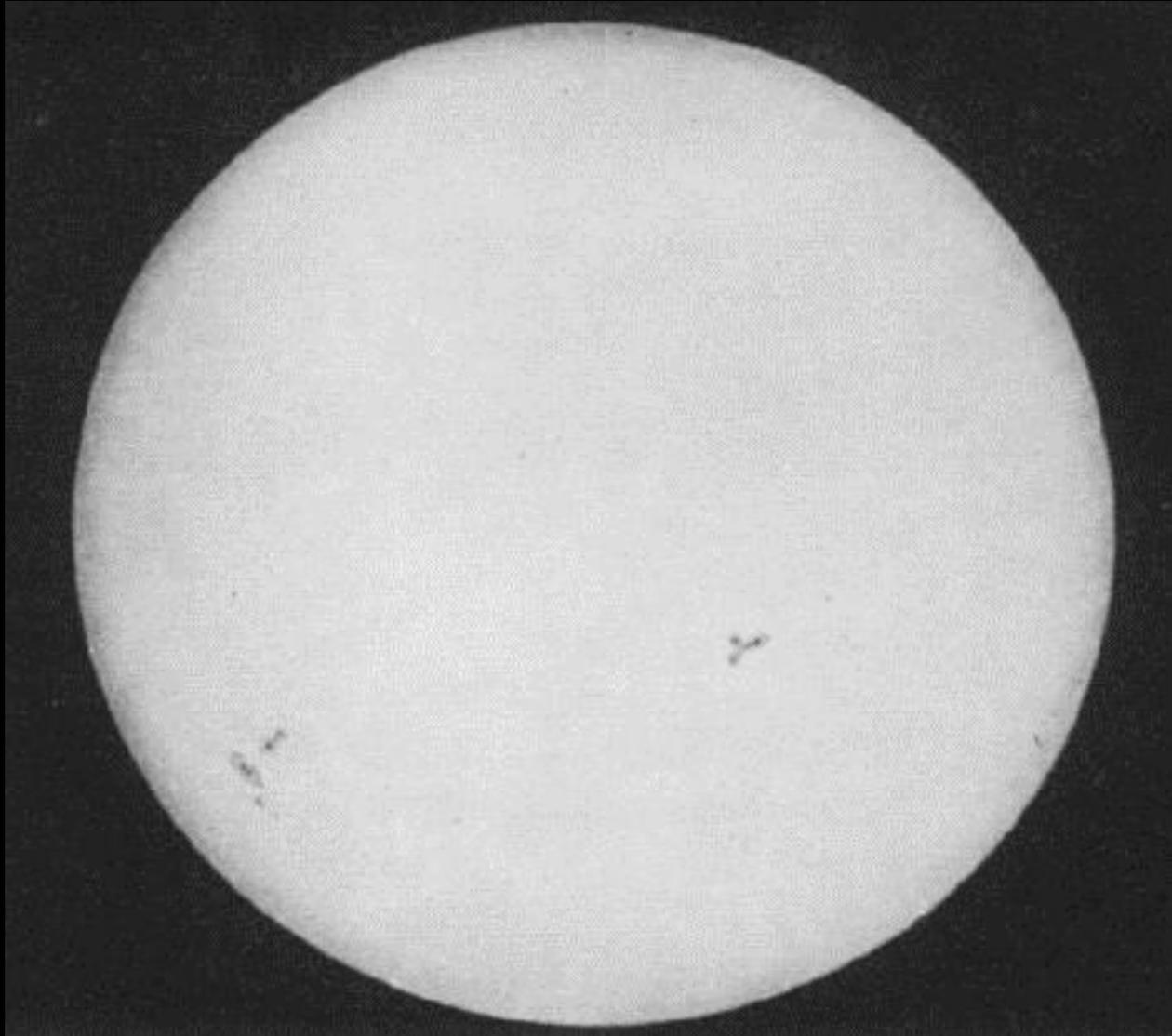
1843: découverte du cycle des taches de 11 ans par Heinrich Schwabe (1789-1875)



1852: Edward Sabine (1788-1883) découvre la corrélation entre l'activité géomagnétique (fluctuations du champ magnétique terrestre) et l'activité solaire

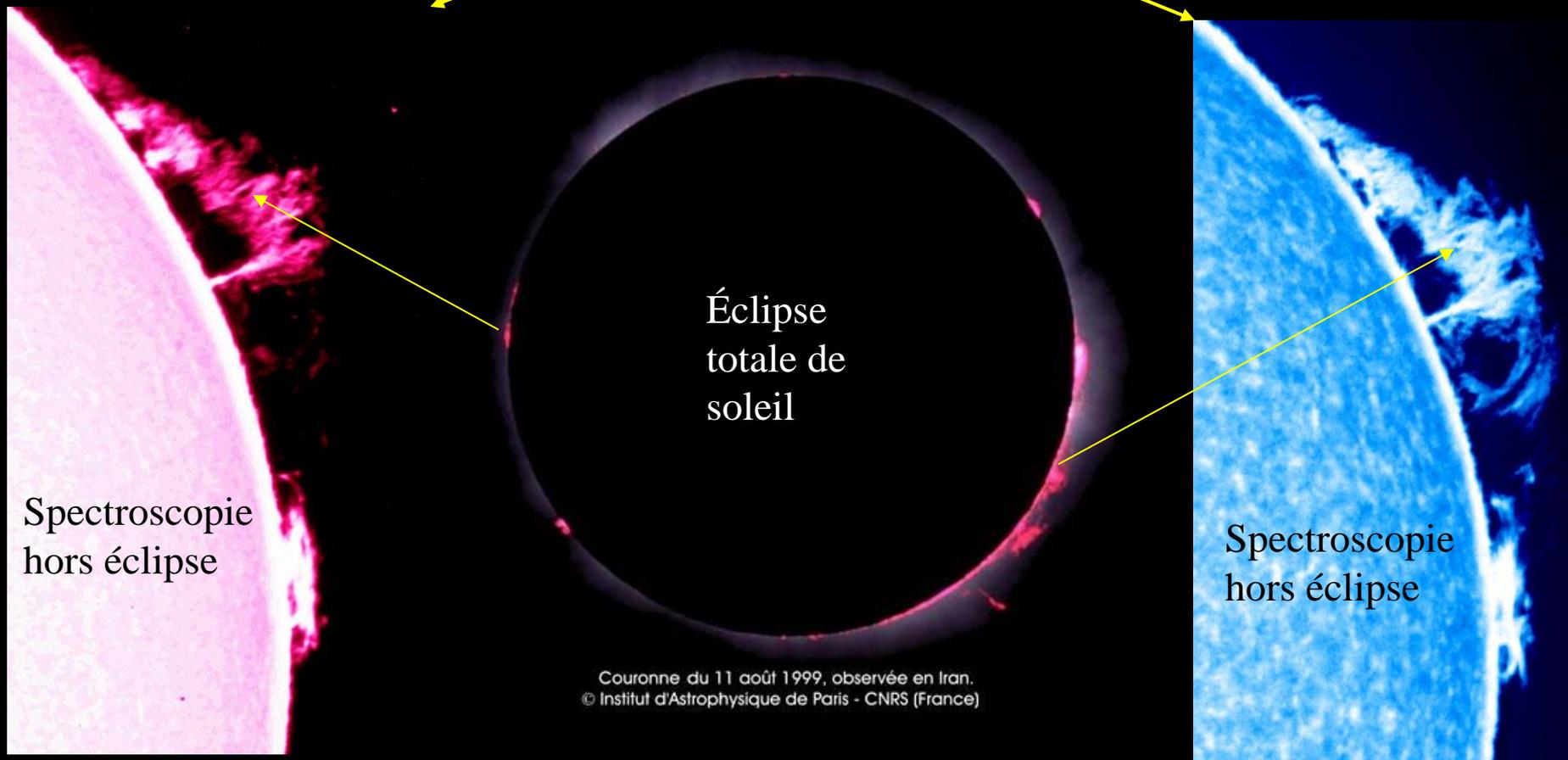


1845: Hippolyte Fizeau (1819-1896) et Léon Foucault (1819-1868) réalisent le premier daguerréotype du Soleil



L'éclipse du 18 Août 1868 : le triomphe de la spectroscopie

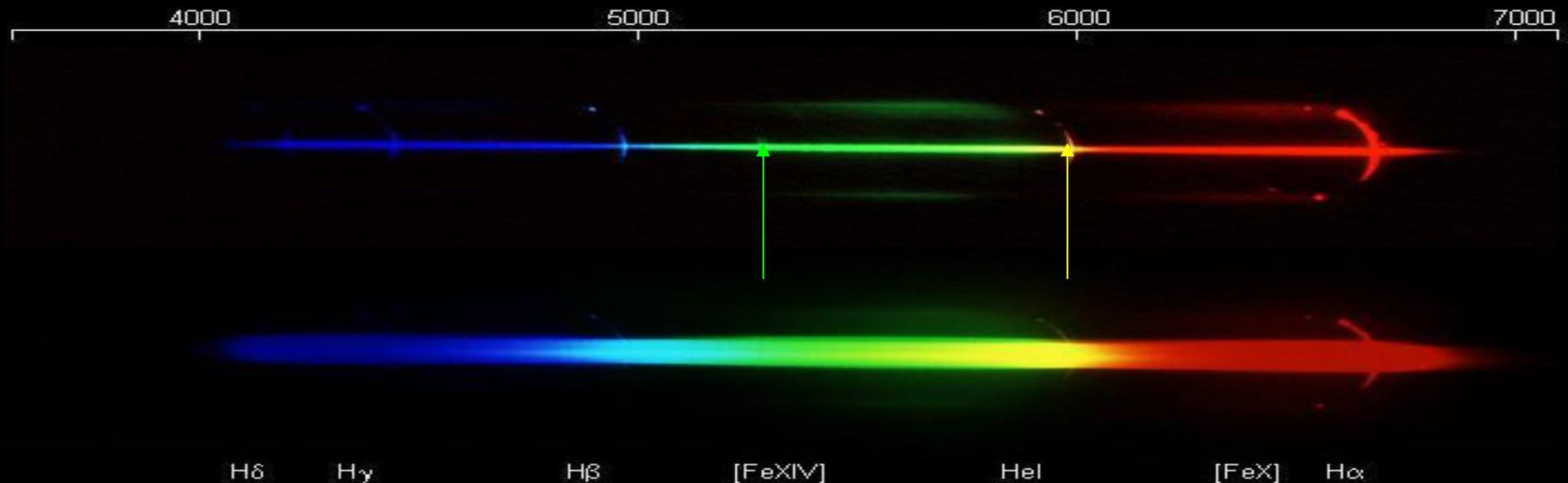
Jules Janssen (1824-1907) et Norman Lockyer (1836-1920) démontrent la possibilité d'observer les protubérances hors éclipse



L'éclipse du 18 août 1868: le triomphe de la spectroscopie

*Jules Janssen (1824-1907) et Norman Lockyer (1836-1920) découvrent l'**HELIUM** par sa signature dans le spectre du Soleil (raie jaune HeI D3 587.5 nm)*

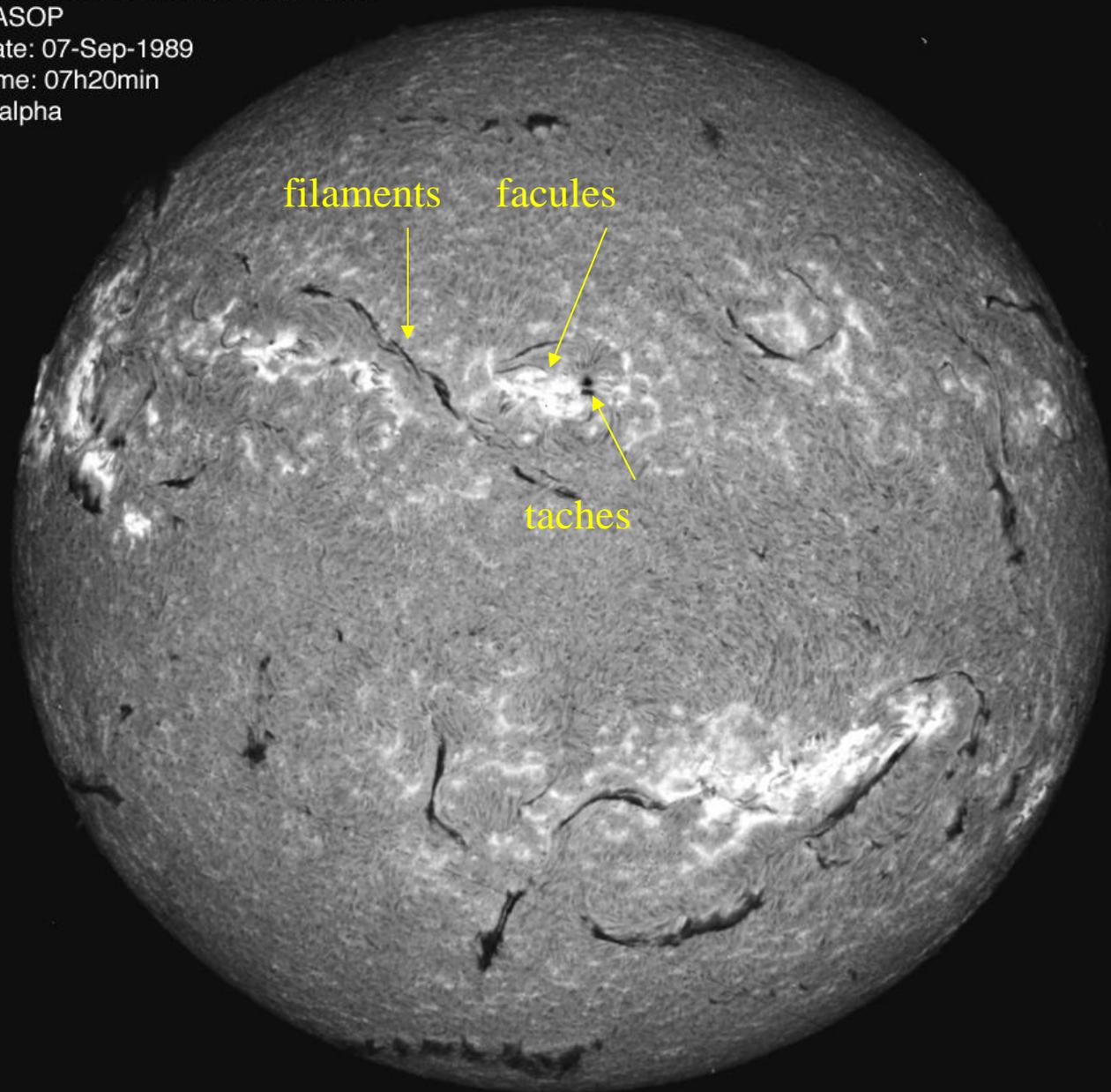
*Eclipse du 7 Août 1869: Thomas Young (1834-1908) découvre les raies « interdites » de la couronne (la « raie verte »); le nouvel élément en cause est baptisé **CORONIUM** et sera identifié 70 ans plus tard comme émis par le Fer 13 fois ionisé à 530.2 nm*



PARIS-MEUDON-OBSERVATORY
DASOP
Date: 07-Sep-1989
Time: 07h20min
H alpha

1909:

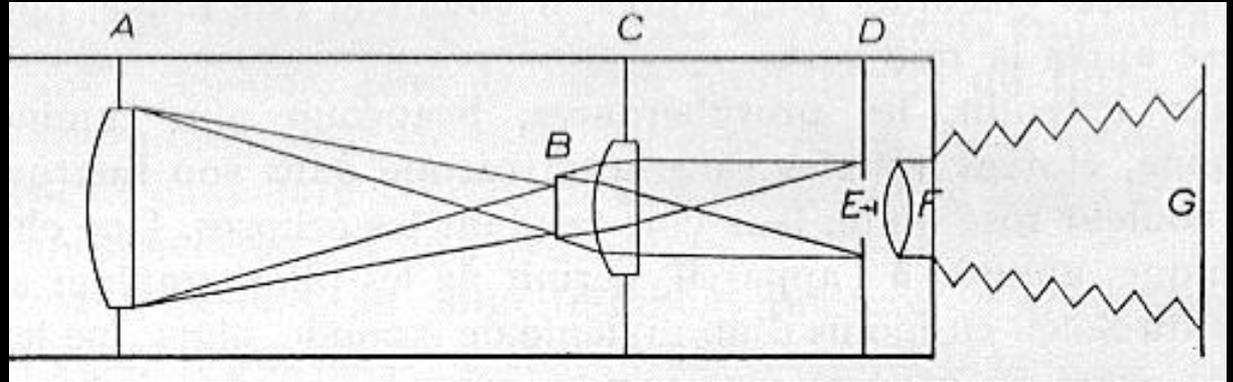
*Henri Deslandres
(1853-1948) et
George Hale, USA
(1868-1938)
inventent le
spectro
héliographe
permettant de
produire des
images mono
chromatiques
(bande passante
0.025 nm)*





1950

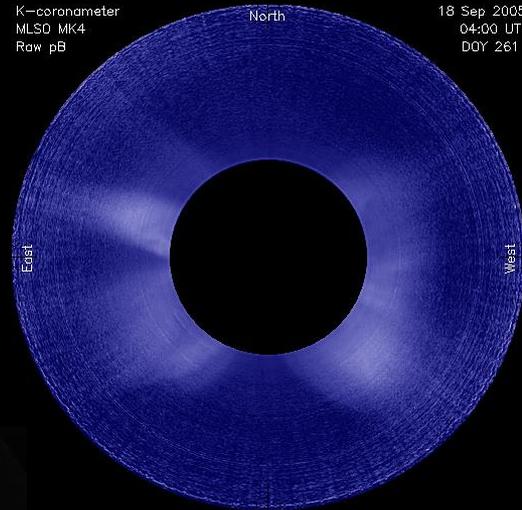
Lyot, le coronographe et le filtre monochromatique biréfringent



K-coronameter
MLSD MK4
Raw pB

North

18 Sep 2005
04:00 UT
DOY 261



Principe du filtre polarisant

Spectre de la lumière solaire
après passage
dans un élément d'épaisseur E



Après passage dans un élément
d'épaisseur 2E



Après passage dans un élément
d'épaisseur 4E



Après passage dans un élément
d'épaisseur 8E

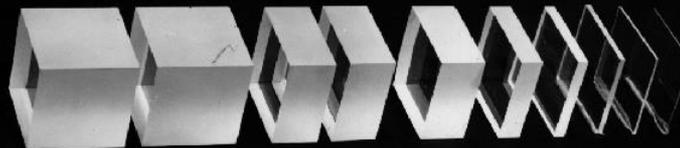


Après passage dans les 4
éléments superposés



La distance entre cannelures dépend de l'élément d'épais.

La bande passante dépend de l'élément d'épaisseur 8E.





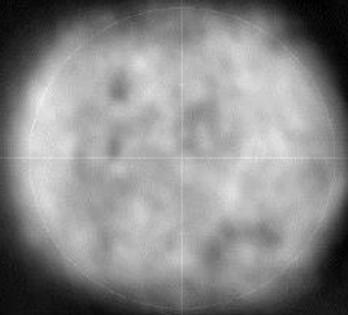


1932: Karl Jansky (1905-1950) découvre le rayonnement radio galactique

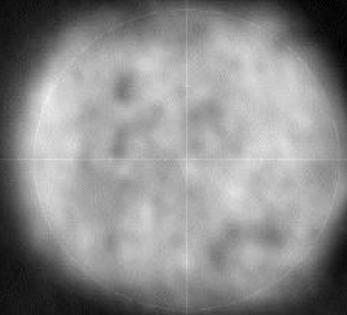
1942: les sursauts radio de la couronne solaire sont découverts par les radars anglais durant la 2ème guerre mondiale

*1953: fondation de la station de radioastronomie de Nançay
Le radiohéliographe*

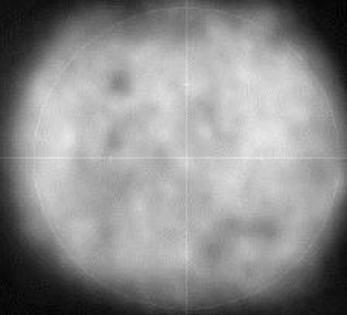
2008-06-01 445 MHz



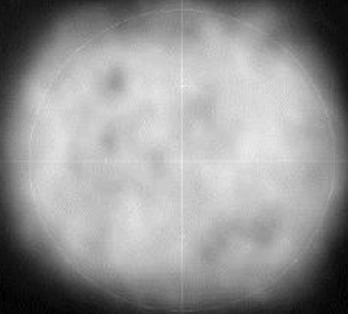
2008-06-01 432 MHz



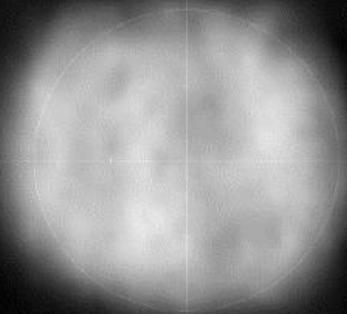
2008-06-01 408 MHz



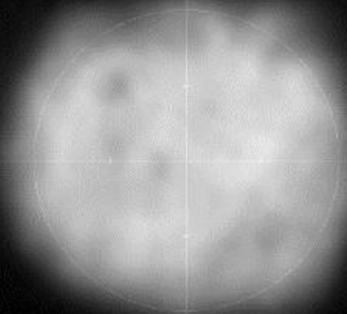
2008-06-01 360 MHz



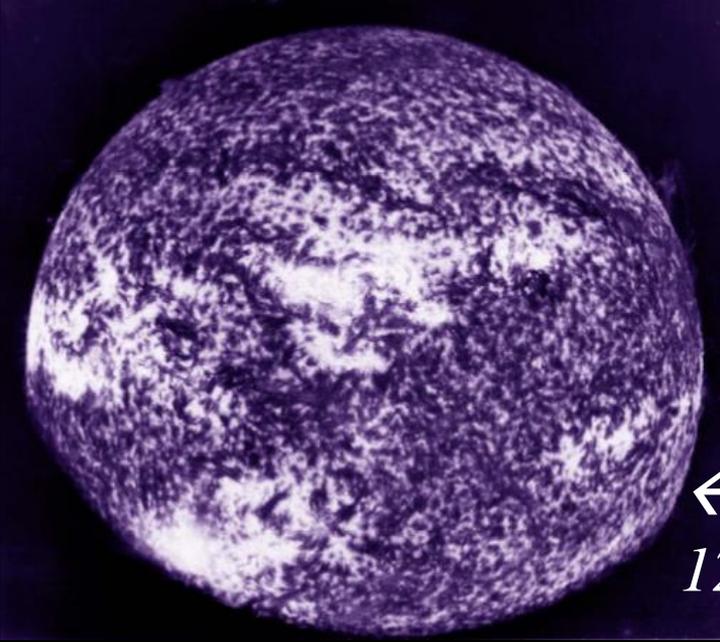
2008-06-01 327 MHz



2008-06-01 298 MHz

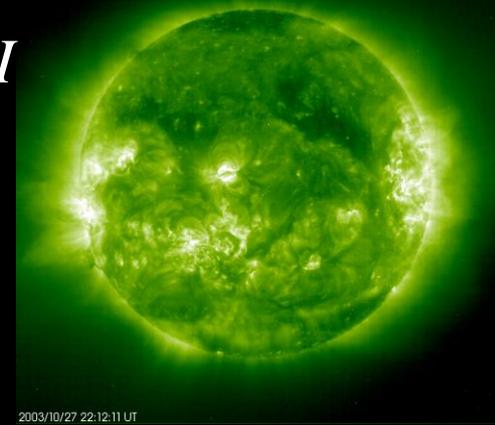


*Seconde moitié du XXème siècle:
l'ère spatiale, le soleil en UV et X*



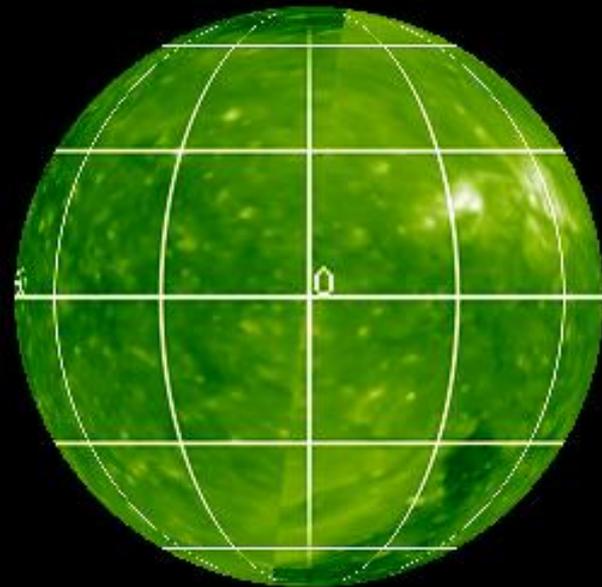
*1996-2009: SOHO FeXII
19.5 nm ($1.4 \cdot 10^6$ K) →*

*← 1979: TRC Ly alpha
121.6 nm (20000K)*



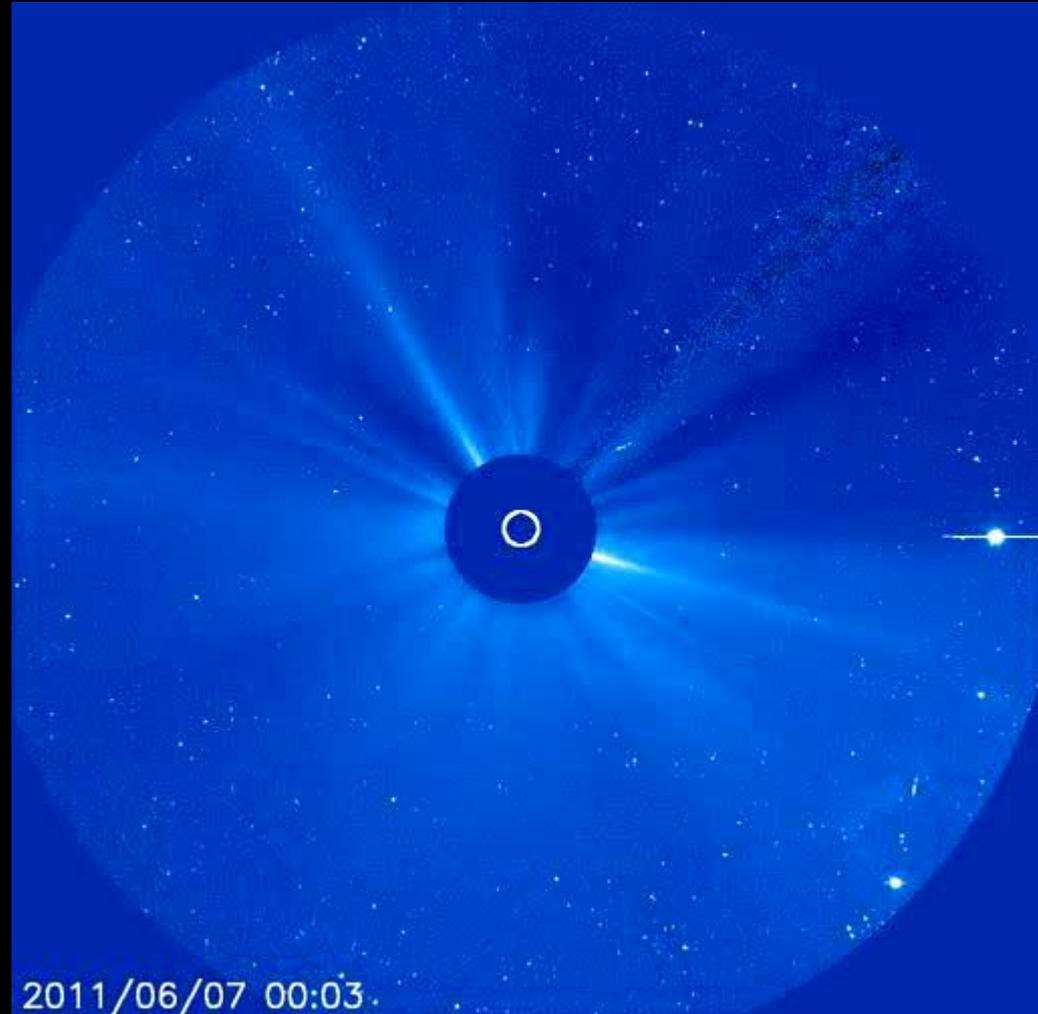
*← 2006: Les 2
satellites STEREO
voient le Soleil en 3D*

*1991-1999: Solar A(Yohkoh)
observe le cycle solaire en
rayons X →*



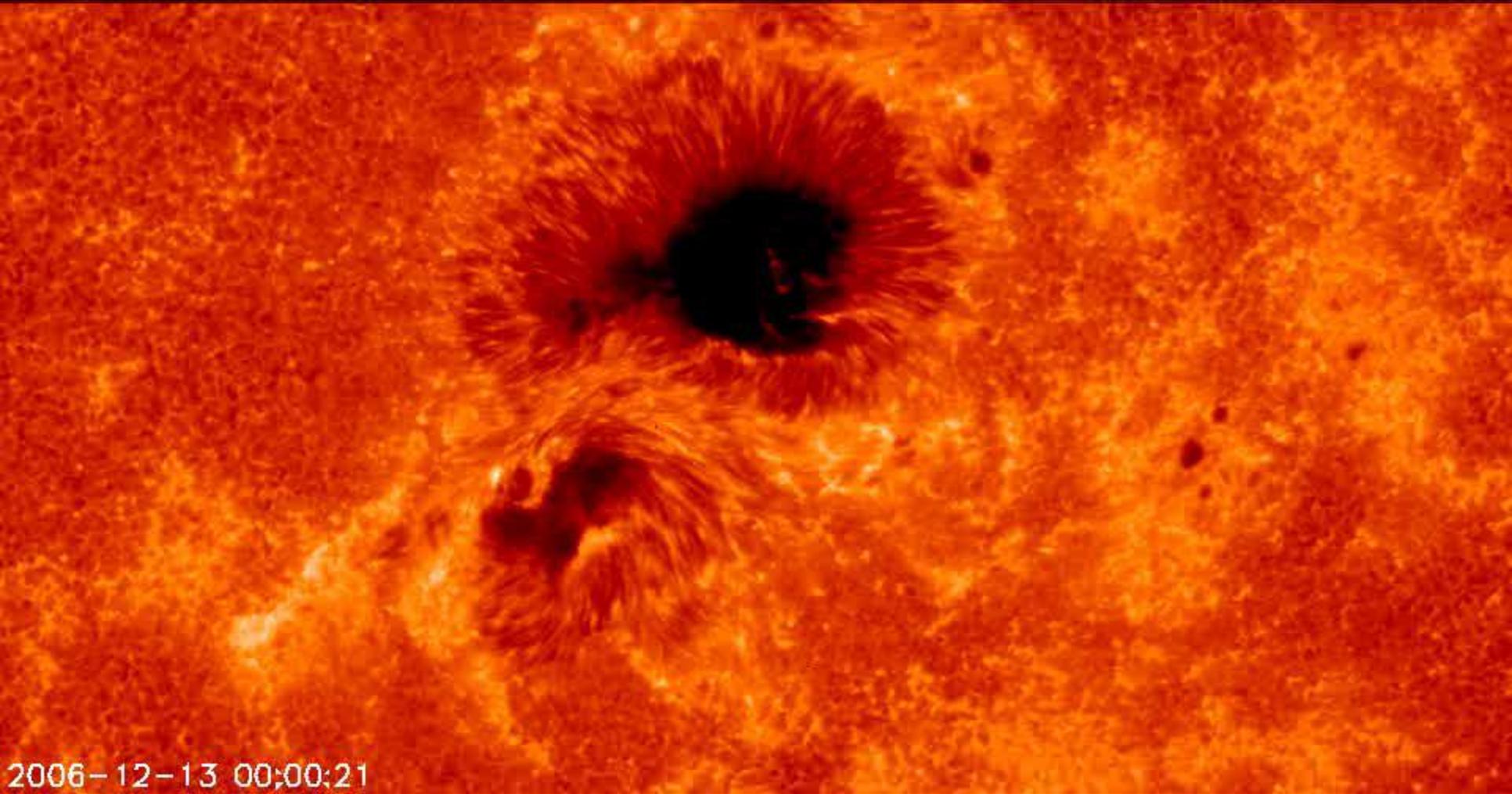
*1996: SOHO au point de
Lagrange L1*

*Les éjections de masse
coronale*
*suite à une éruption
ou à une instabilité d'un
filament*
*(Observation SOHO/ESA-
NASA, coronographe
spatial LASCO)*

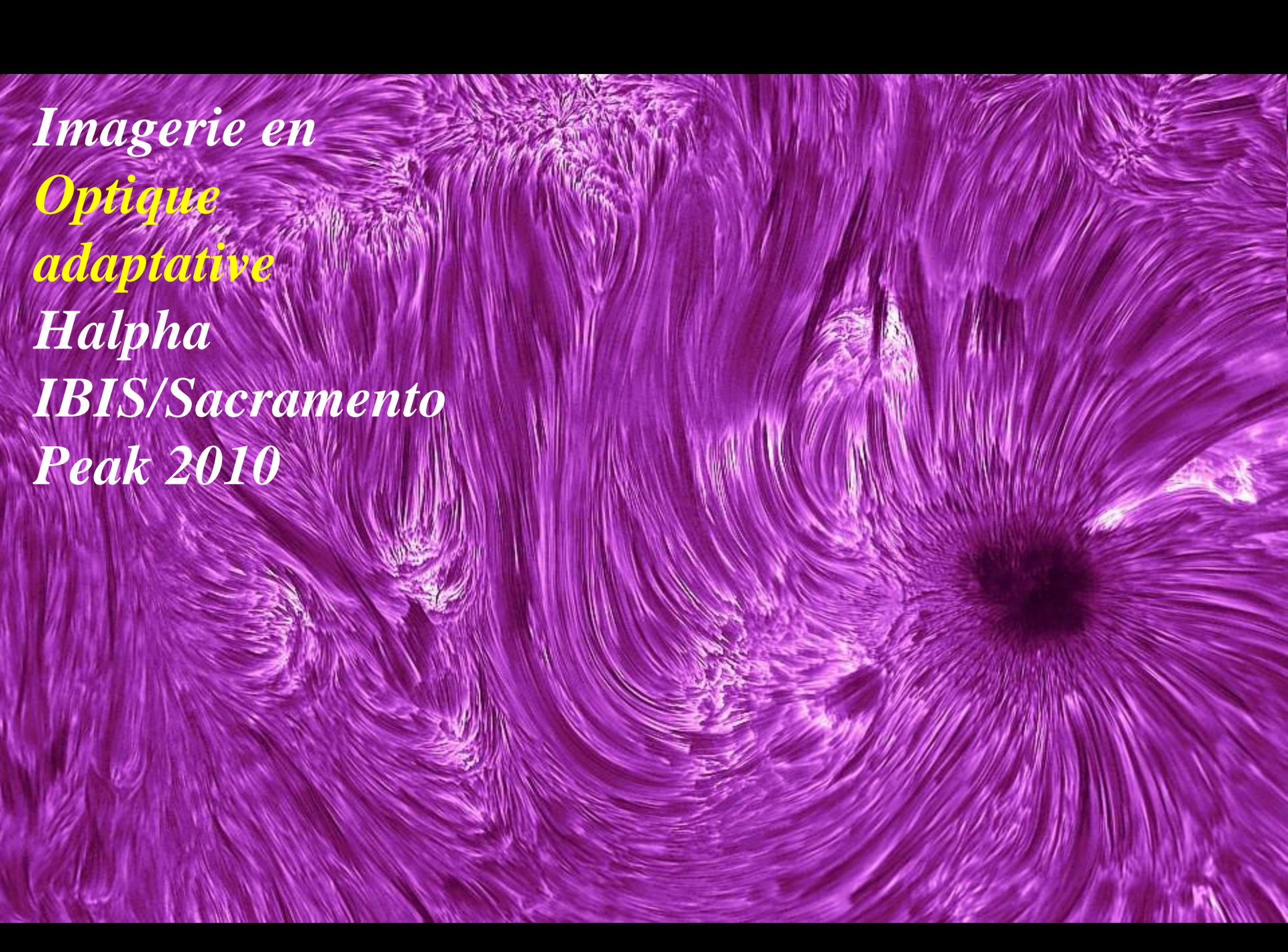


SOLAR B/Hinode 2006 JAXA/NASA

Activité solaire en haute résolution angulaire de 0.3''



2006-12-13 00:00:21



Imagerie en

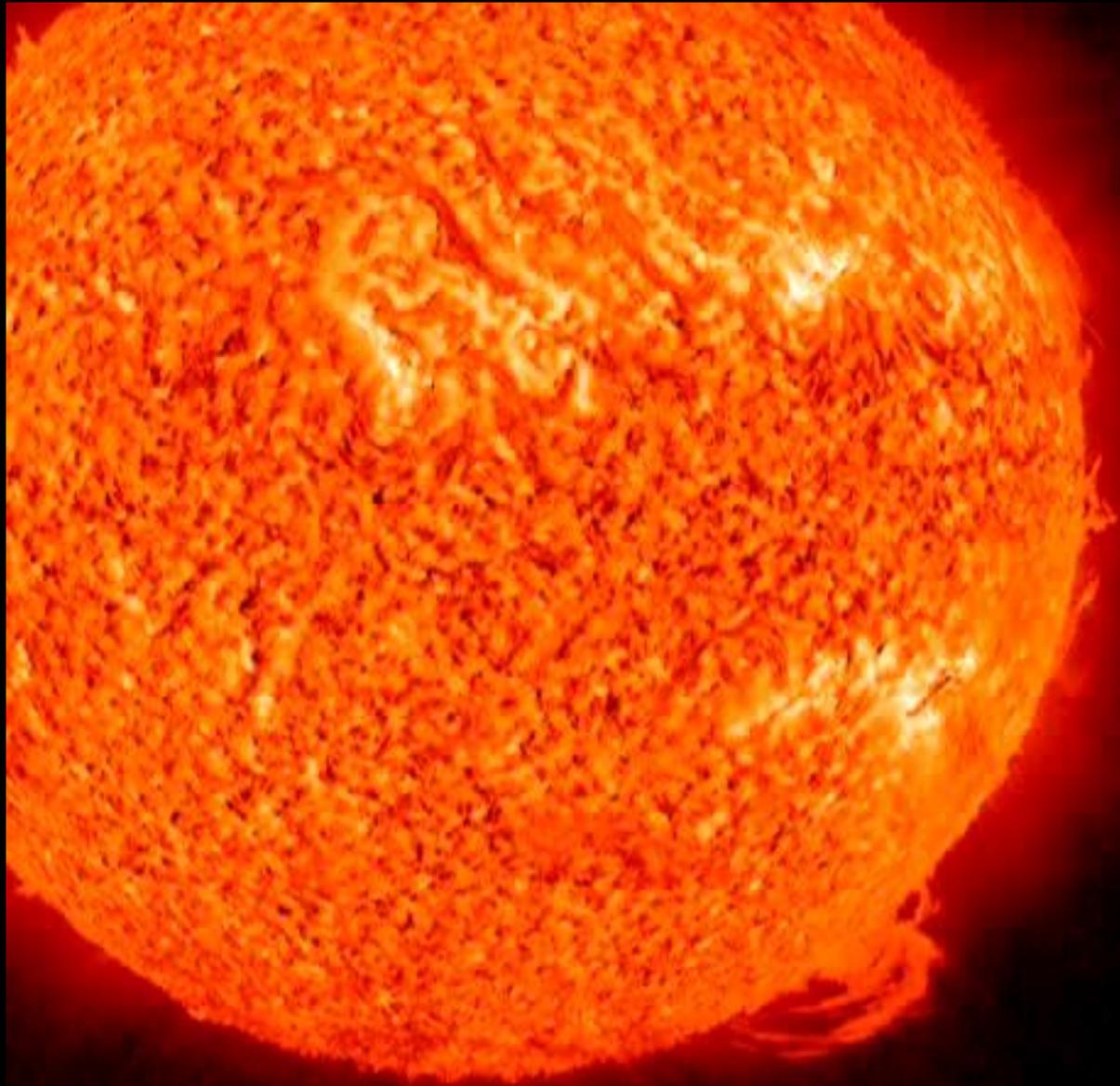
*Optique
adaptative*

Halpna

IBIS/Sacramento

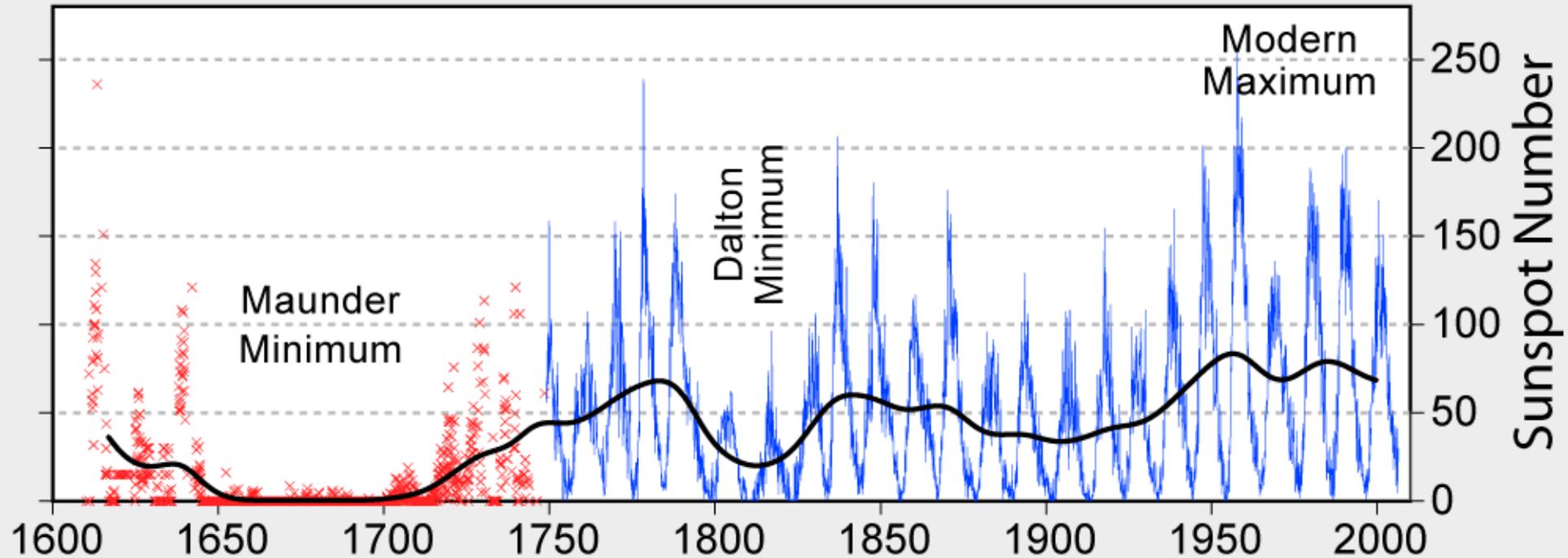
Peak 2010

*Solar
Dynamics
Observatory
NASA 2010*



Les relations entre les cycles solaires et le climat

400 Years of Sunspot Observations



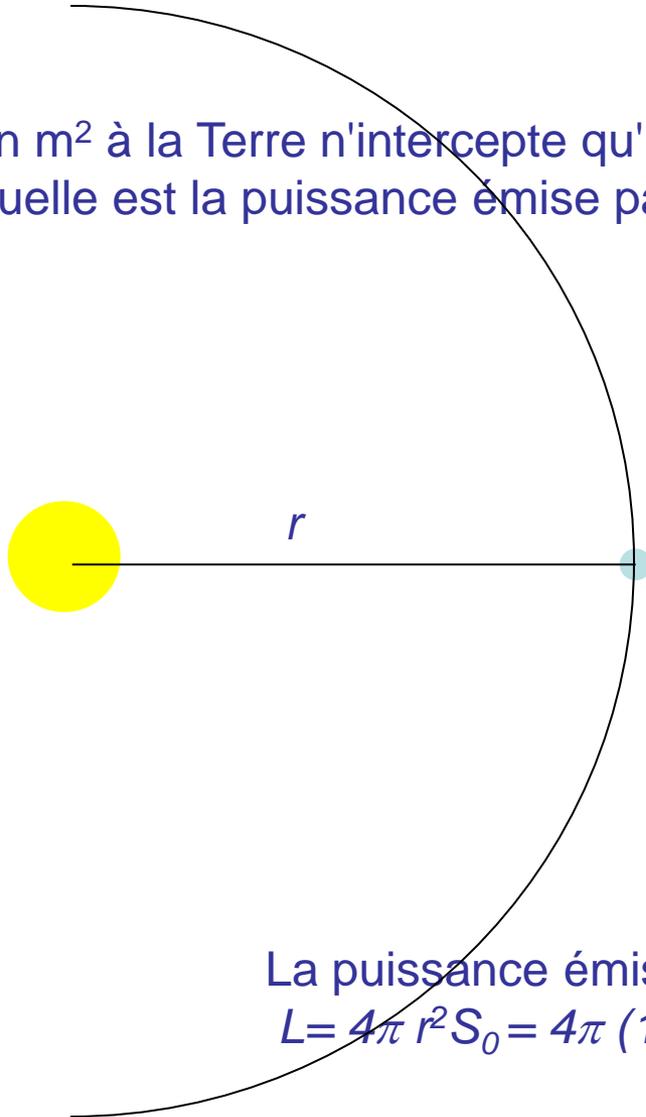
*1890: Gustav Spörer
(1822-1895) et Edward
Maunder (1851-1928)
découvrent le minimum
prolongé de 1645-1705*

*« C'est la 3ème tache qui a paru en cette année 1676,
dans laquelle elles ont été plus fréquentes qu'elles
n'avoient été pendant 20 années précédentes... Elle fut
aperçue par Monsieur Picard en prenant la hauteur du
Soleil pour la rectification des horloges le matin du
trentième d'Octobre... »*

J.-D. Cassini, archives de l'Académie

Le fonctionnement du Soleil

Un m^2 à la Terre n'intercepte qu'une petite fraction de l'énergie du Soleil.
Quelle est la puissance émise par le Soleil ?



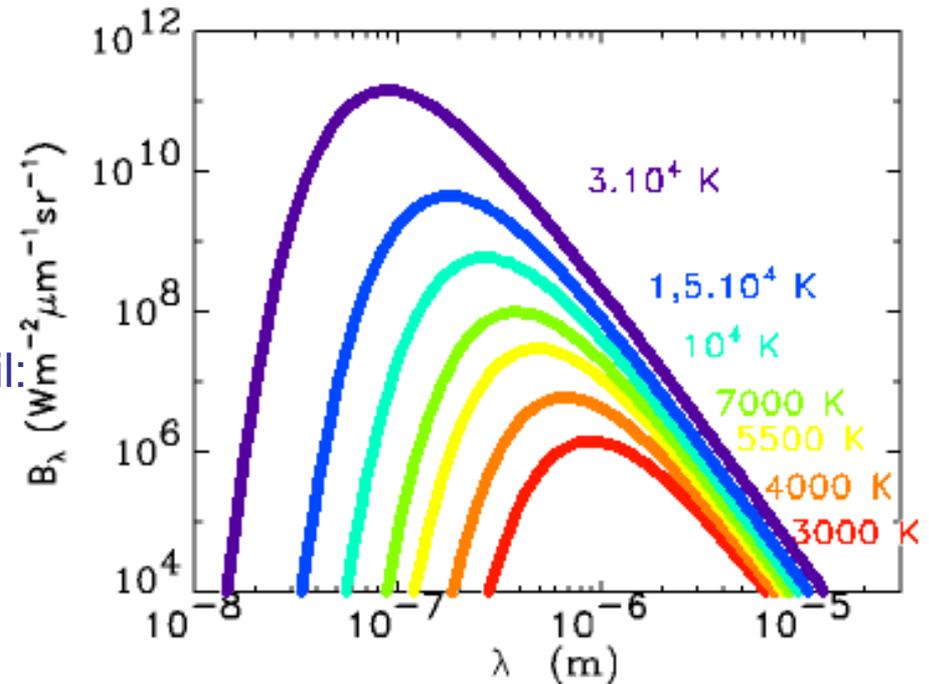
A la distance de la Terre (r), l'énergie émise par le Soleil est répartie sur une sphère de rayon r et de surface $4\pi r^2$. Le flux d'énergie est la puissance émise par le Soleil (L) divisée par cette surface :

$$S_0 = \frac{L}{4\pi r^2}$$

La puissance émise par le Soleil (luminosité) vaut
 $L = 4\pi r^2 S_0 = 4\pi (150 \times 10^9)^2 \times 1400 \text{ W} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$.

- Le Soleil est un « corps noir »: plus un gaz est chaud,
 - plus il émet de la lumière
 - plus la couleur s'approche du bleu
- Température à la « surface » du Soleil:
$$L = 4\pi R_S^2 \sigma T^4 \Rightarrow T \approx 5800 \text{ K}$$

($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)

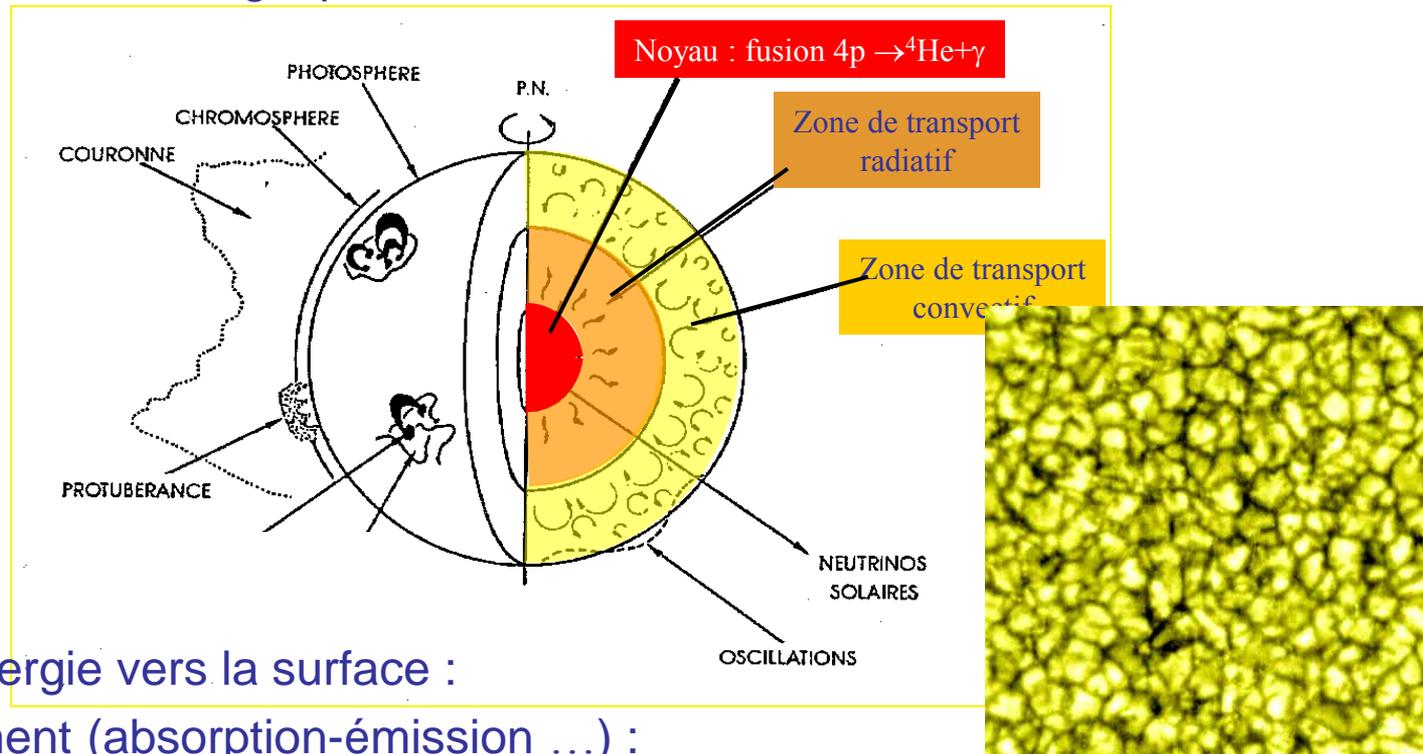


La répartition spectrale du rayonnement selon Planck

Attention: le raisonnement ne s'applique qu'aux gaz denses (équilibre émission-absorption; « corps noir »; intérieur et photosphère solaires)

Structure, génération et transport d'énergie

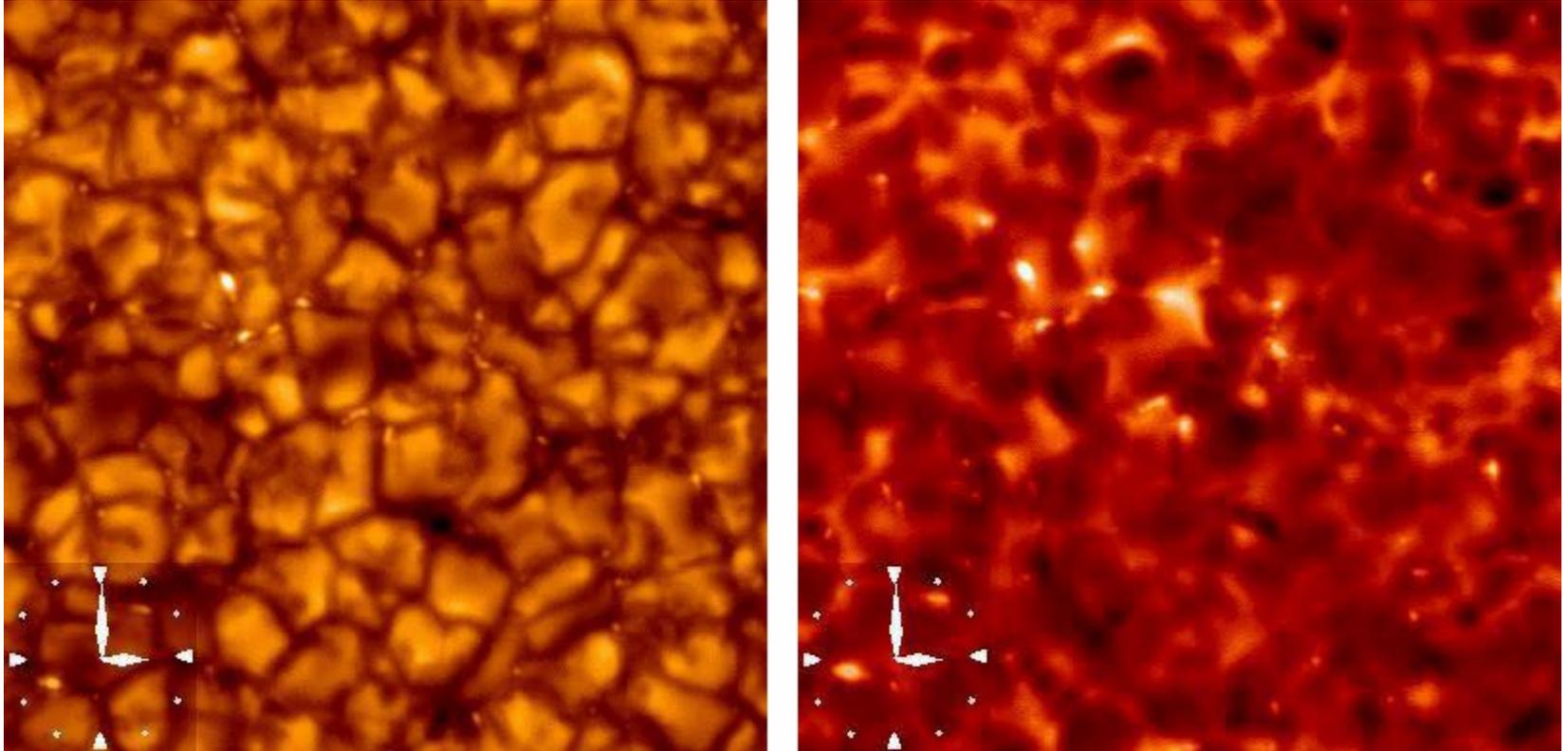
- Noyau : génération d'énergie par fusion nucléaire



- Transport d'énergie vers la surface :

- Rayonnement (absorption-émission ...) :
zone radiative, $r < 0,7 R_S$
- Convection (montée bulles de gaz chaud, expansion et refroidissement, redescence gaz froid): zone convective, $r=(0,7-1) R_S$.
- Granules (observations: Pic du Midi): intérieur brillant (gaz chaud montant), paroi plus sombre (gaz froid descendant)

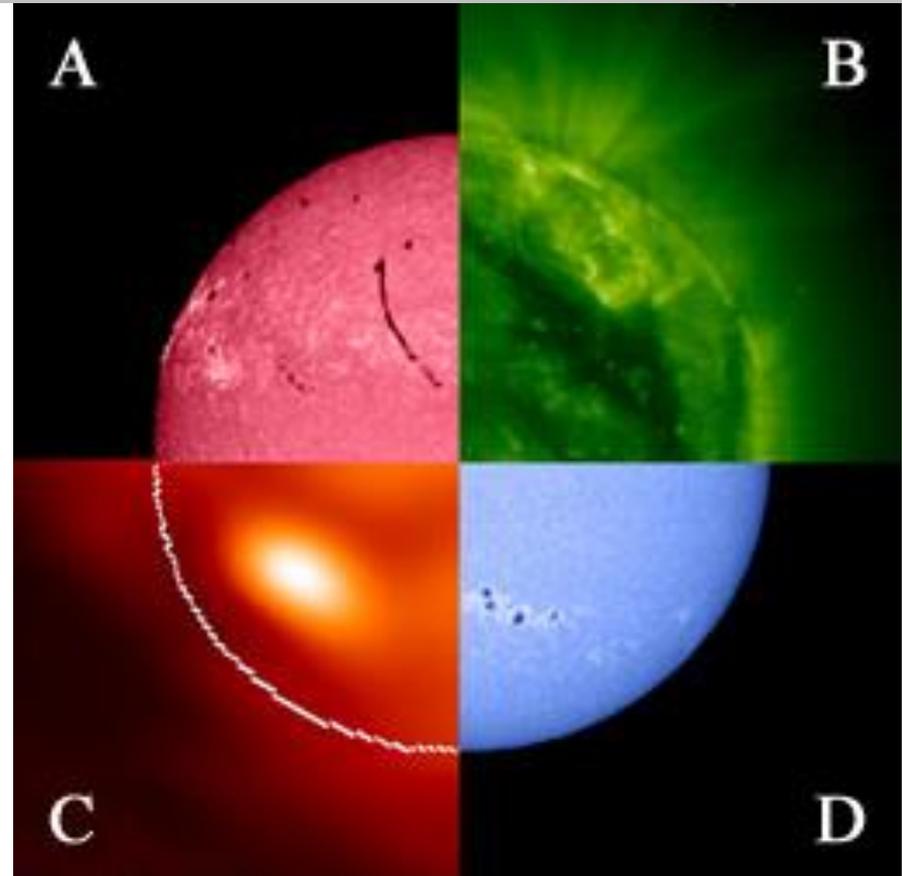
La granulation



Granules: intérieur brillant (gaz chaud montant),
paroi plus sombre (gaz froid descendant)

Le Soleil l'atmosphère

- **Photosphère (D)** : couche rayonnant l'essentiel de l'énergie (photons visibles, $T=5800$ K, max dans le vert). Couche \approx sphérique, force dominante = gravitation. L'énergie cinétique des mouvements convectifs alimente les couches au-dessus.
- **Chromosphère (A)**; visible à l'œil lors d'une éclipse ou dans certaines raies spectrales, p. ex. $H\alpha$)
- **Couronne (B, C)**; visible à l'œil lors d'une éclipse; ou en EUV, X, radio): de nombreuses structures, formées par la gravitation et le champ magnétique.
- Les couches externes (photosphère, chromosphère, couronne) forment l'**atmosphère** du Soleil.

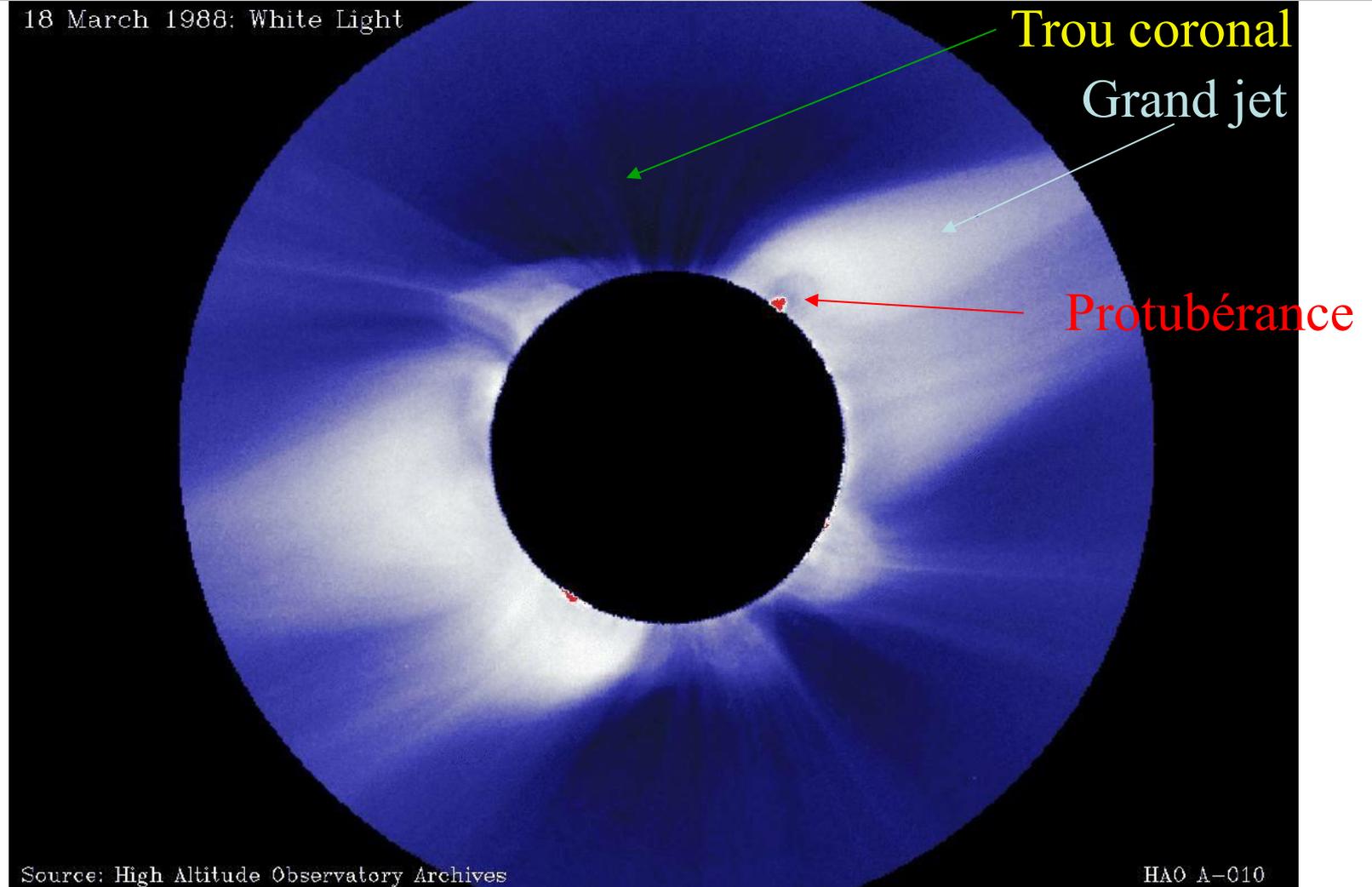


A : spectrohélogramme $H\alpha$ - Obs. Paris-Meudon
B : héliogramme UV 195A - Copyright SoHO/EIT
C : héliogramme radio 164MHz - Obs. Paris-Nançay
D : spectrohélogramme K1v - Obs. Paris-Meudon

Couronne et vent solaires

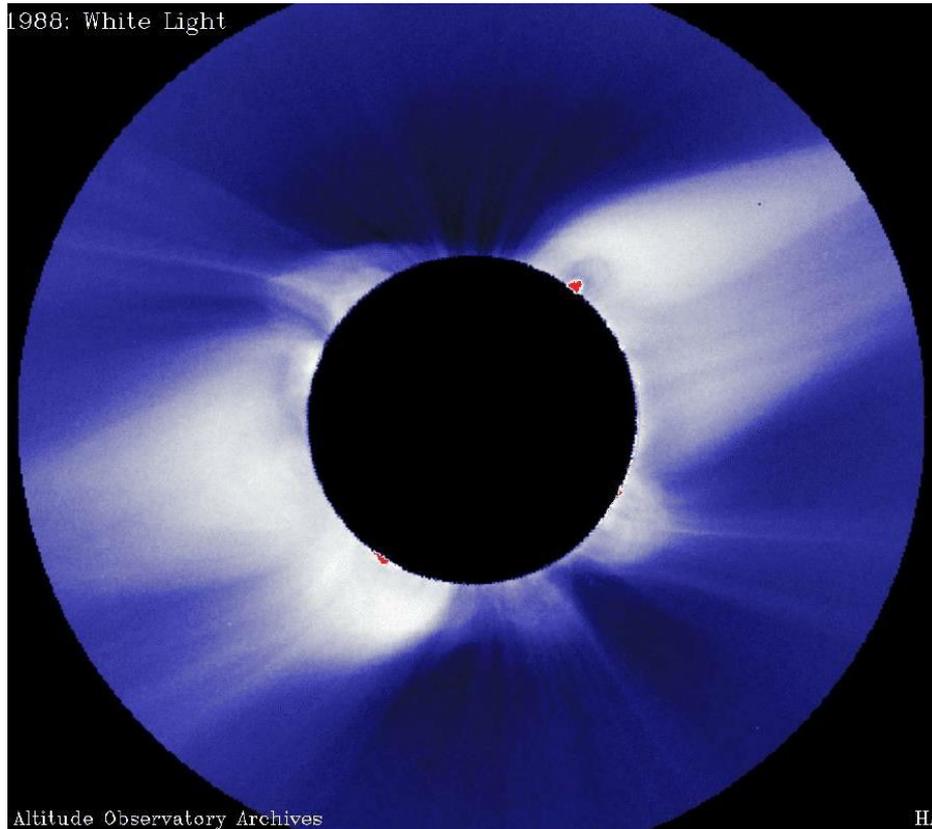
Couronne et vent solaires

La couronne lors d'une éclipse solaire



Couronne et vent solaires

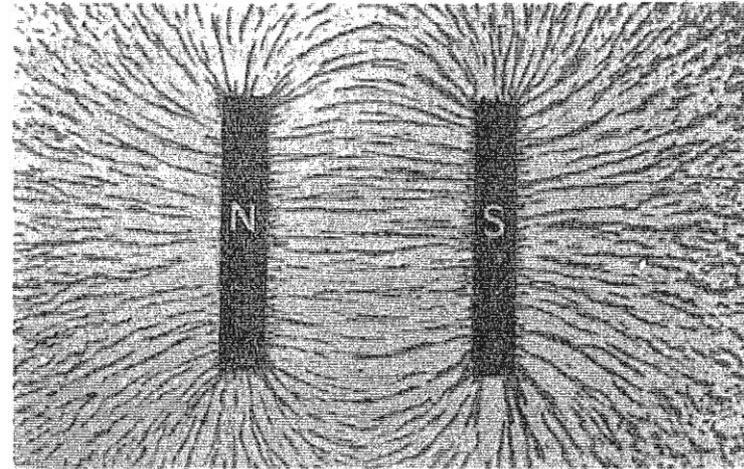
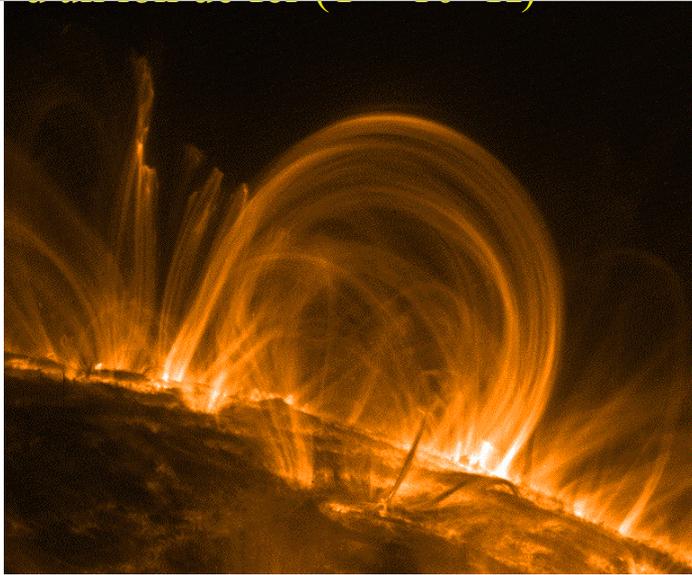
La couronne lors d'une éclipse solaire



- La matière de la couronne :
 - un gaz dilué: 10^8 particules/cm³ à la base, plus dans les régions actives
 - Comparable à l'atmosphère de la Terre à 400 km d'altitude (station spatiale; 8×10^8 atomes/cm³)
- La couronne n'est pas un « corps noir »
- La répartition de l'intensité ne reflète pas des différences de température, comme dans le cas du corps noir, mais des différences de quantité de matière le long de la ligne de visée !
- Quelles particules ?

Couronne et vent solaires

Champ magnétique



- Pourquoi la couronne apparaît-elle si structurée (« boucles coronales »)?
- Matière électriquement chargée: les structures montrent des lignes de force du champ magnétique. Analogie: limaille de fer traçant les lignes de force d'un aimant.
 - Lignes de force fermées (boucles; en particulier dans les régions actives) : le plasma est confiné.
 - Lignes de force « ouvertes » (se bouclant dans l'espace interplanétaire) : le plasma (chaud) peut s'échapper dans l'espace.

Couronne et vent solaires en résumé

- **Couronne solaire** = enveloppe ionisée diluée & chaude (« plasma ») structurée par le champ magnétique.
- Du fait de la forte pression (haute température) de la couronne, le plasma
 - s'échappe dans l'espace interplanétaire là où il n'est pas retenu par des lignes de champ magnétique « fermées » à basse altitude (quelques fractions de R_S au-dessus de la photosphère),
 - ouvre les lignes de champ à grande altitude :
 - crée le **vent solaire** (électrons, protons, particules α ($=^4\text{He}$), ...).
- Le vent solaire est un phénomène permanent (\neq activité éruptive).
- Le vent solaire entraîne le champ magnétique du Soleil dans l'espace interplanétaire.
- La connexion magnétique avec le Soleil structure l'espace interplanétaire.
- Questions ouvertes: chauffage couronne, accélération du vent solaire.

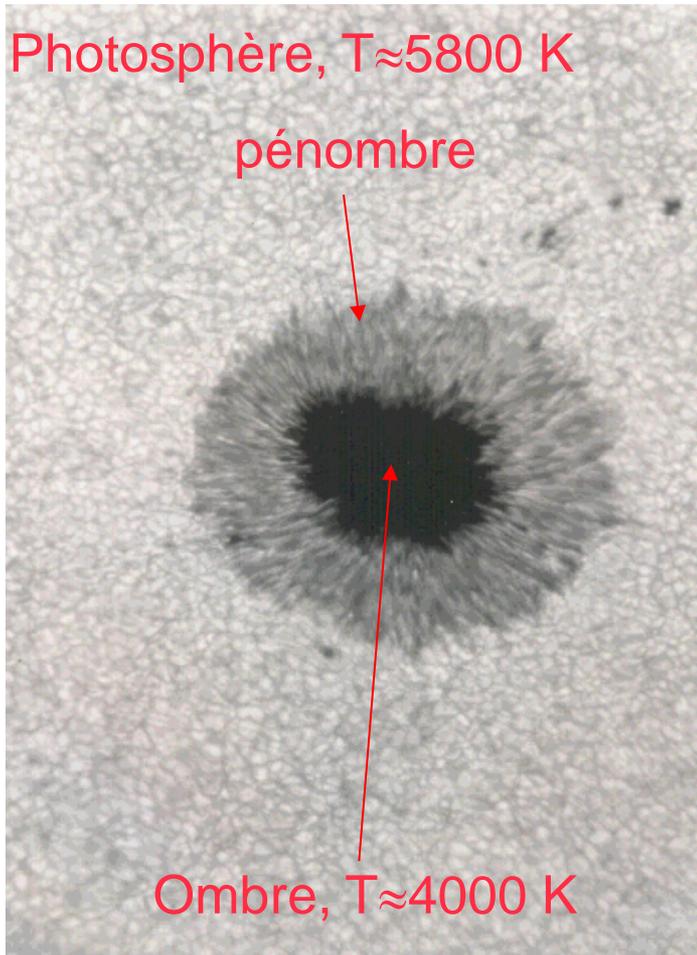


Activité solaire

Taches solaires, éruptions,
éjections de masse,
reconnexion magnétique

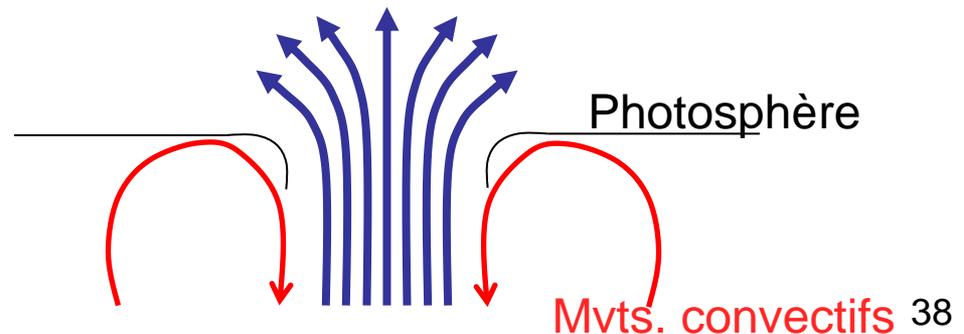
L'activité solaire

Les taches solaires



Cliché Pic du Midi

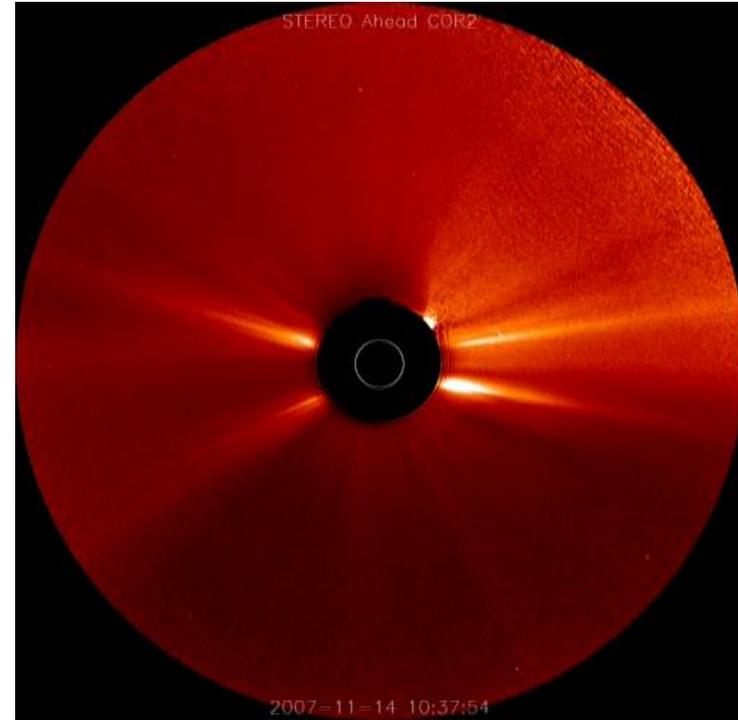
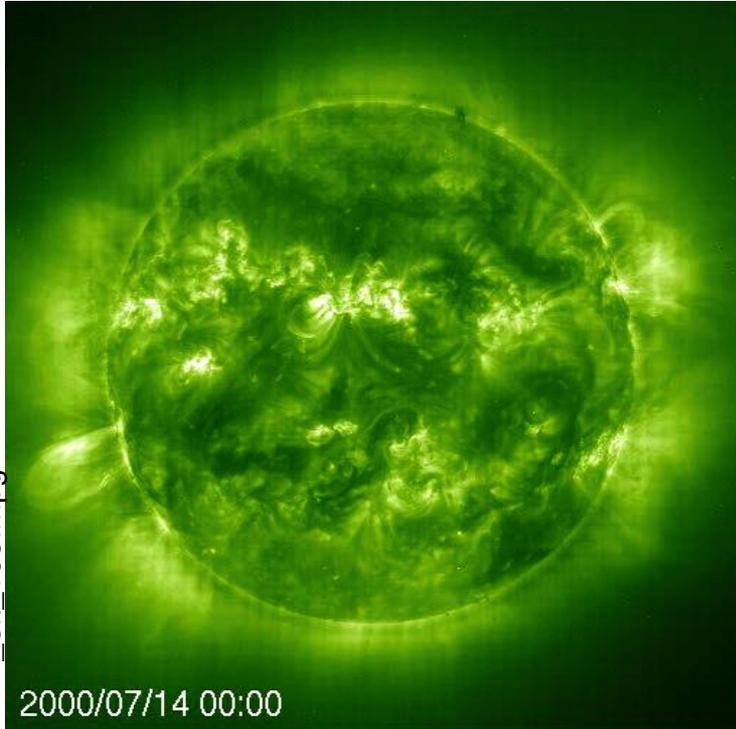
- Tache solaire = région sombre dans la photosphère.
- = région à champ magnétique intense émergeant de l'intérieur du Soleil (Hale, 1908).
- Mouvements du gaz (convection) dans la photosphère et en-dessous condensent les lignes de champ magnétique.
- Champ magnétique empêche convection / transport de chaleur vers la « surface » (\Rightarrow plus froid \Rightarrow plus sombre).



L'activité solaire

Instabilité du champ magnétique coronal

http://lasco-www.nrl.navy.mil/daily_mpg/2000_07/000714_eit_195.mpg

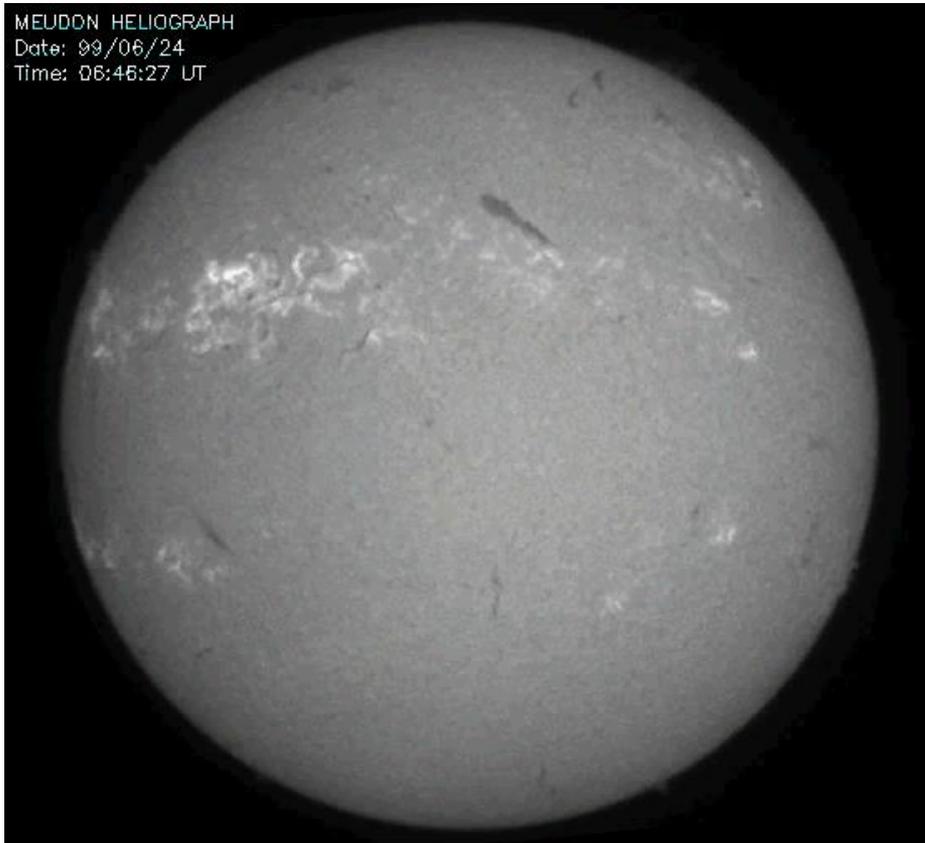


<http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/item.php?id=stereoimages&iid=38>

- Eruption (« flare »; EUV; SoHO/ EIT), énergie $\rightarrow 10^{25}$ J, libérée en ~ 1000 s (bouffées rayonnement, dues au chauffage du plasma & à l'accélération de particules (vitesses \gg vent solaire, parfois \approx vitesse de la lumière, c))
- Éjection de masse (CME, lumière blanche; STEREO), énergie $\rightarrow 10^{25}$ J, mouvement d'ensemble (matière enfermée dans champ magnétique)

L'activité solaire

La reconnexion magnétique - éruption d'un filament

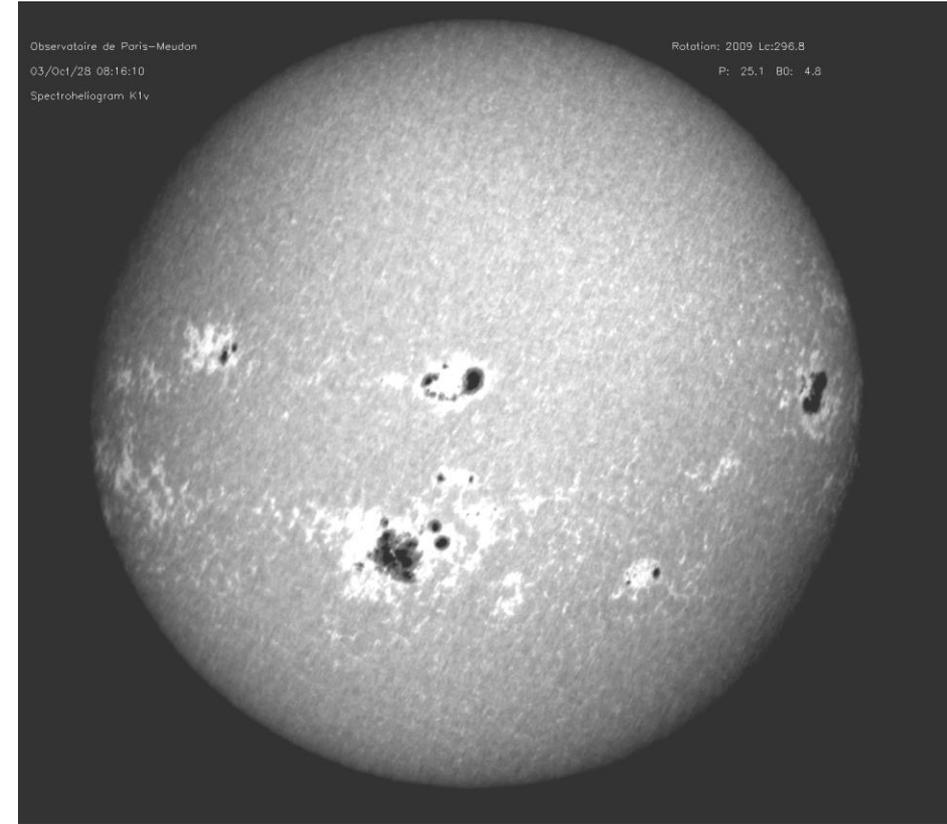
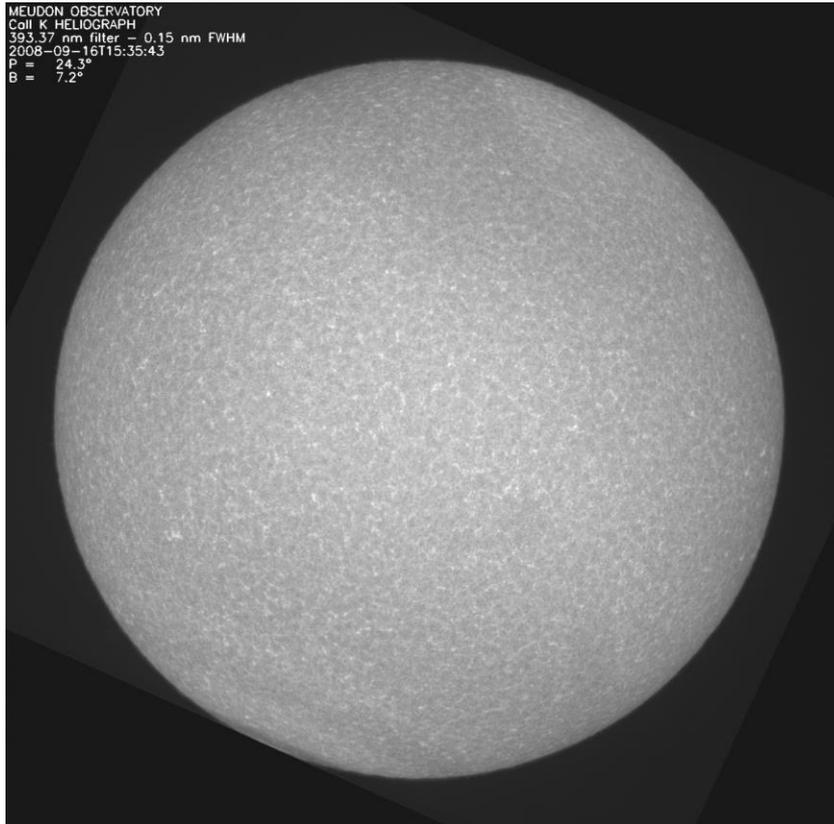


- Filament (matière froide suspendue dans la couronne = protubérance, vue en absorption devant le disque solaire)
- Envol, puis apparition de deux filets brillants de part et d'autre du canal du filament
- Détachement à la suite de la reconnexion

Le cycle d'activité solaire de 11 (et 22) ans

Le cycle d'activité du Soleil

Les taches



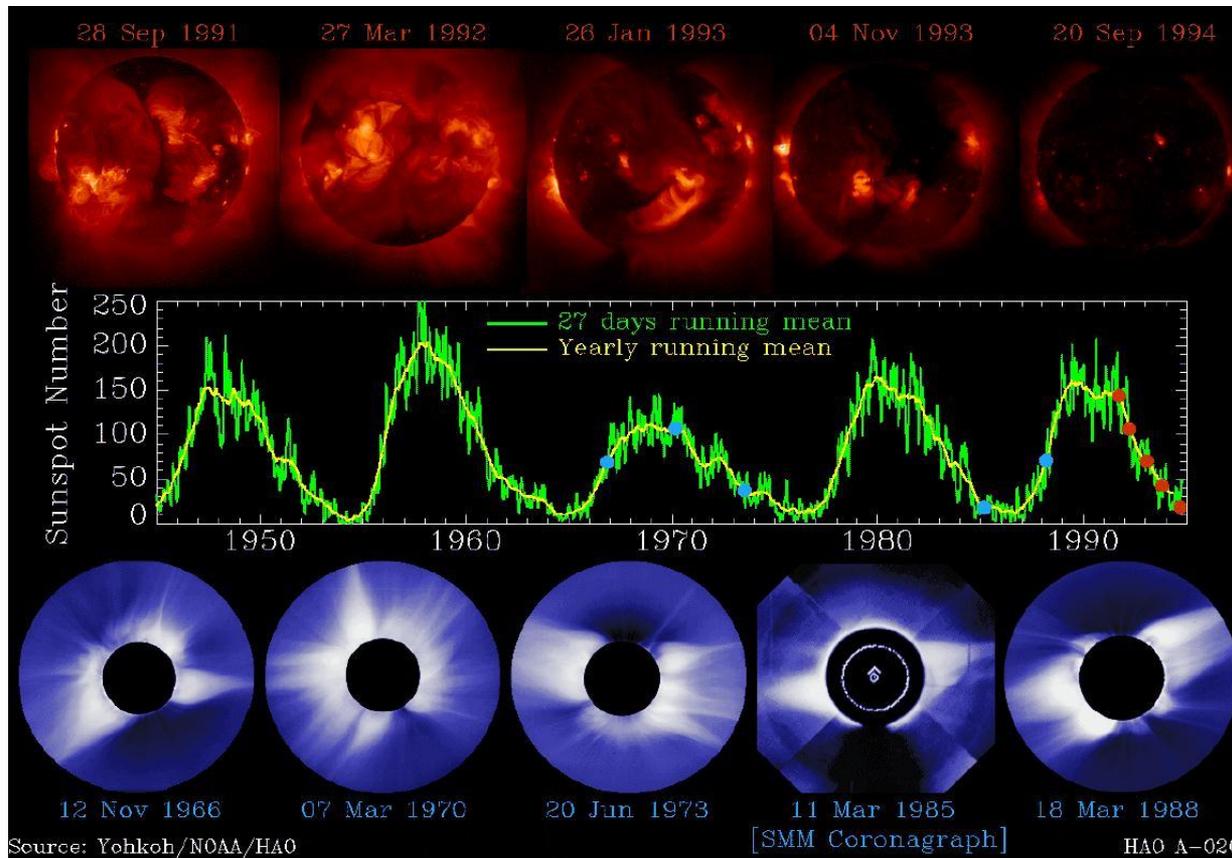
Le Soleil le 16 Septembre 2008 ...

... et le 28 Octobre 2003

- Pour une mesure quantitative du degré d'activité solaire: l'**indice des taches** = nombre tenant compte des taches et groupes de taches

Le cycle d'activité du Soleil

Indice des taches, couronne



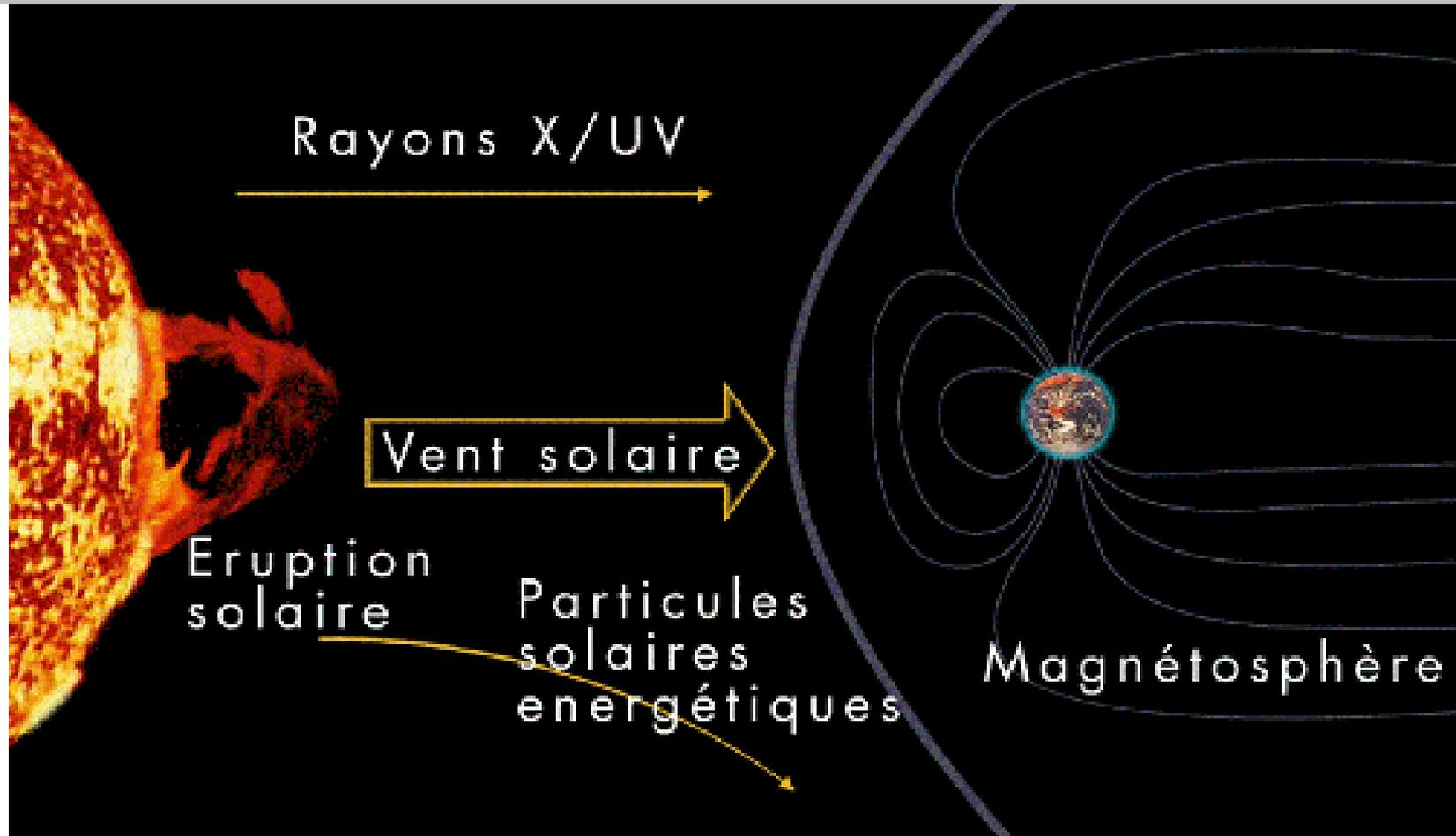
- Variation de l'activité au cours des années: alternance périodes avec / sans taches et régions actives; variabilité en rayons X (structure et intensité de l'émission de la couronne) et lumière visible (structure de la couronne)
- période environ 11 ans (en fait, quasi-période variant de 9 à 14 ans)

L'environnement ionisé et magnétisé de la Terre et les perturbations d'origine solaire

Les relations Soleil-Terre

L'environnement spatial de la Terre

Couronne solaire et envirt magnétisé et ionisé de la Terre

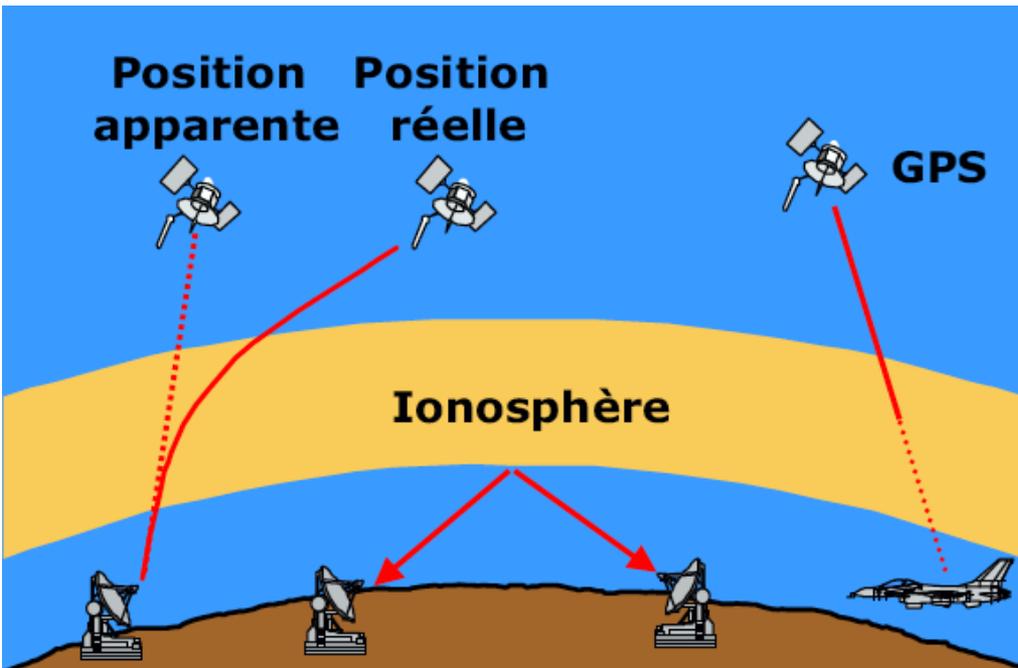


Les porteurs des relations Soleil-Terre: rayonnement (ondes), vent solaire, particules chargées de haute énergie, champ magnétique.

L'environnement spatial de la Terre

L'ionosphère terrestre

- Ionisation de l'atmosphère: deux domaines d'altitude
 - Basse altitude: peu de rayonnement ionisant, faible ionisation, recombinaison (=capture d'un e par un ion) facile \Rightarrow atmosphère neutre;
 - Haute altitude : ray^{ts} UV et X, gaz ambiant dilué (peu de recombinaison), les électrons libres ont une durée de vie longue \Rightarrow ionosphère - dépend de l'heure locale (jour: ionisation élevée/nuit: recombinaison) et de l'activité solaire.



T. Dudok de Wit, LPCE Orléans,
<http://lpce.cnrs-orleans.fr/~ddwit/>

L'état de l'ionosphère affecte la transmission/propagation des ondes hertziennes (réflexion ou absorption des ondes radio, réfraction du signal GPS).

L'environnement spatial de la Terre

La magnétosphère terrestre

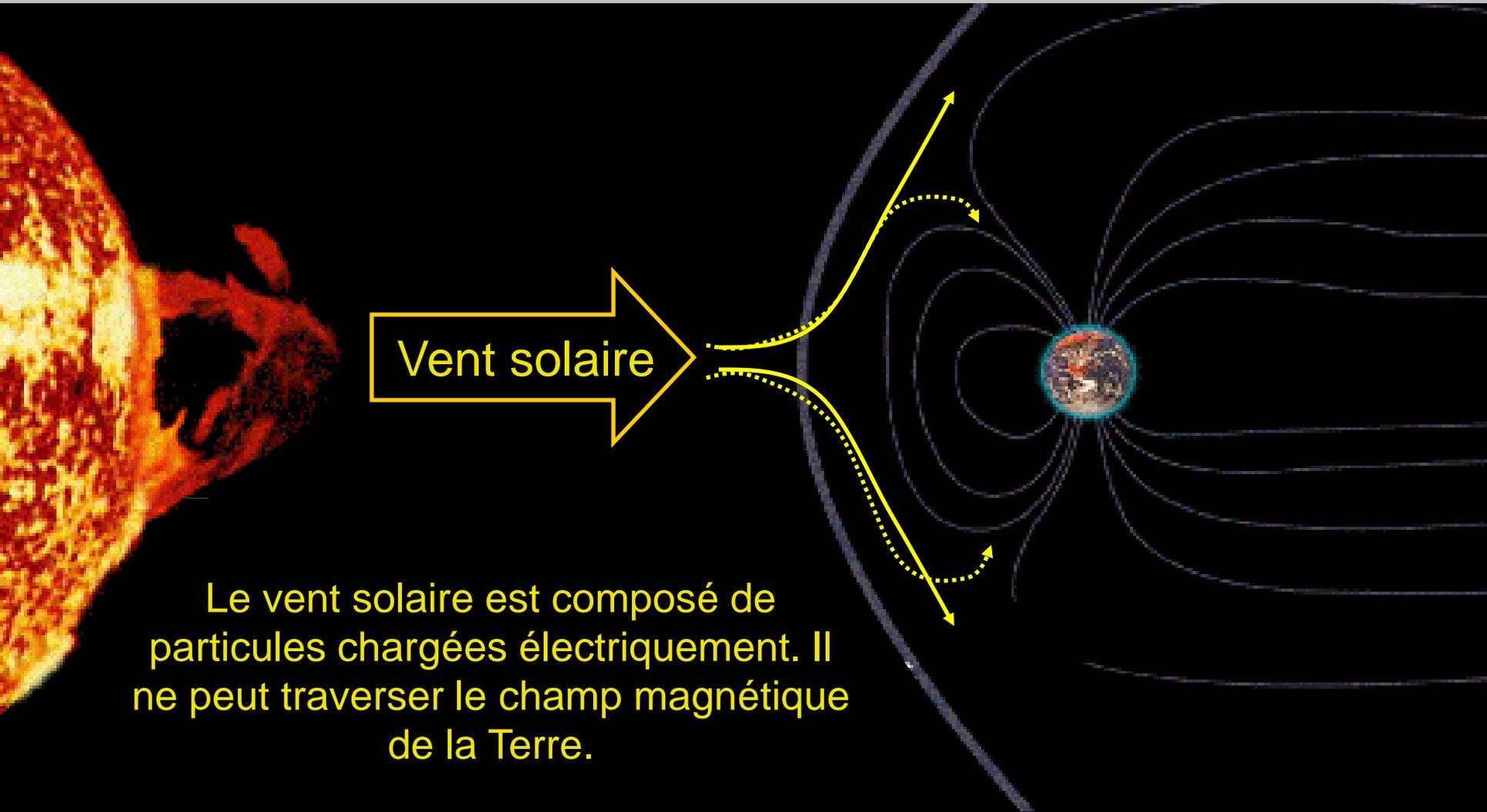


- La Terre possède un champ magnétique.
- Ressemble à celui d'un aimant simple, mais inclinaison 11° p/r axe de rotation, excentré 420 km vers Pacifique.
- Vent solaire comprime le champ magnétique (côté dirigé vers le Soleil) et l'étire du côté opposé.

- Le domaine autour de la Terre dominé par le champ magnétique est appelé *magnétosphère*.
- Le vent solaire heurte la magnétosphère à vitesse supersonique. Il se forme une onde de choc.

L'environnement spatial de la Terre

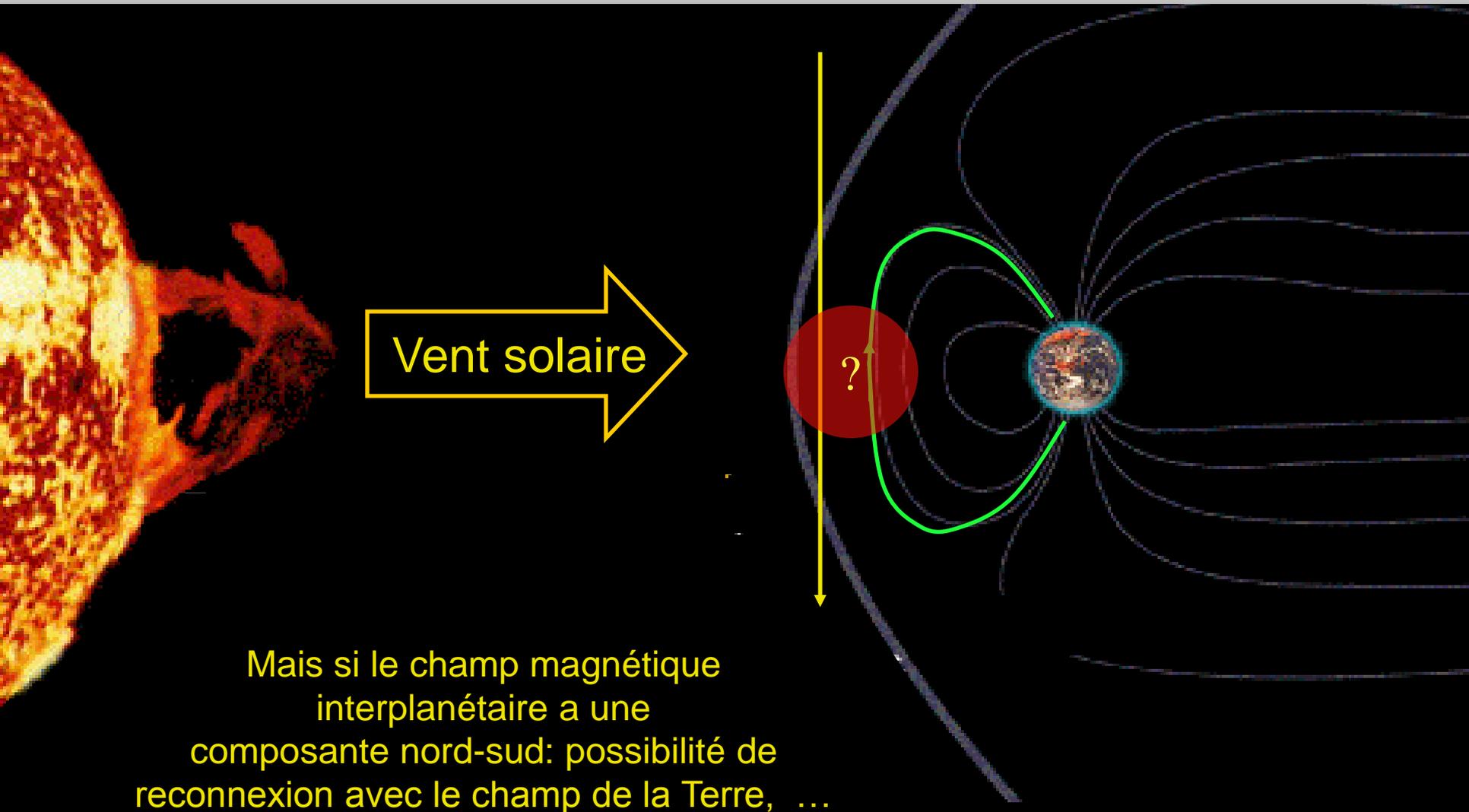
Magnétosphère terrestre et vent solaire



Le vent solaire est composé de particules chargées électriquement. Il ne peut traverser le champ magnétique de la Terre.

L'environnement spatial de la Terre

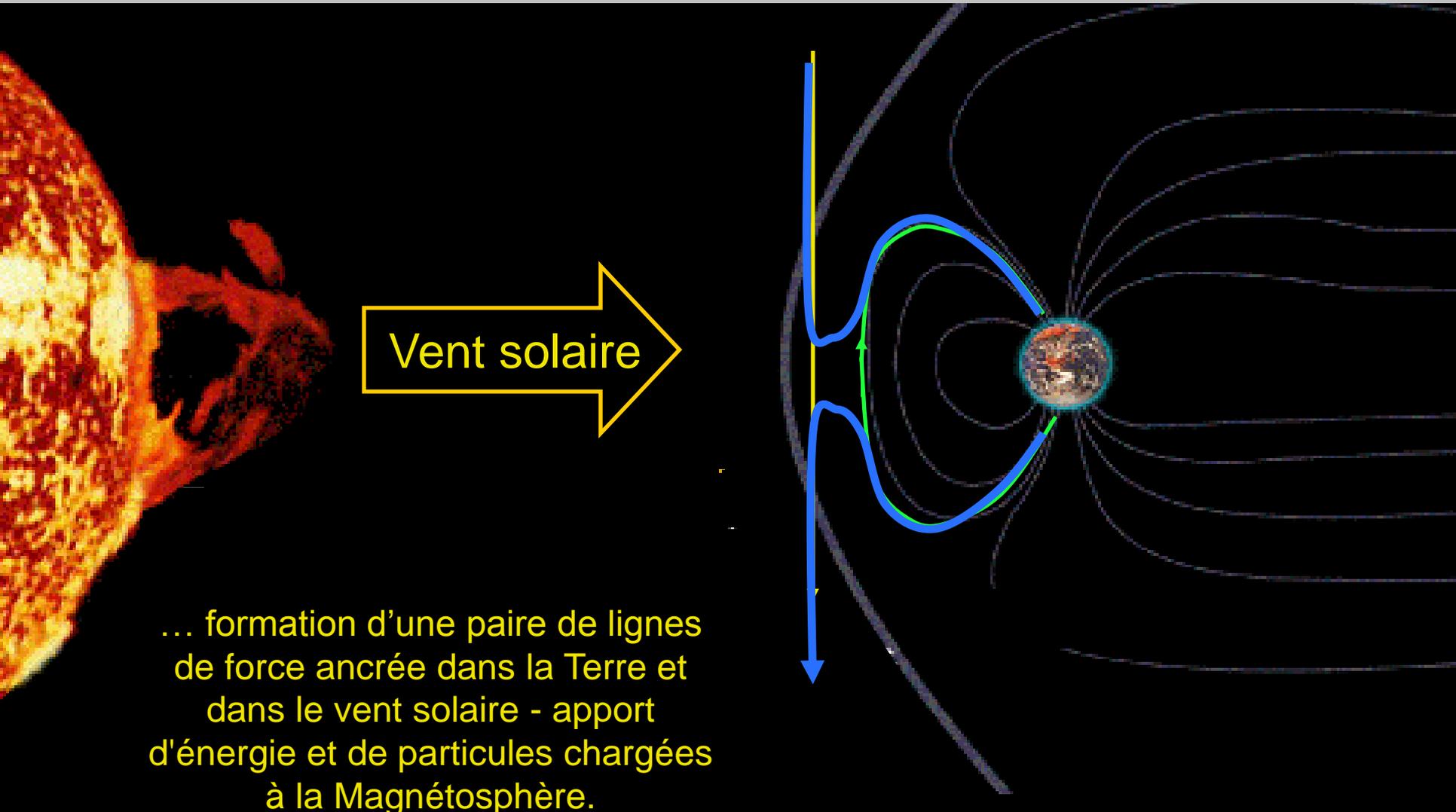
Magnétosphère terrestre et vent solaire



Mais si le champ magnétique interplanétaire a une composante nord-sud: possibilité de reconnexion avec le champ de la Terre, ...

L'environnement spatial de la Terre

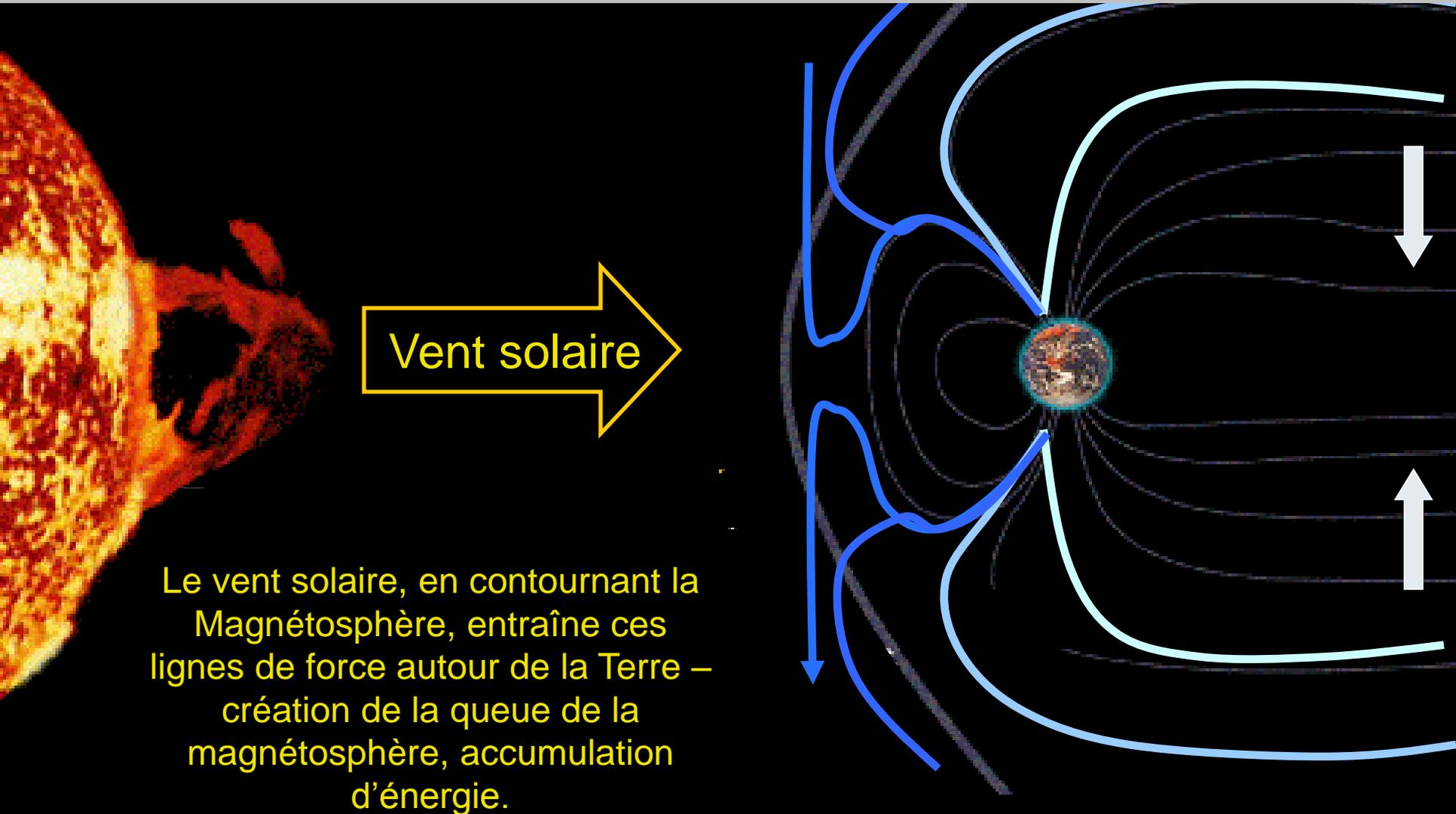
Magnétosphère terrestre et vent solaire



... formation d'une paire de lignes de force ancrée dans la Terre et dans le vent solaire - apport d'énergie et de particules chargées à la Magnétosphère.

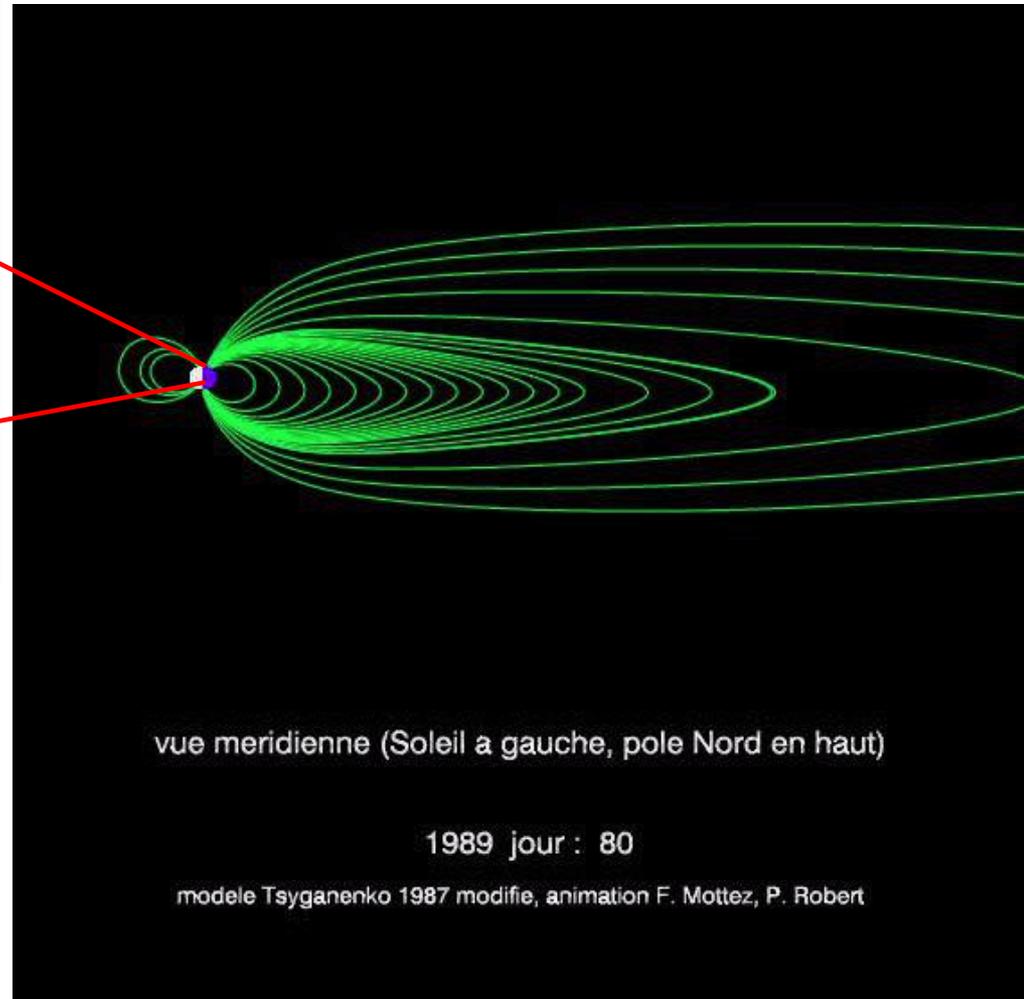
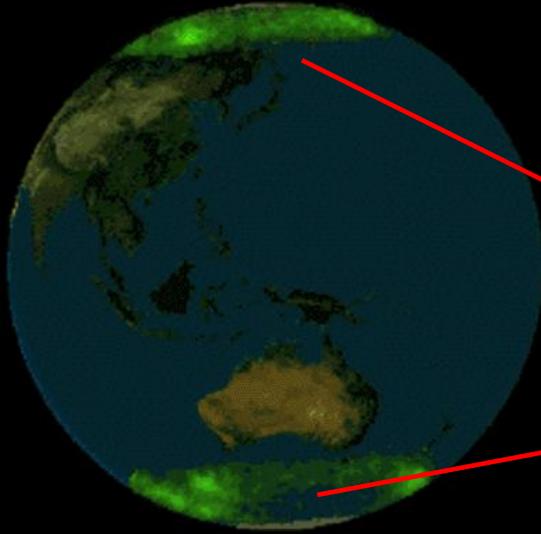
L'environnement spatial de la Terre

Magnétosphère terrestre et vent solaire



L'environnement spatial de la Terre

Magnétosphère terrestre et vent solaire

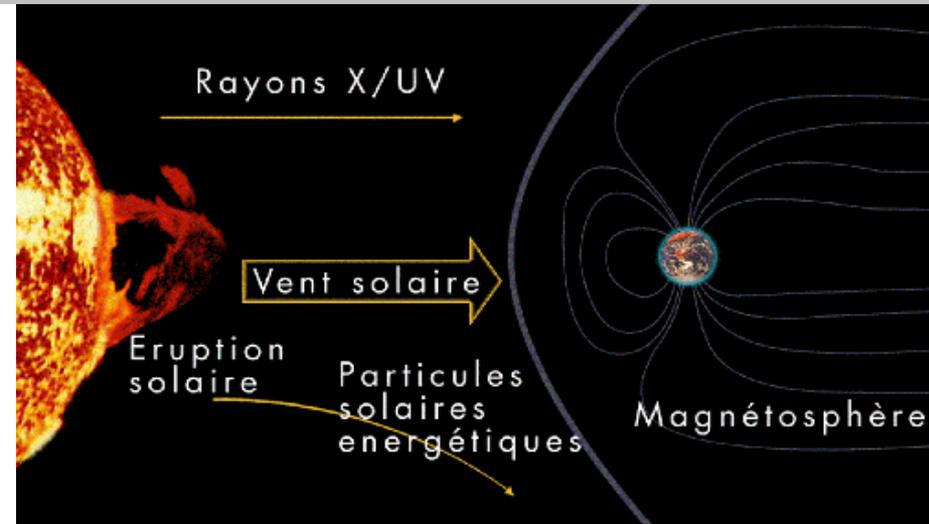


- Accumulation, puis libération explosive de l'énergie apportée par le vent solaire à la queue de la magnétosphère: sous-orage magnétique (animation: simulation numérique).
- Accélération d'électrons qui sont précipités dans l'atmosphère de la Terre : aurores polaires.

L'environnement spatial de la Terre

Effets de l'activité solaire (1)

- Chauffage & ionisation de la haute atmosphère (UV, X) :
 - freinage des satellites
 - Communications hertziennes, GPS
- Particules énergétiques :
 - électronique des satellites
 - vols spatiaux habités hors magnétosphère (Lune, Mars)
 - exposition prolongée aviation civile (routes polaires-ray^t cosmique)
- Perturbation du champ magnétique terrestre :
 - électronique et panneaux solaires des satellites
 - lignes de haute tension au sol, voisinage des pôles magnétiques (Canada)
 - aurores polaires à basse latitude



- Effet sur climat terrestre ?
 - Minimum de Maunder / petit âge glaciaire ?
 - Contribution probable puisque luminosité solaire plus faible en période de minimum d'activité
 - Ne contredit pas l'impact de l'activité humaine sur les changements climatiques récents.

Les relations Soleil-Terre

en résumé:

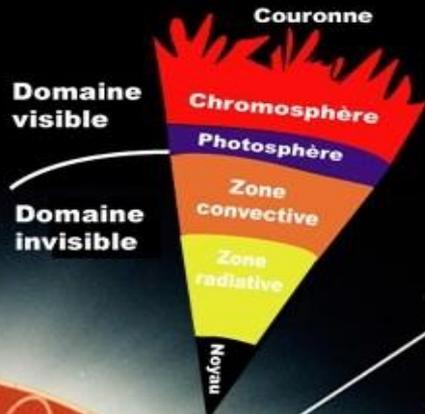
- Le Soleil émet le gros de son énergie (lumière visible et IR) de façon continue et (presque) invariable. Cette stabilité assure l'habitabilité de la Terre.
- Les émissions de la couronne solaire sont fortement variables au cours du temps (échelles quelques sec à plusieurs années):
 - Rayons UV et X : chauffage et ionisation de la haute atmosphère; création/maintien de l'ionosphère.
 - Particules chargées (électrons, protons, ions):
 - Vent solaire (permanent): compression du champ magnétique de la Terre côté jour, création queue magnétosphère côté nuit.
 - Particules de haute énergie (sporadiques): pénétration dans l'atmosphère terrestre (surtout polaire), ionisation supplémentaire
 - Champ magnétique interplanétaire, emmené par le vent solaire: interaction avec le champ magnétique de la Terre (processus dynamiques (sous-orages et orages; reconnexion magnétique)
- Le sol de la Terre est protégé contre la majorité des impacts solaires par le champ magnétique et l'atmosphère terrestres.
- Impacts de l'activité solaire:
 - (a) connus sur la technologie dans les régions à haute latitude magnétique de la Terre et dans l'espace, et sur les doses de radiation;
 - (b) incertains sur la basse atmosphère/climat.

Couronne :

Atmosphère externe du soleil sans limite définie.

Chromosphère :

Couche très hétérogène.
Épaisseur 2 000 à 3 000 km.

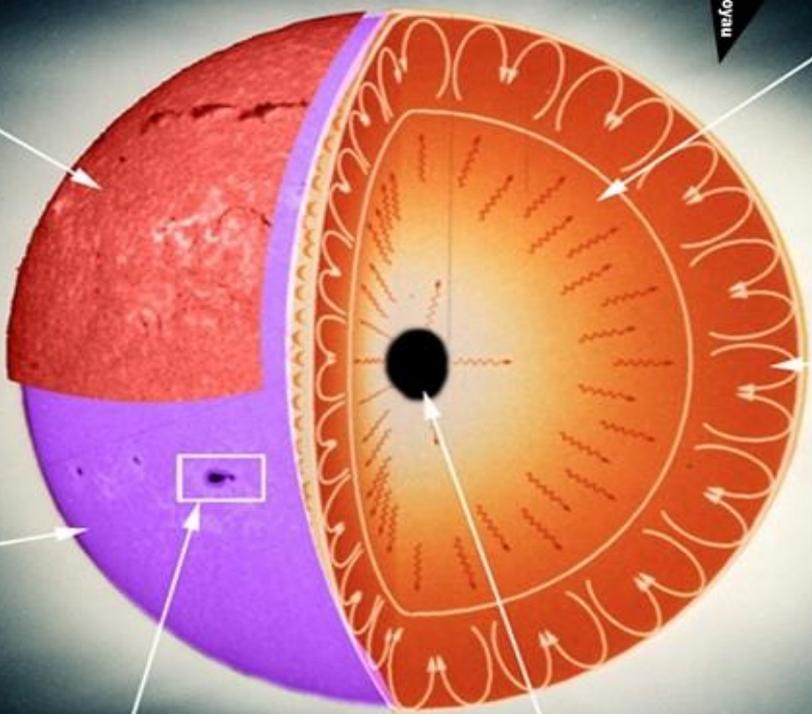


Zone radiative :

Transfert de l'énergie par rayonnement.

Zone convective :

Evacuation de l'énergie par mouvement (bouillonnement).



Photosphère :
et "surface" solaire.

Observable en lumière blanche ou dans la raie du calcium ionisé (K1v).
Structure de petits grains brillants (1 000 km)

Taches :

Région sombre car plus froide, dû au champ magnétique plus fort. Plusieurs milliers de kilomètres.

Noyau :

Très dense, très chaud; siège des réactions nucléaires qui fournissent l'énergie du soleil.

Le cycle de vie du Soleil

