

Du Soleil à la Terre

Vers une météorologie de l'espace

Frédéric Pitout
(OMP - IRAP, Toulouse)

École d'été $e2\phi$, Toulouse, août 2012



Sommaire

- Un peu d'histoire
- Le Soleil et son activité
- La magnétosphère terrestre et ses couplages avec le vent solaire
- L'ionosphère et les émissions lumineuses
- La météo de l'espace

Les aurores polaires dans l'histoire

Pendant des millénaires, ce fut :



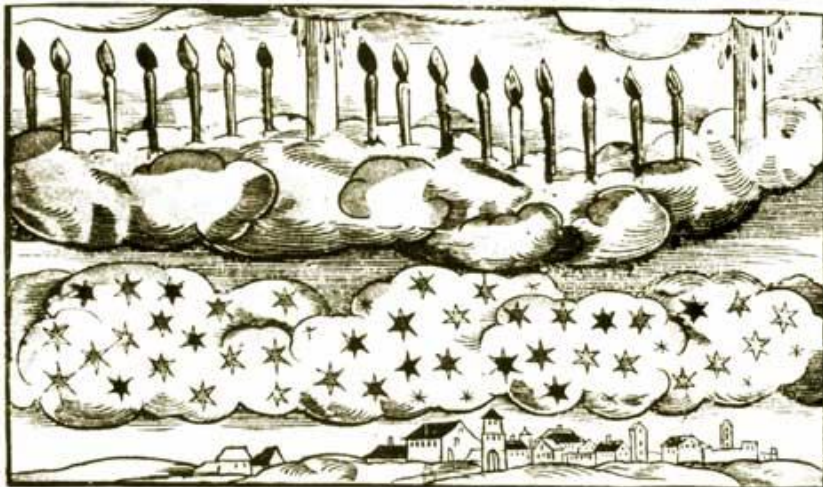
et



Les choses ont-elles vraiment changé ?

Les aurores dans l'histoire (1)

- Observées par les Chinois en ~2600 avant notre ère.
- Légendes en tous genres chez les peuples du Nord.
- Finnois : *revontulet*



Les aurores dans l'histoire (2)

- Le terme “aurore boréale” a été introduit, suivant les sources, par Galilée en 1619 ou Pierre Gassendi en 1621.
- Premières tentatives d'explication:
 - Galilée: lumière du soleil diffusée par l'atmosphère
 - R. Descartes: particules de glace réfléchissent la lumière solaire.
 - J.-J. Dortous de Mairans: l'atmosphère solaire rencontre l'atmosphère terrestre! (Traité physique et historique de l'aurore boréale, 1733). Il suspecte un lien entre taches solaires et activité aurorale.

C. Fev
1733

T R A I T É

PHYSIQUE ET HISTORIQUE
D E
L'AURORE BOREALE.

Par M. DE MAIRAN.

Suite des Mémoires de l'Académie Royale des Sciences.
ANNÉE M. DCCXXXI.



A P A R I S,
DE L'IMPRIMERIE ROYALE.
M. DCCXXXIII.

5

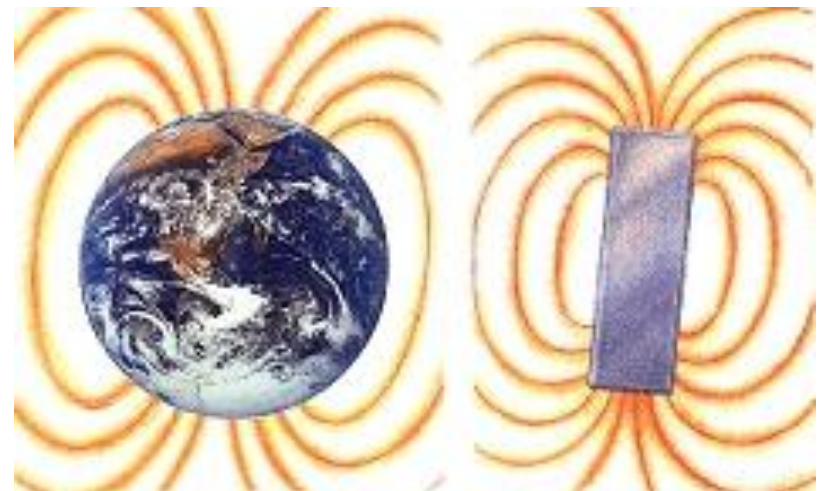
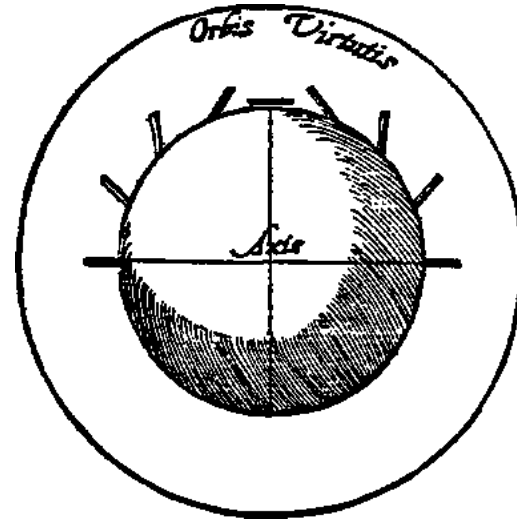
Les aurores dans l'histoire (3)

- Les scientifiques les plus brillants du 17-18^{ème} siècle sont confrontés à une conjonction de lacunes sur des sujets dont ils ignorent encore tout ou presque:
 - Quelques notions sur les charges électriques (statiques)
 - Ils découvrent à peine le géomagnétisme
 - Ils ignorent tout des particules (électrons découverts en 1897)
 - Début des observations solaires.
- C'est à la fin du 18^{ème} et au court du 19^{ème} siècle que tout va se débloquent progressivement, avec des avancées significatives réalisées parallèlement dans deux domaines connexes : le géomagnétisme et les observations solaires. Les scientifiques vont faire progressivement le lien entre les deux.

Emergence d'une nouvelle discipline - 1

Géomagnétisme

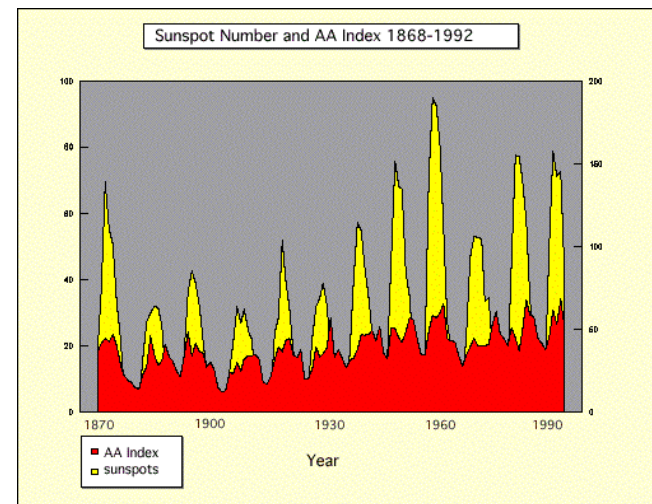
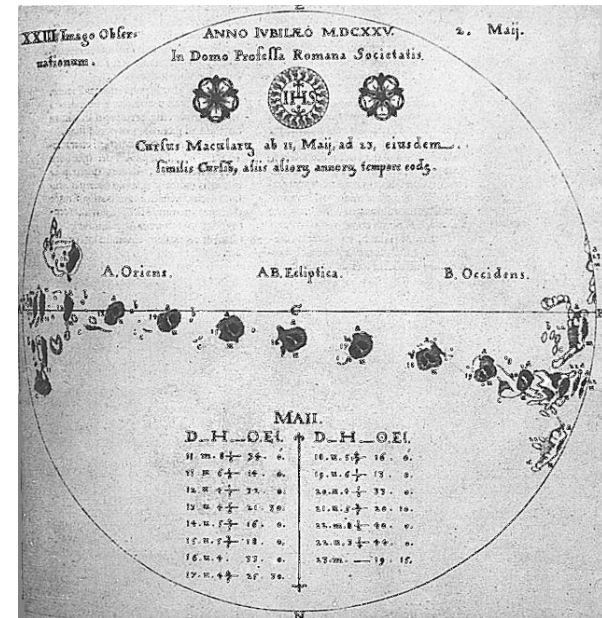
- Les Chinois connaissent la boussole depuis le 11^{ème} siècle au moins.
- 1600: Gilbert publie 6 volumes sur le champ magnétique terrestre. (*Démo à Elizabeth 1*)
- Le champ géomagnétique n'est pas uniforme dans l'espace (Halley, ~1690) et varie dans le temps (Graham, 1722; Celsius, 1740)
- 1741: Hiorter montre que l'activité aurorale est liée à l'activité géomagnétique.



Emergence d'une nouvelle discipline - 2

Observations solaires

- 4 siècles a.n.e., les astronomes grecs et chinois parlaient déjà de taches sombres et mobiles à la surface du Soleil
- 1612: premières observations des taches solaires (Galilée).
- Minimum de Maunder: 1645-1715.
- 1843: un astronome amateur, H. Schwabe, découvre le cycle de 11 ans.
- 1846: J. Wolfe établit une méthode de calcul de l'activité solaire à partir des taches.
- 1851: Sabine découvre la corrélation entre nombre de taches et activité géomagnétique.



Emergence d'une nouvelle discipline - 3

- 1860: zone d'occurrence privilégiée des aurores: découverte de l'oval auroral.
- 1878: H. Becquerel suggère que des particules puissent être éjectées du Soleil et guidées vers les zones aurorales par le champ magnétique terrestre... (*On y est presque!*)
- 1882: Kelvin réfute en bloc la possibilité d'une connexion en le Soleil et la Terre...
- 1909: K. Birkeland fabrique sa terrella: une boule magnétisée sur laquelle il bombarde des électrons. Il reproduit les aurores!

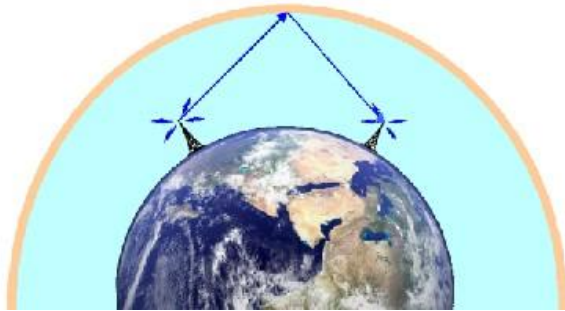
(L'idée de base est posée, "y a plus qu'à"...)

Planeterrella



Découverte de l'ionosphère

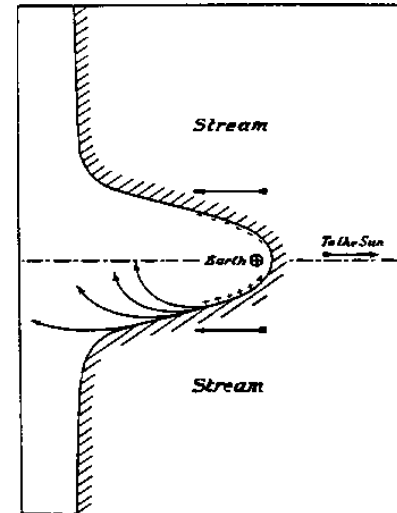
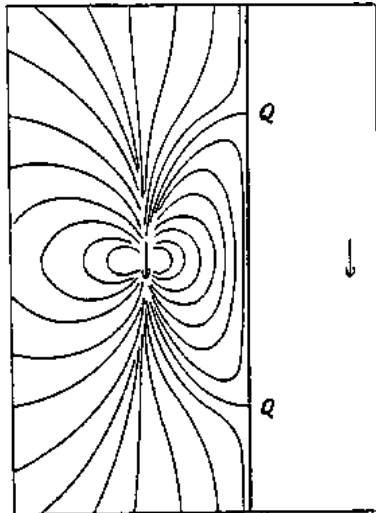
- 1882: Les variations de champ magnétique observées au sol doivent provenir de courants électriques circulant très probablement dans la haute atmosphère (B. Stewart).
- 1901: Expérience de Marconi (liaison radio trans-atlantique). Mise en évidence d'une couche atmosphérique conductrice.



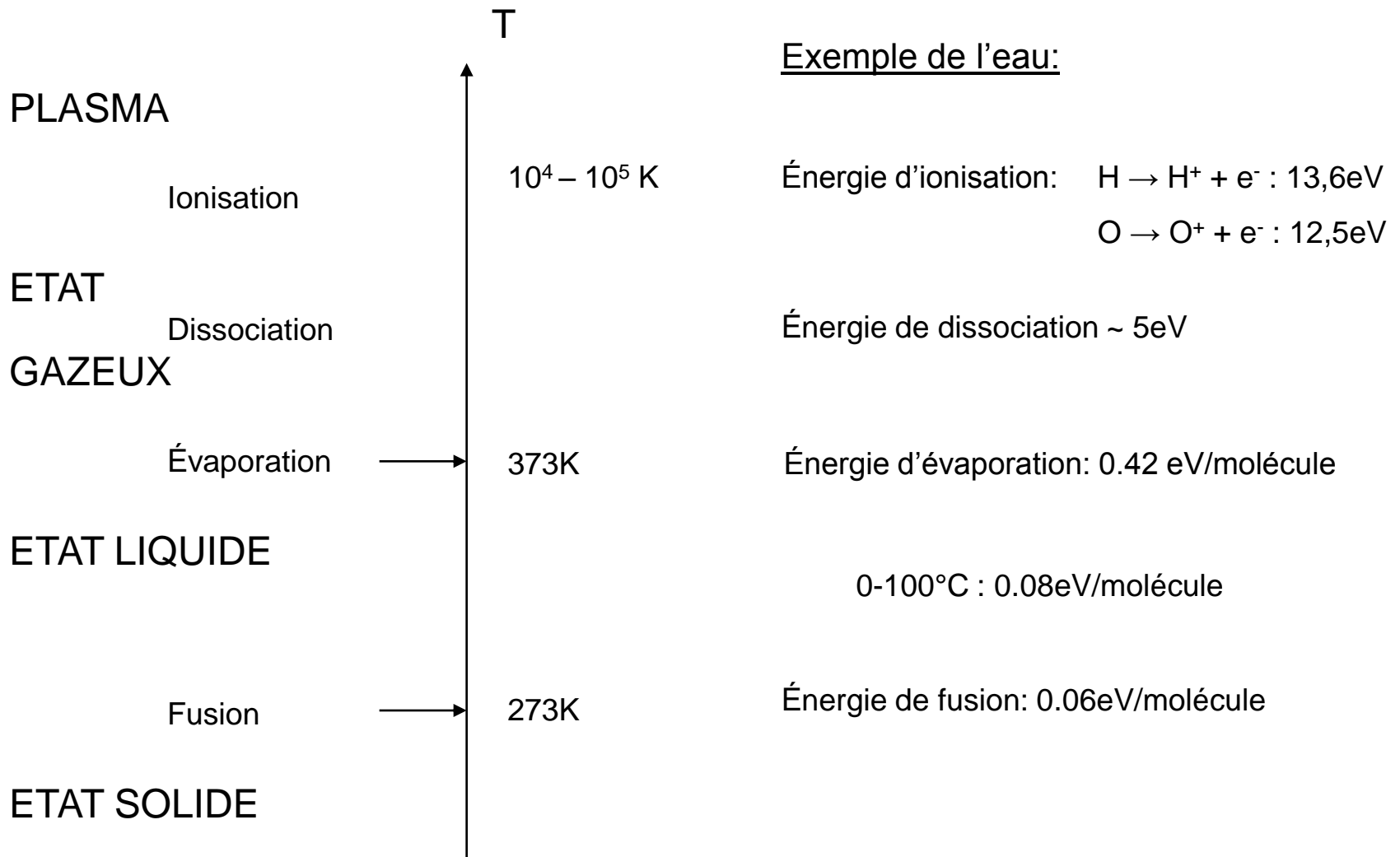
- 1931: théorie de formation de l'ionosphère par rayonnement UV (Chapman).

Découverte du vent solaire et de la magnétosphère

- 1918: Chapman pense que les perturbations magnétiques au sol sont dues à des faisceaux d'électrons provenant du Soleil... pas possible! → mélange de particules chargées – et + (Lindemann) → **notion de plasma** → vent solaire.
- 1930: Modèle de magnétosphère de Chapman et Ferraro.
- 1957: le vent solaire est magnétisé et les lignes de champs se drapent autour de la magnétosphère (H. Alfvén, Nobel 1970)

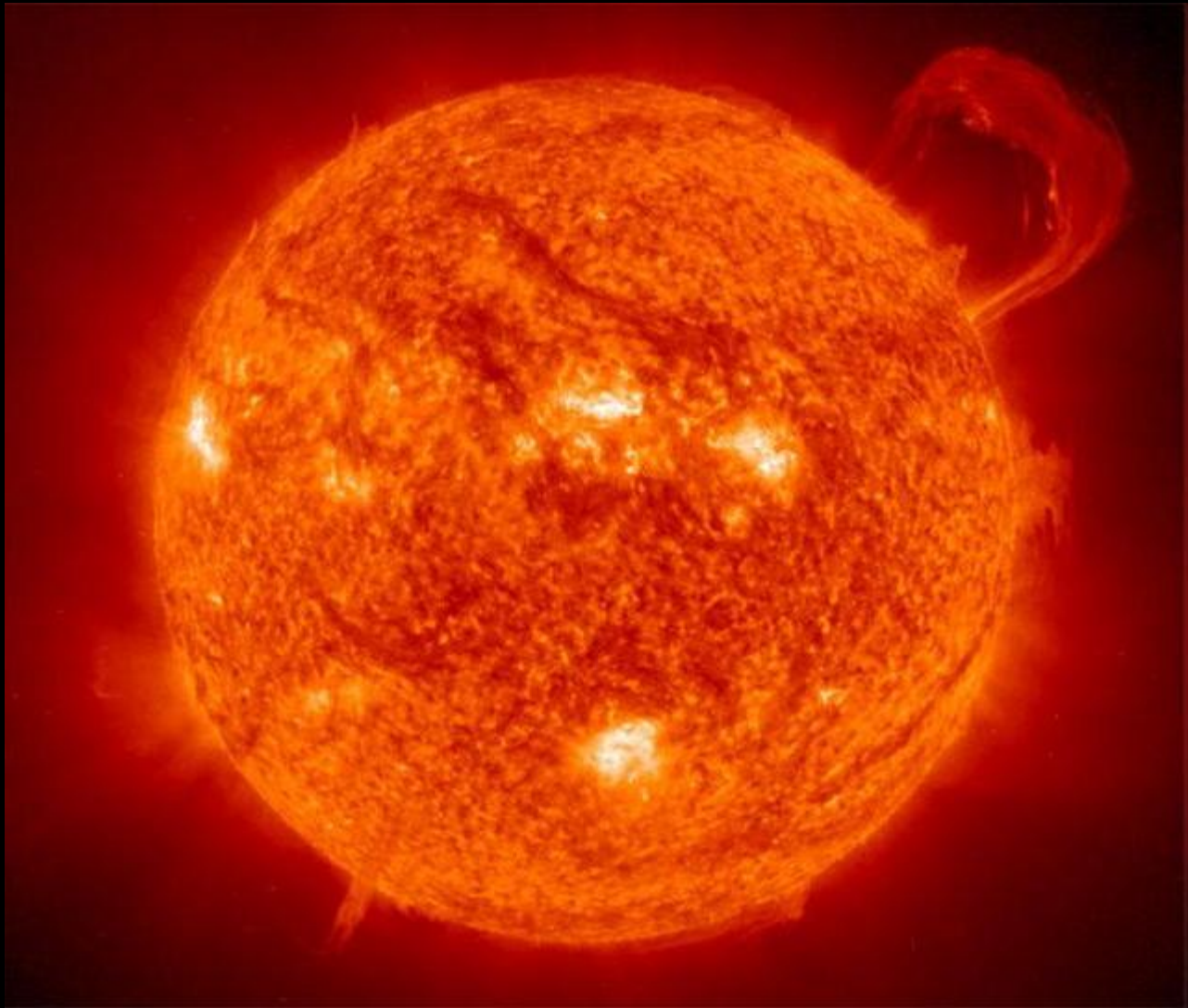


Plasma



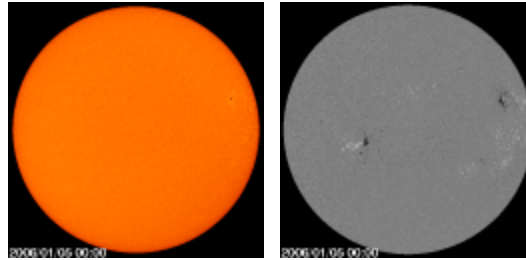
Relations Soleil - Terre



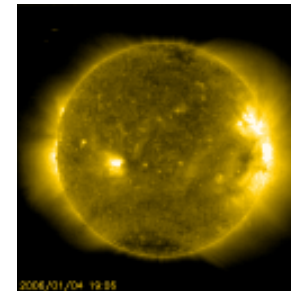
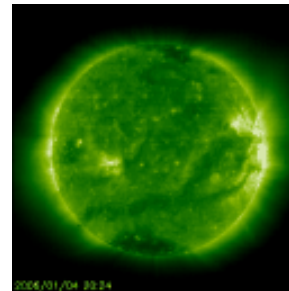
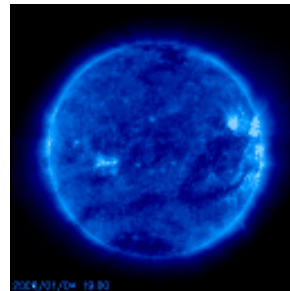
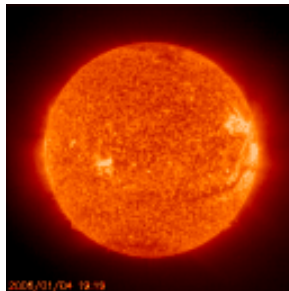


- **De la surface solaire vers l'espace interplanétaire**

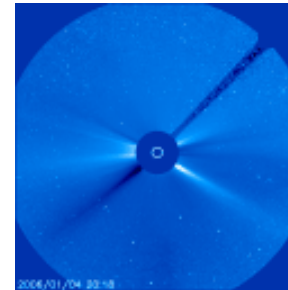
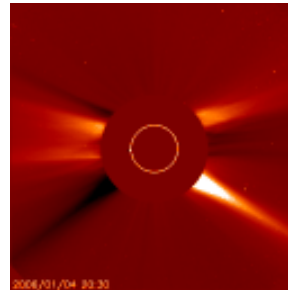
- 1. Surface



- 2. Chromosphère → Couronne (basse)



- 4. Couronne lointaine



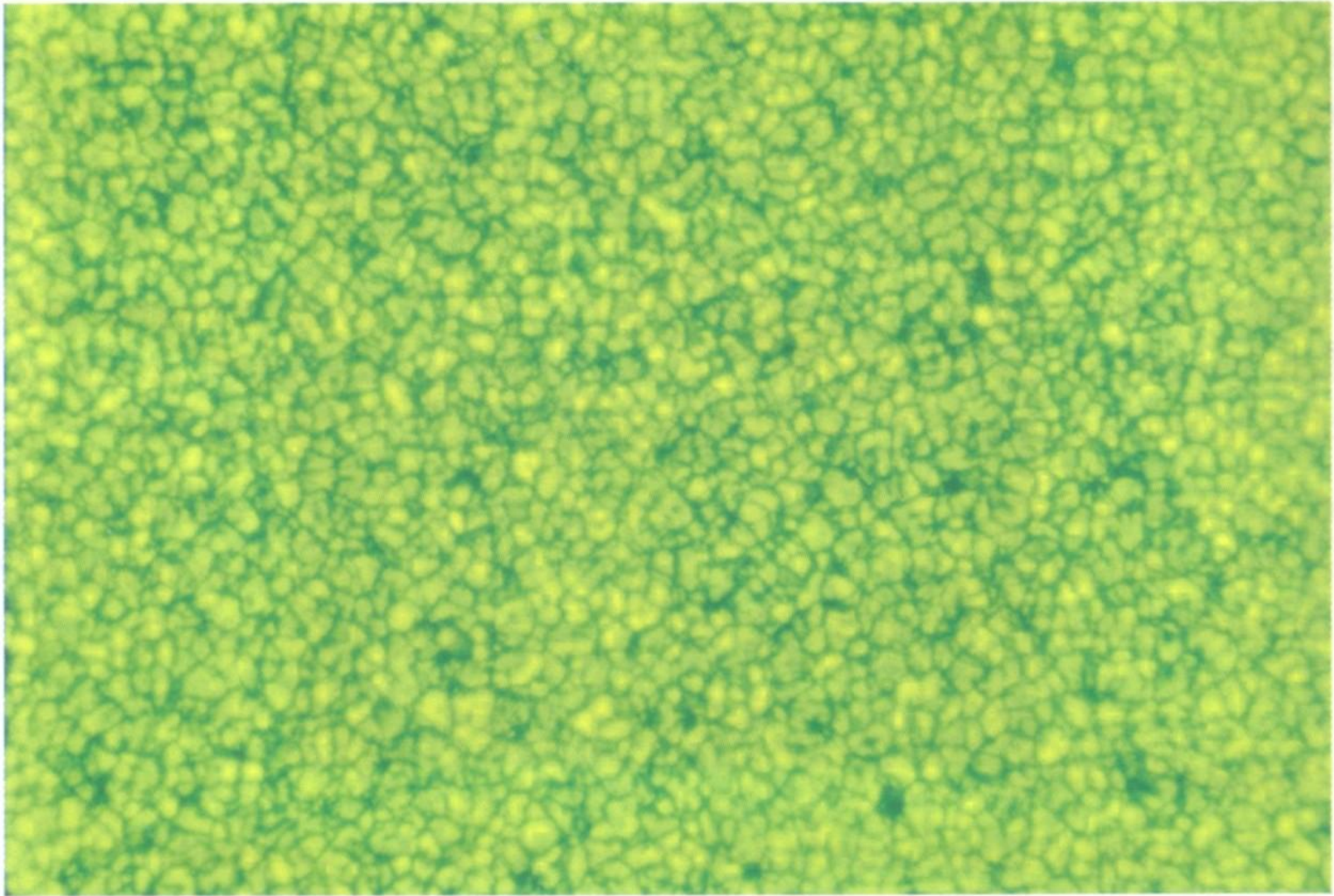
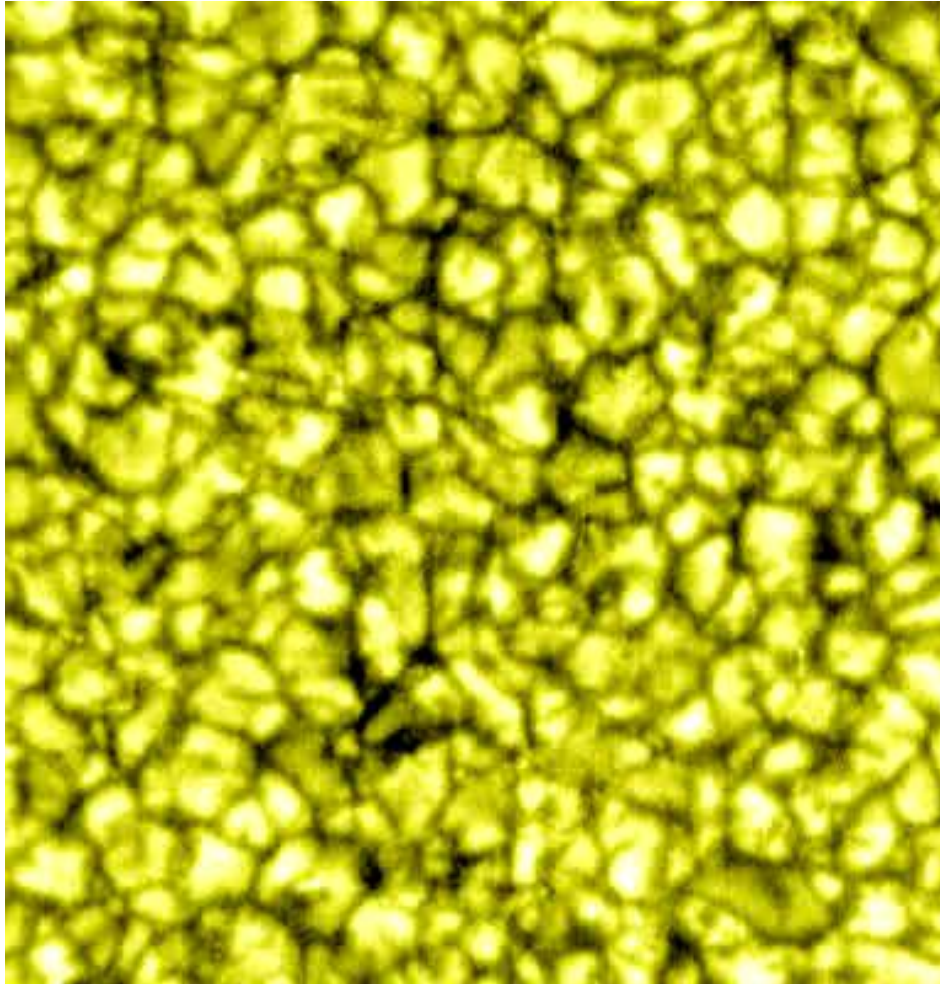


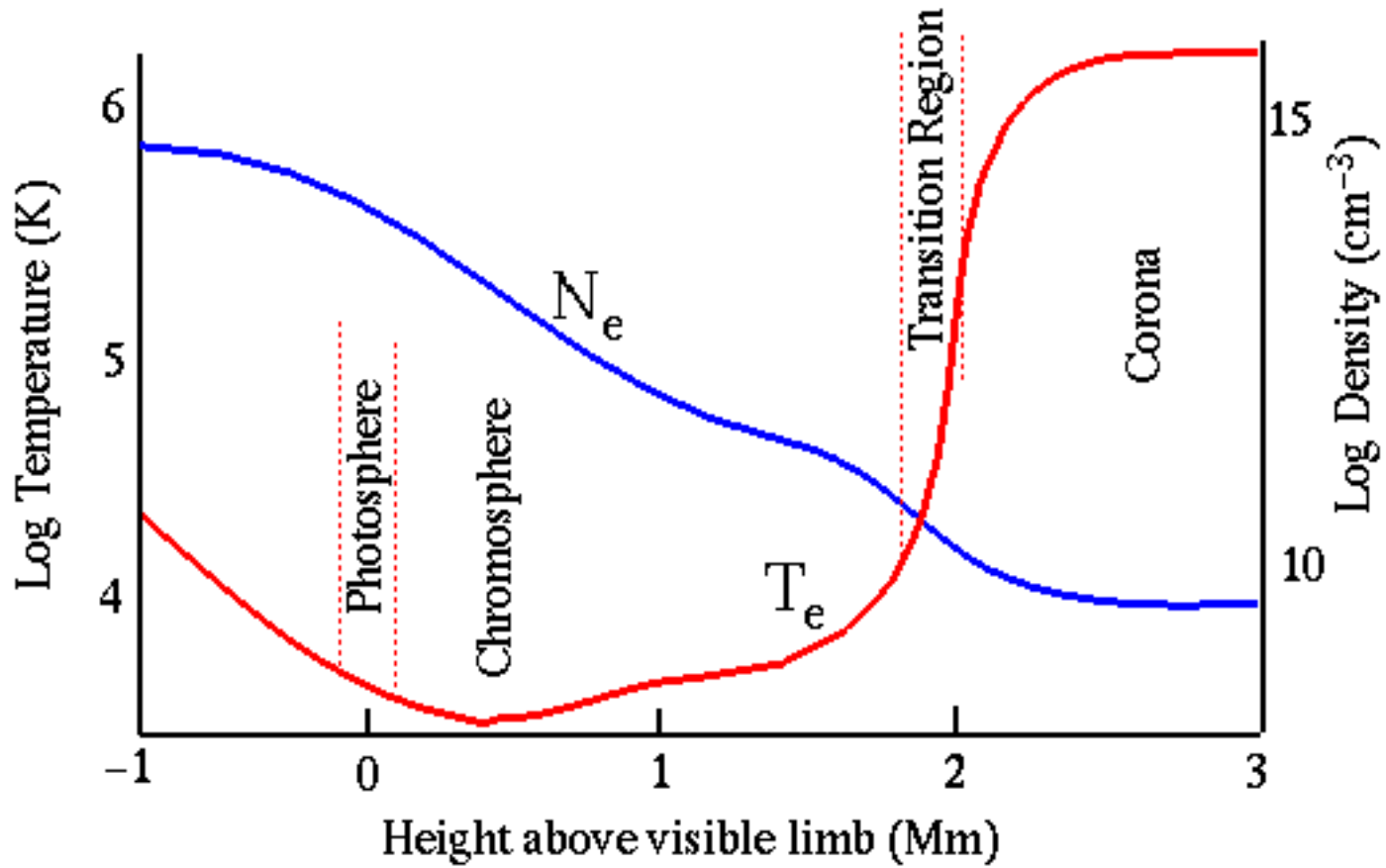
Figure I-4 : photographie des granulations de la photosphère du Soleil calme
(crédit : S. Koutchmy, IAP-CNRS)

Granulation



PIC DU MIDI, FILTRE 5750 A © OMP/Tarbes

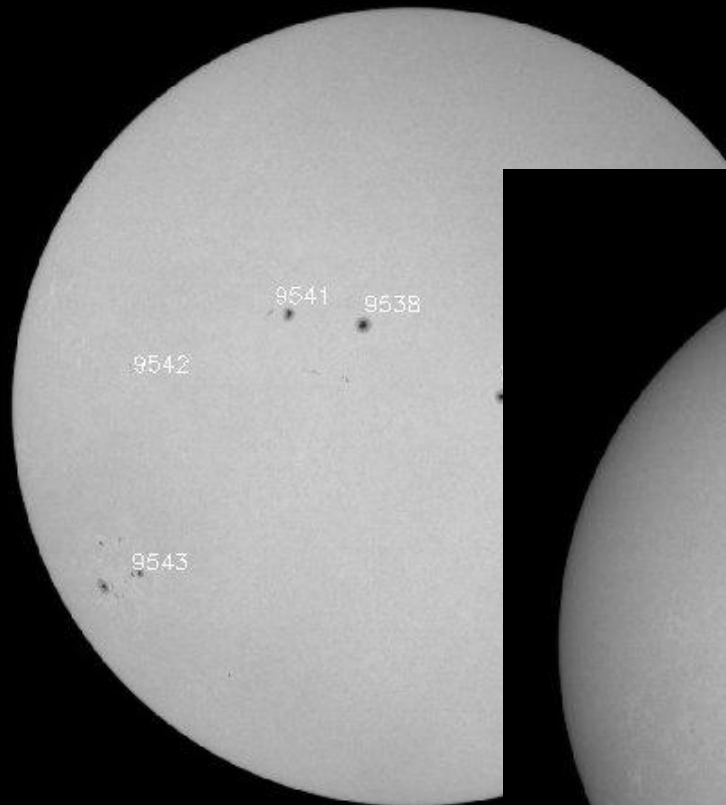
A la surface



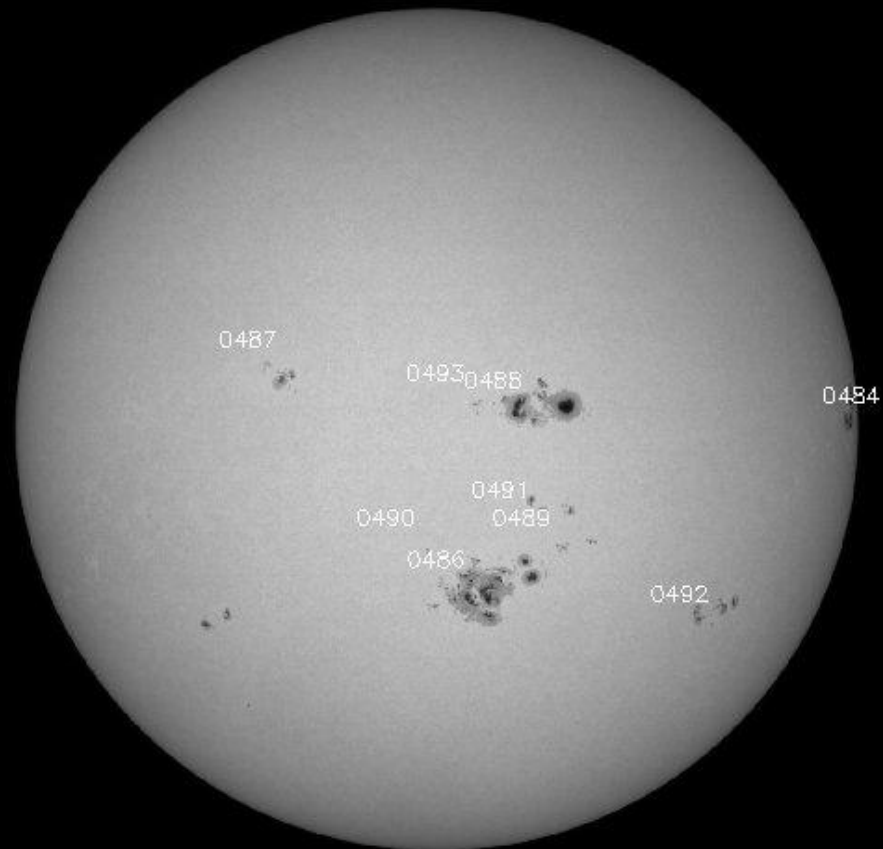
MDI 23-Nov-2004



MDI 17-Jul-2001



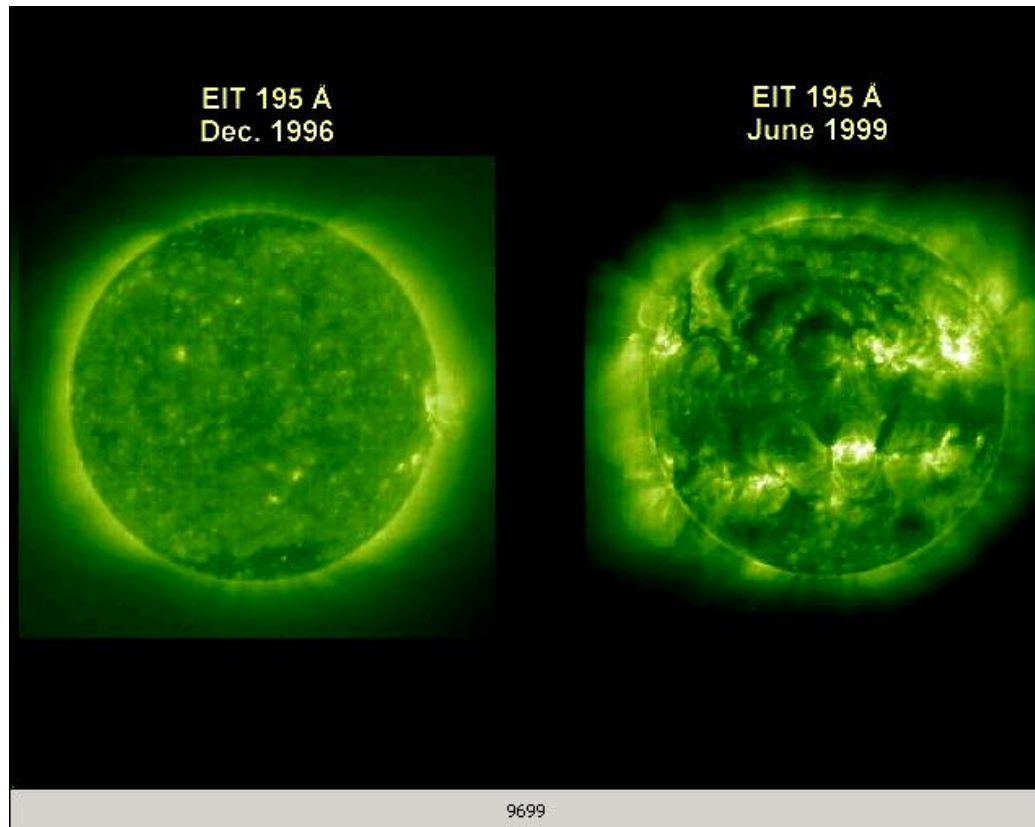
MDI 29-Oct-2003

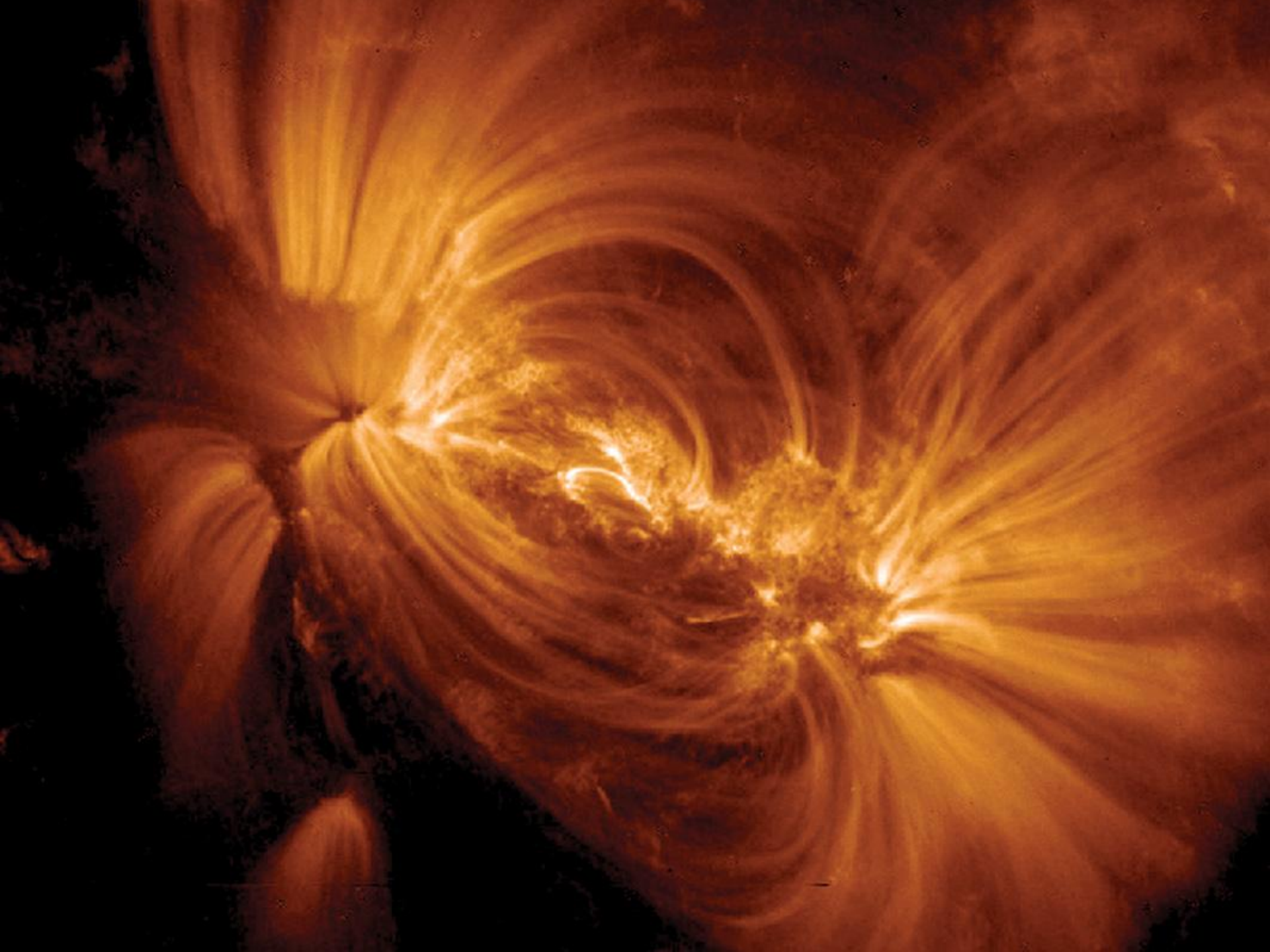


Champ magnétique global entre minimum et maximum d'activité solaire

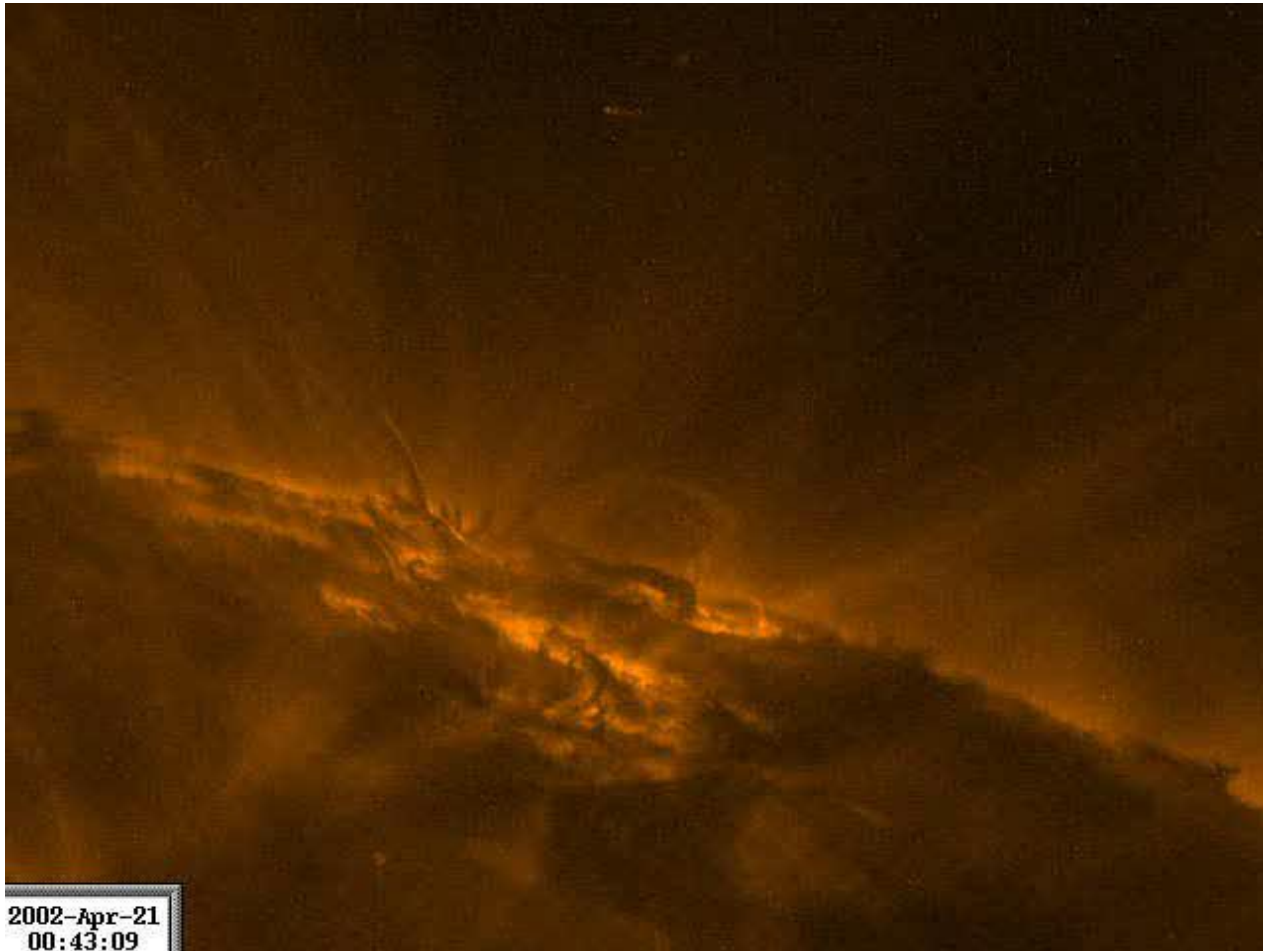
champ poloïdal

champ toroïdal

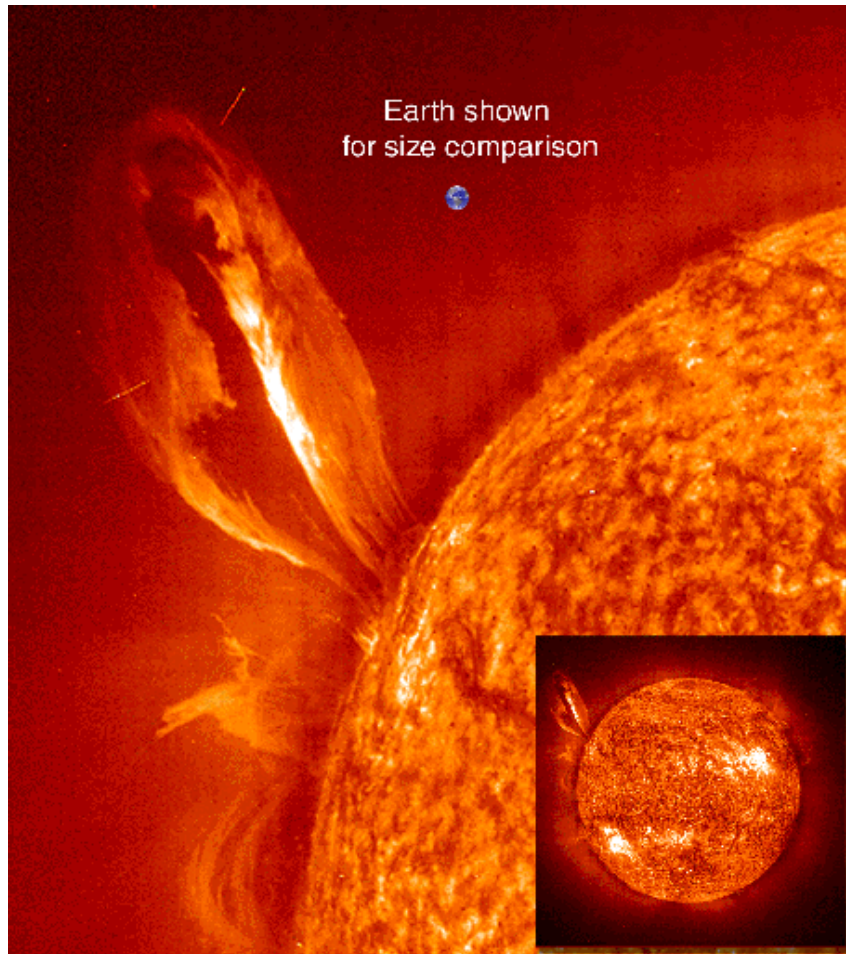




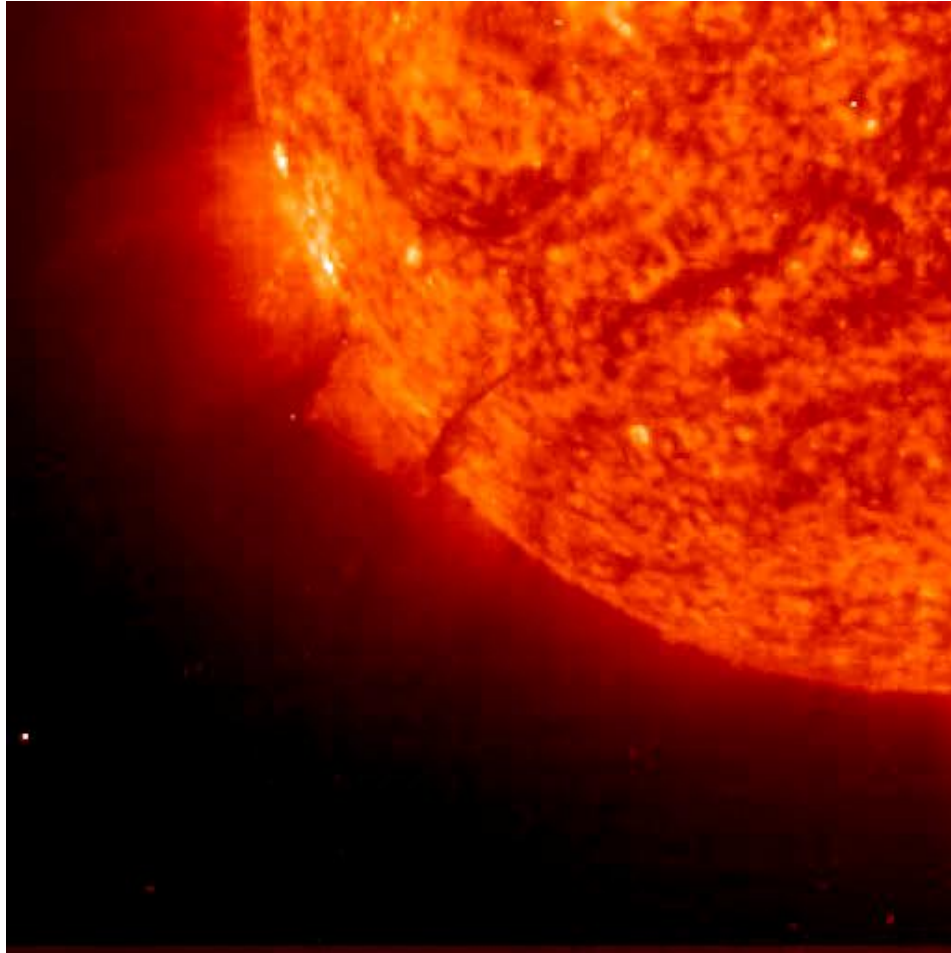
Proéminence



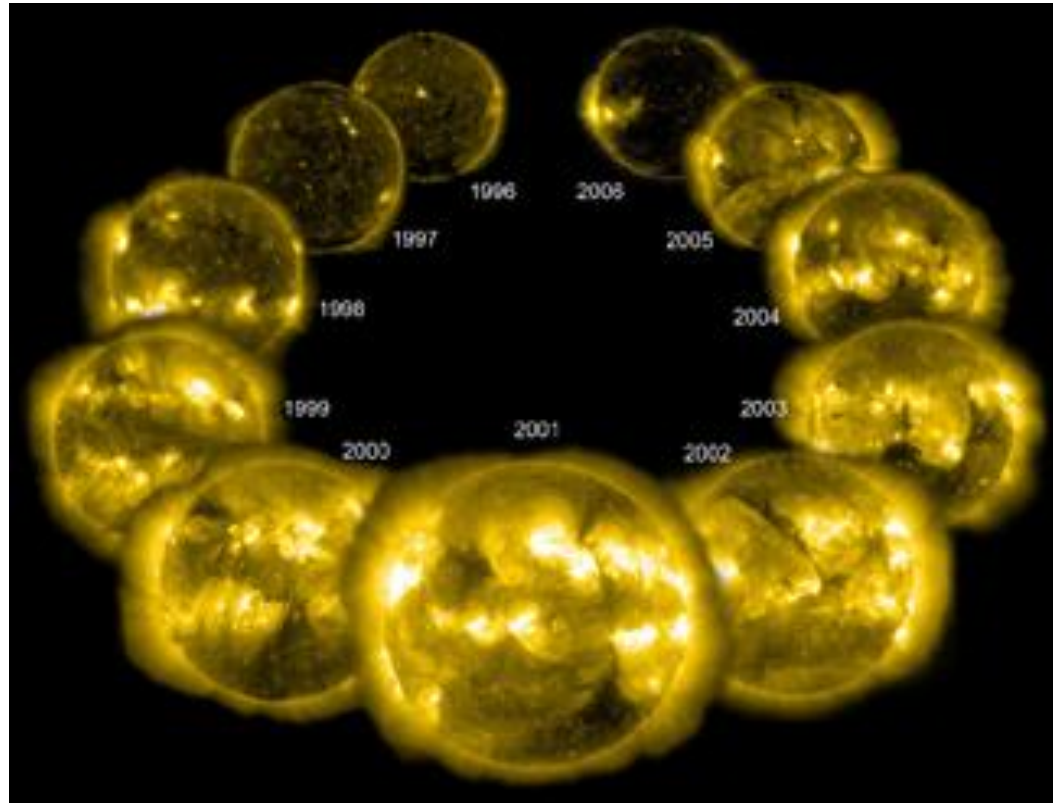
Flare



Flare



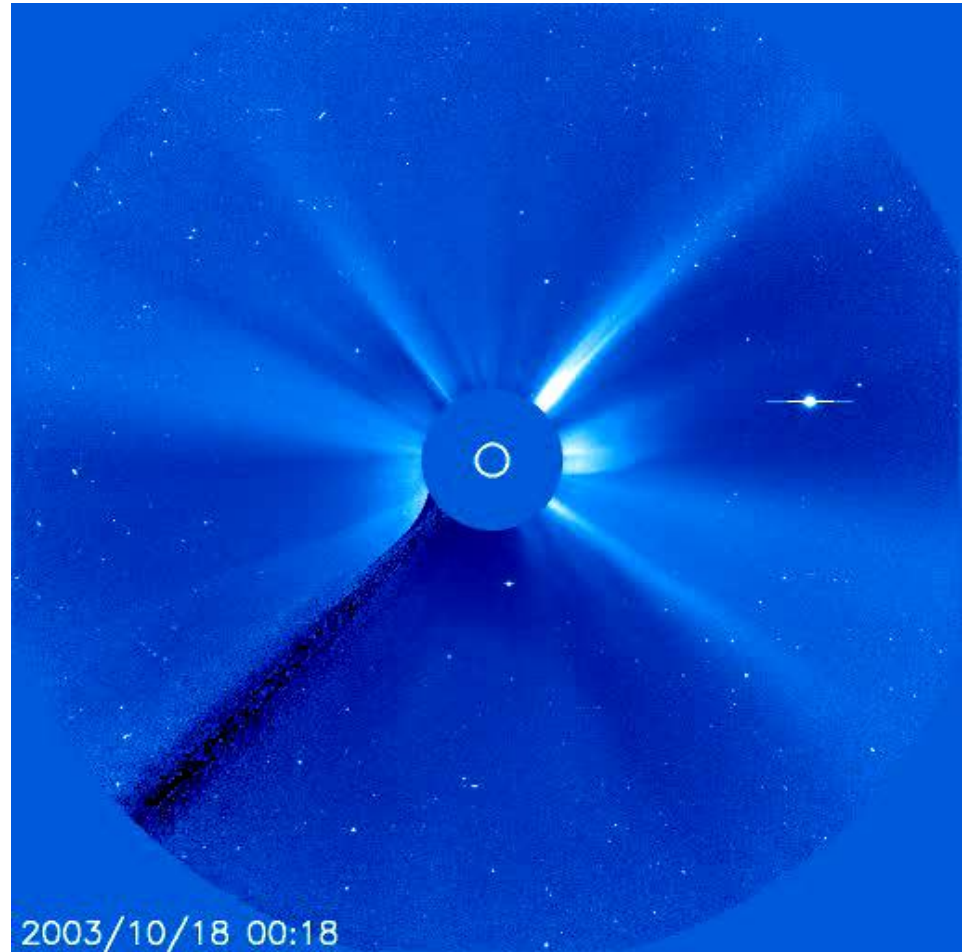
Le dernier cycle solaire (vu par SOHO)



Emission de la couronne solaire à près de $2 \cdot 10^6$ K

Vent solaire et éjections

Vent solaire continu
+
Ejections sporadiques
+
Particules de hautes énergies



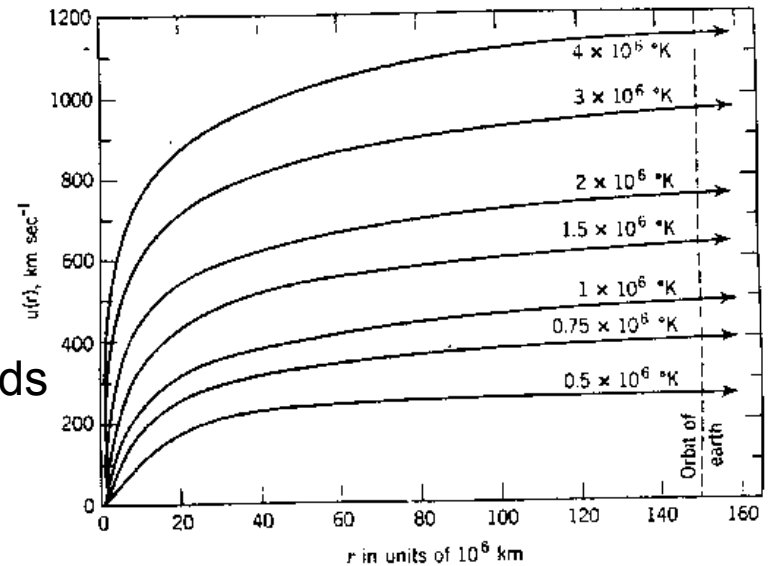
Vent solaire

Modèle hydrostatique ne fonctionne pas (pression trop faible à « l'infini »)
→ modèle d'expansion coronale

à L1 :

- Vitesse ~ 400 km/s (50 - 2000 km/s)
- Concentration $\sim 5 \text{ cm}^{-3}$ (0.01 – 100 cm^{-3})
- $|B| \sim 5$ nT

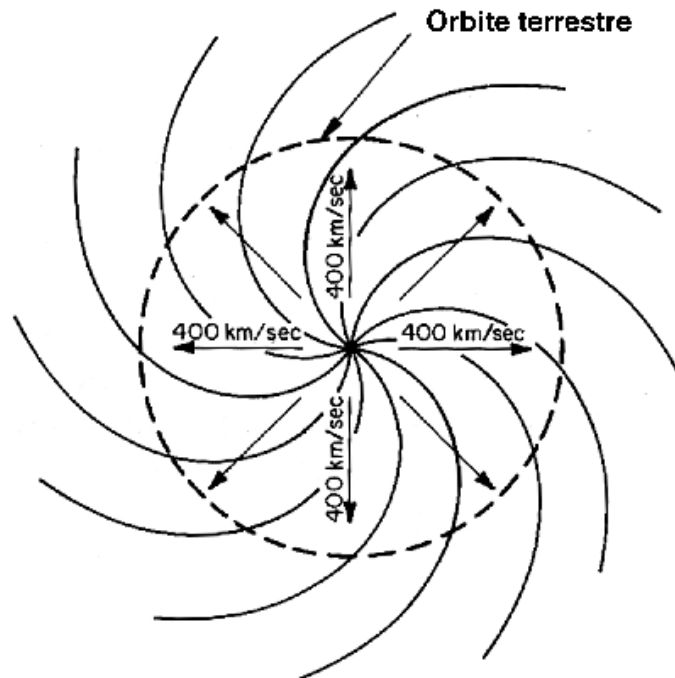
Composition : p^+ , e^- , He^{2+} , traces d'ions lourds



Champ magnétique interplanétaire

Champ « gelé » dans le plasma → champ magnétique interplanétaire transporté radialement par le vent solaire

Rotation du Soleil → spirale de Parker



Magnétohydrodynamique (MHD)

Notion de gel de \mathbf{B} dans le plasma

En MHD dite idéale:

- Le flux magnétique à travers un contour donné lié au plasma est constant.
- Un élément fluide qui est sur une ligne de champ reste lié à cette ligne de champ.

Le vent solaire ne peut donc pas pénétrer dans la magnétosphère?!

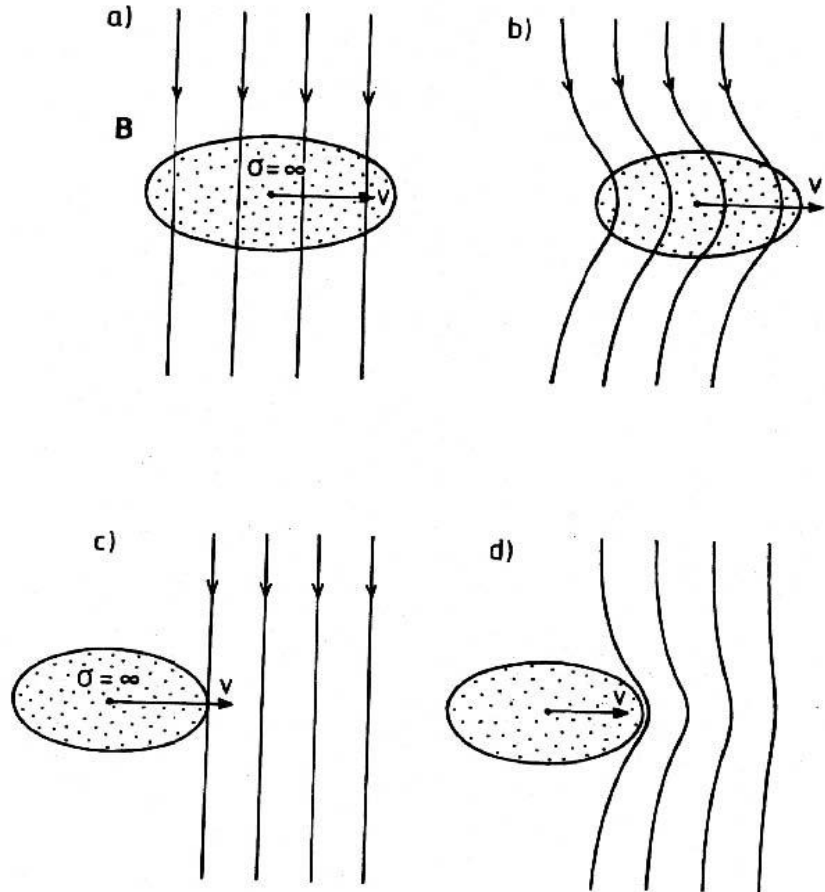
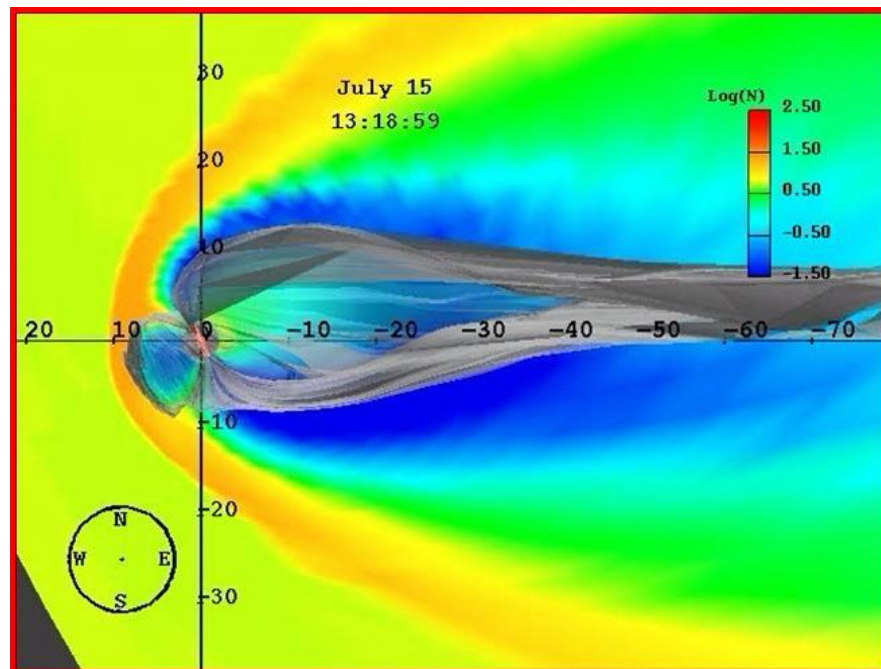


Figure 7.6: An illustration of the "frozen-in" field concept. (a) A magnetic field \mathbf{B} is assumed to be penetrating a region of highly conducting plasma.

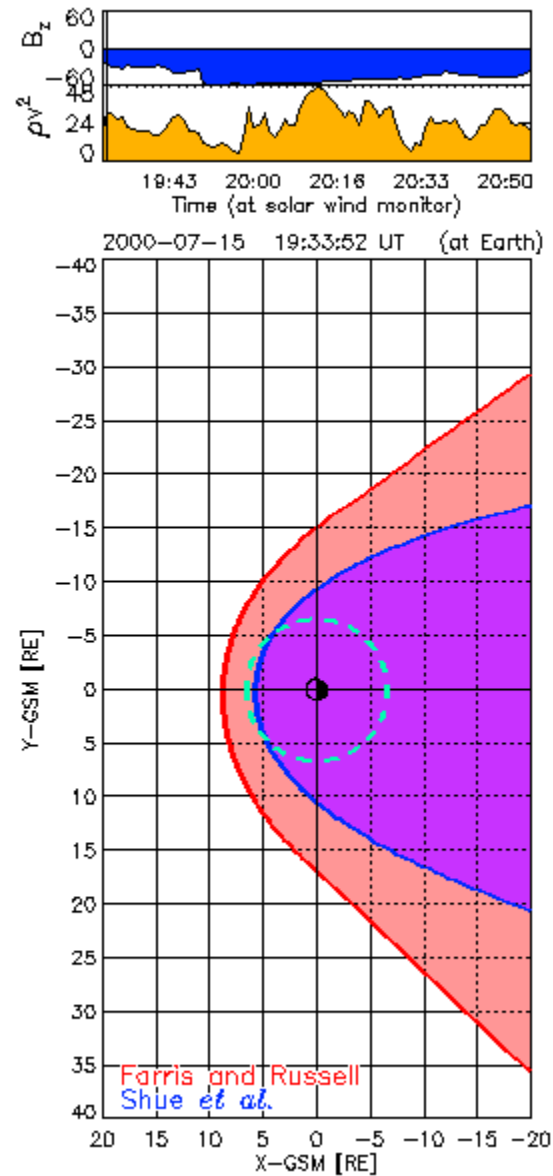
Cavité magnétosphérique

La Terre et son champ magnétique constituent un obstacle à l'écoulement du vent solaire. Cet écoulement est dévié et la région dans laquelle le champ géomagnétique domine forme une cavité: la magnétosphère.



Simulation montrant la concentration dans l'environnement terrestre

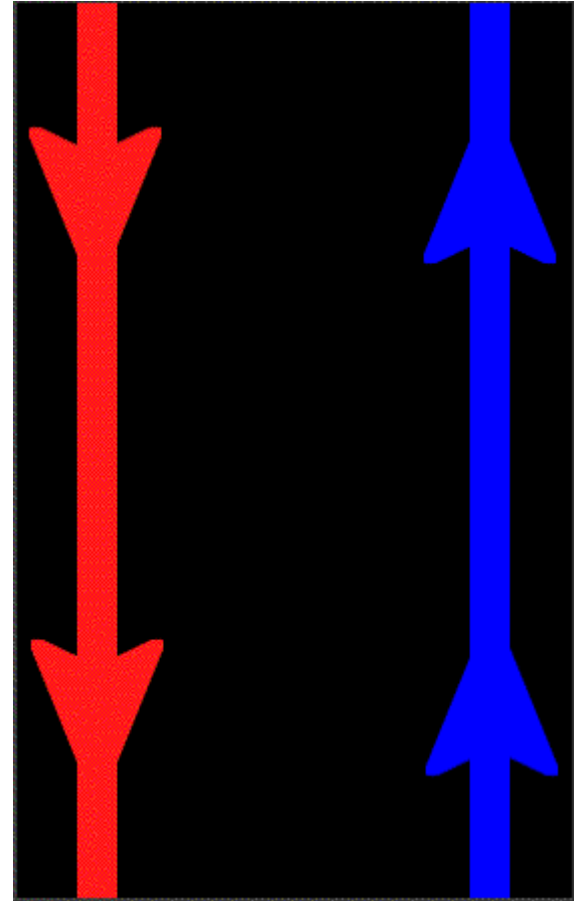
Réponse aux stimuli du vent solaire



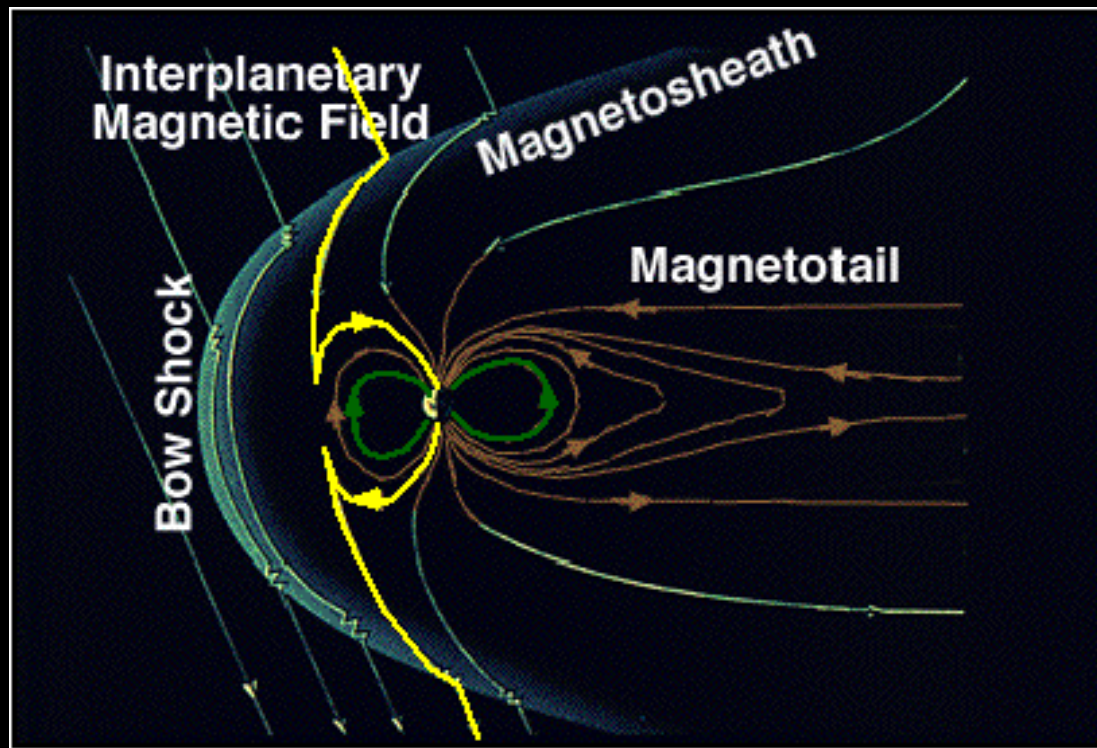
Reconnexion magnétique

La reconnexion magnétique est un processus fondamental dans un plasma qui:

- Modifie la topologie magnétique.
- Convertit l'énergie magnétique en énergie cinétique.
- Accélère les particules.

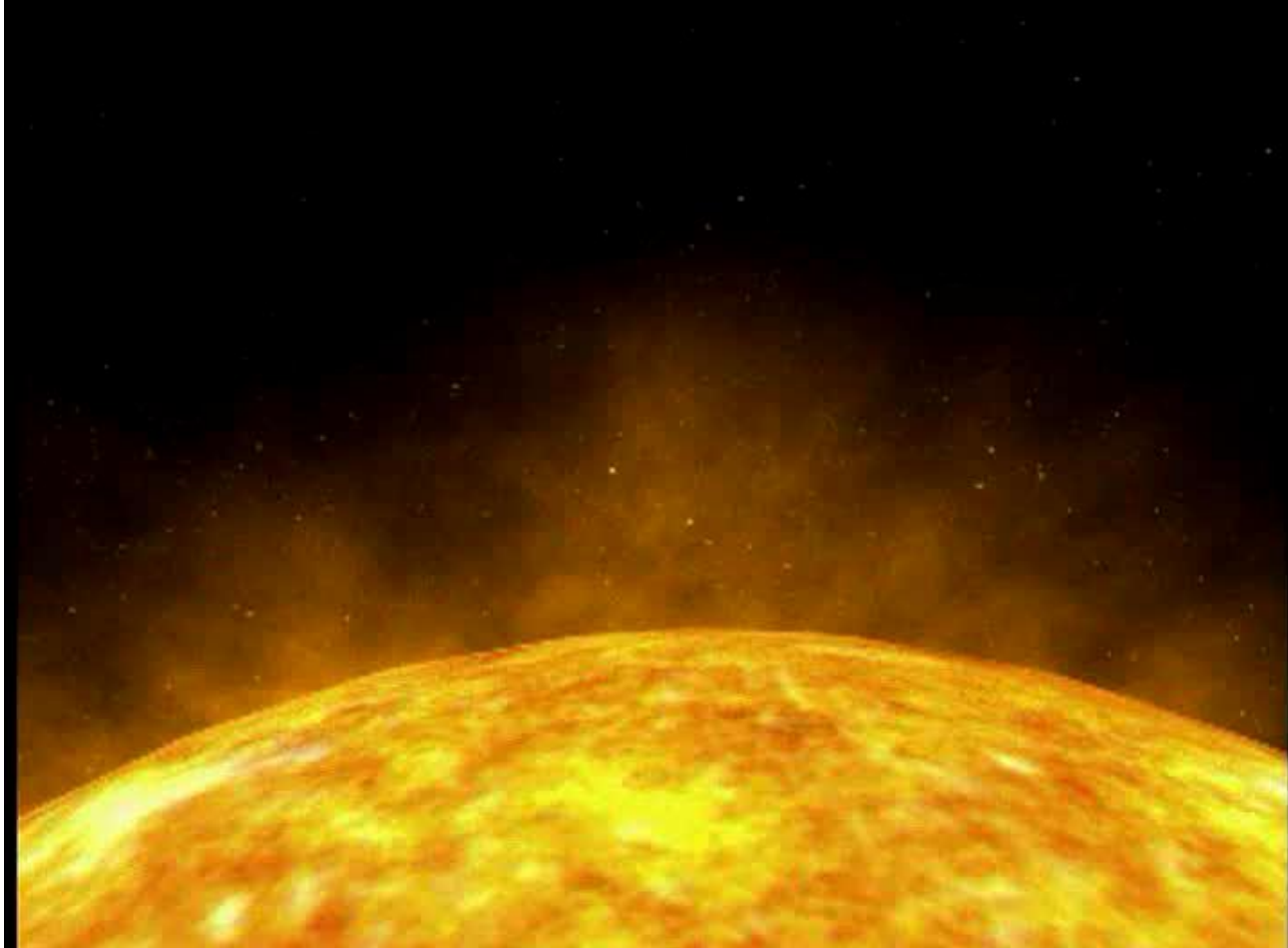


Reconnexion magnétique et convection magnétosphérique



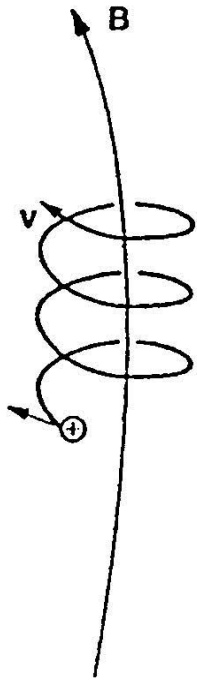
Couplage VS-M-I

Reconnexion magnétique

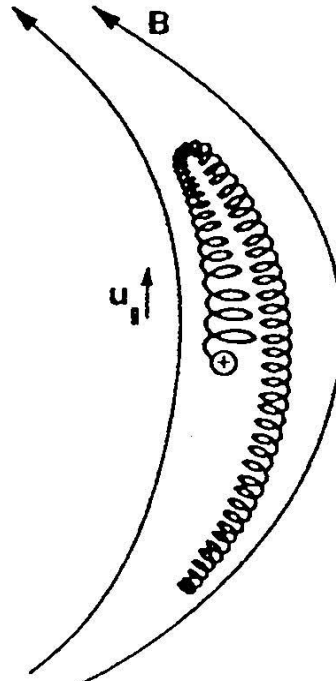


Rappel :

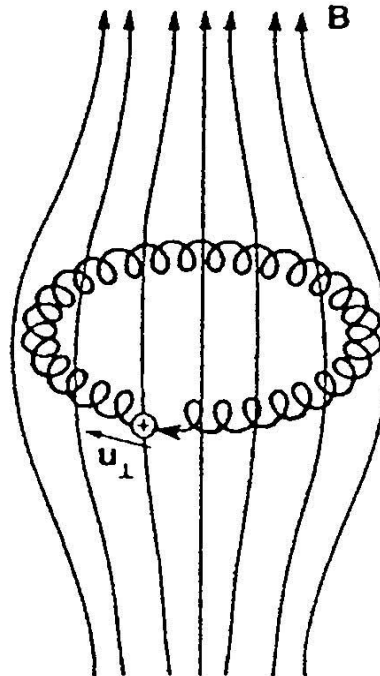
mouvement d'une particule chargée dans la magnétosphère



Giration
autour d'une
ligne de
champ



Rebond entre 2
miroirs
magnétiques



Dérive azimuthale
perp. à B

Trajectoire les particules chargées dans la magnétosphère

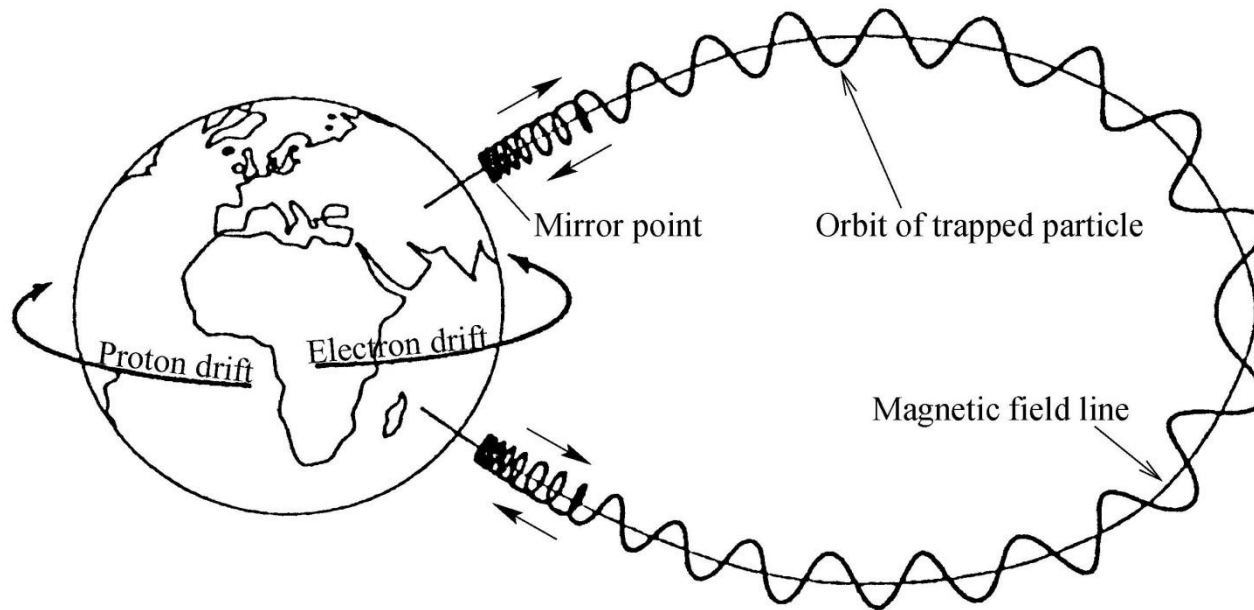
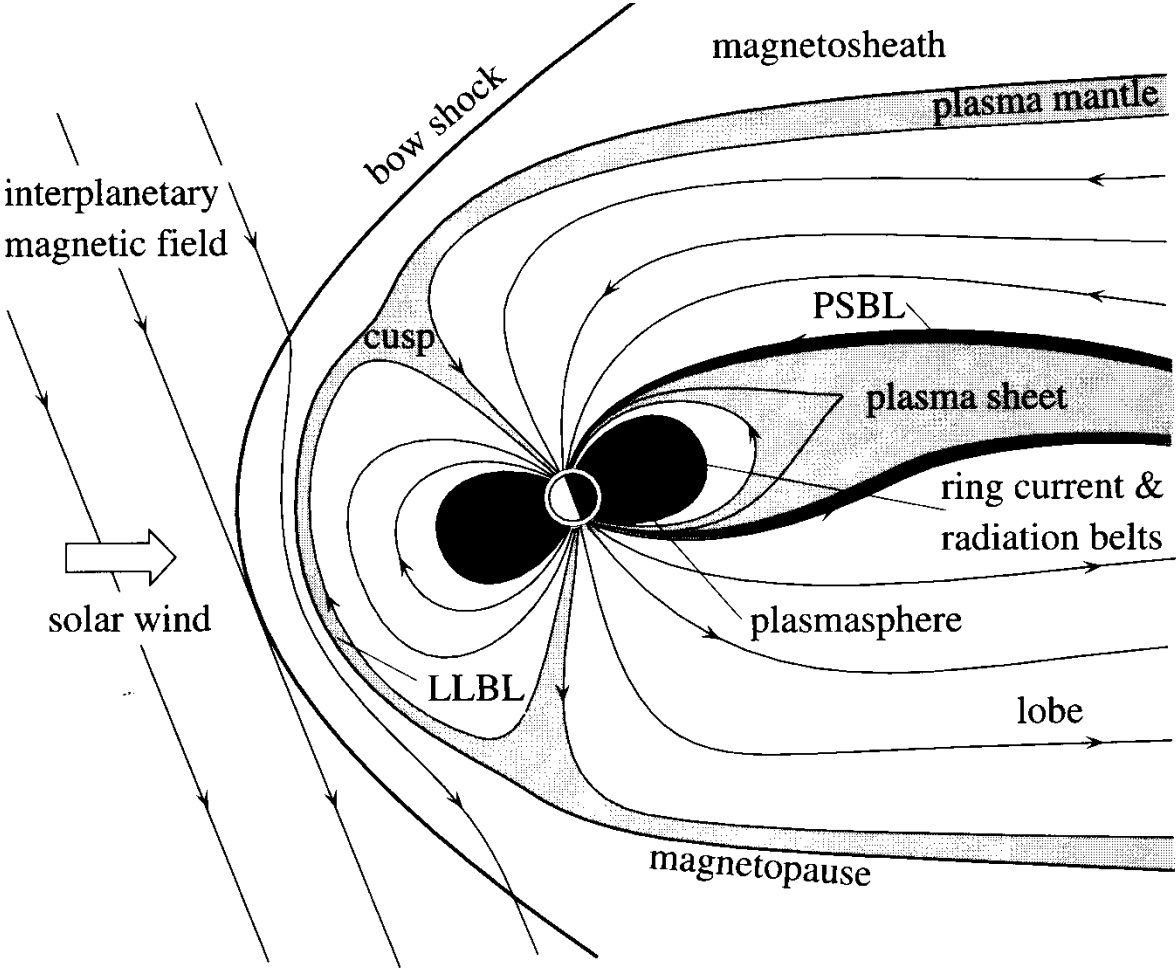


Fig. 3.5. The orbit of a magnetically trapped particle in the geomagnetic field.

Régions sources des aurores polaires

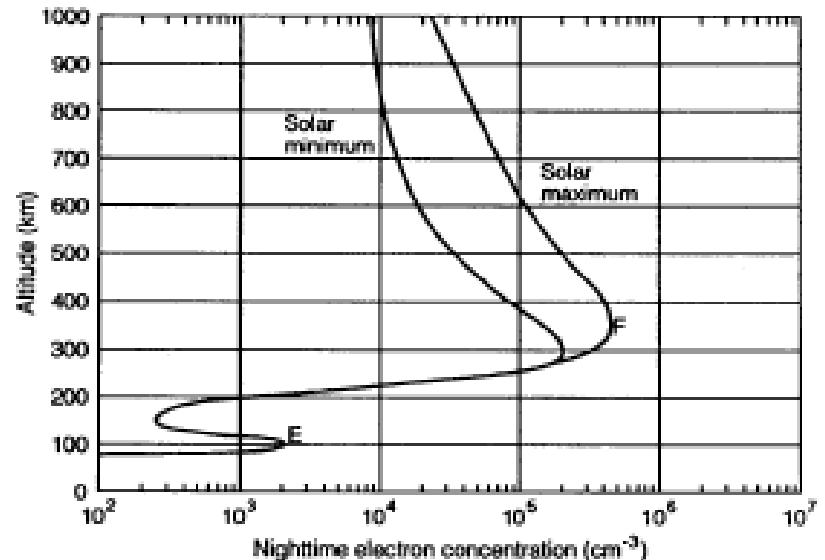
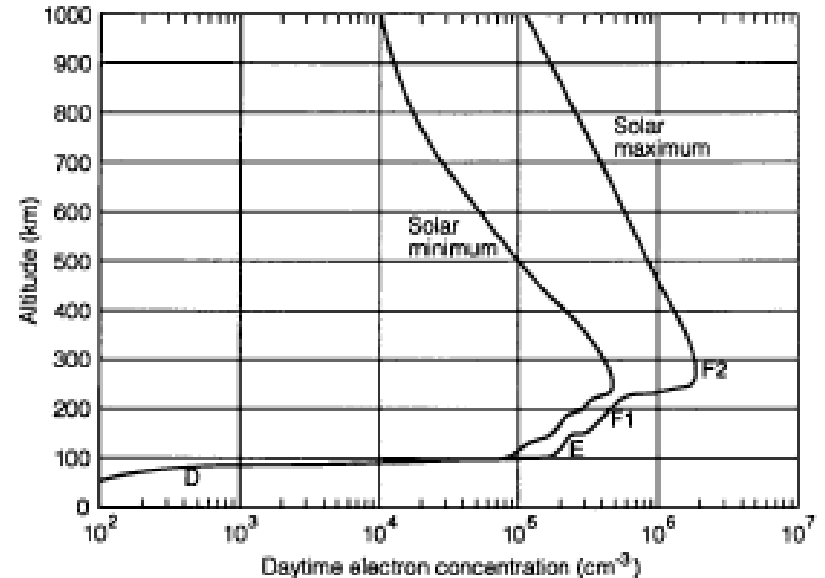


Interaction EUV-atmosphère

Rayonnement ionisant → création d'une couche ionisée.

Les différentes couches d'ionosphère

- D : X et particules ~MeV
- E : EUV et particules ~keV
- F1 : dominée par ion moléculaires (N_2^+ , O_2^+ , NO^+)
- F2 : dominée par ions atomiques (O^+)
- Haute ionosphère (H^+)



Couplages magnétosphère-ionosphère

Précipitations électroniques

flux intégré d'énergie des électrons [mW.m⁻²] pour Kp = 1

flux intégré d'électrons [m⁻².s⁻¹] pour Kp = 1

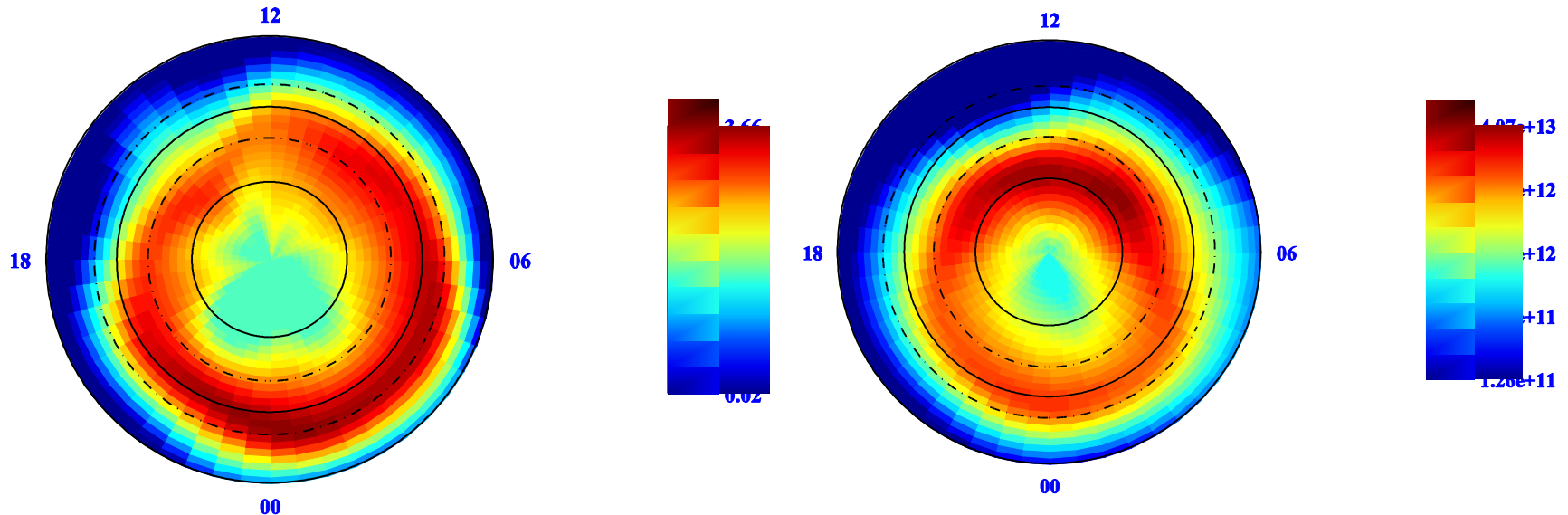


Figure 1-2 : Cette figure montre l'ovale auroral pour Kp = 1 dans le modèle statistique basé sur les observations de Dynamics Explorer (Hardy D.A., M.S. Gussenhoven , and E. Holeman, A statistical model of auroral electron precipitation., *J. Geophys. Res.*, 90, A5, 4229-4248, 1985). En haut, on voit le flux d'énergie intégré, en mW.m⁻². Le dessin du bas représente le flux intégré de particules [s⁻¹.m⁻²]. On retrouve les différences décrites dans le texte, en particulier sur les lieux d'intensification des flux.

Interaction magnétosphère-atmosphère

Précipitations électroniques

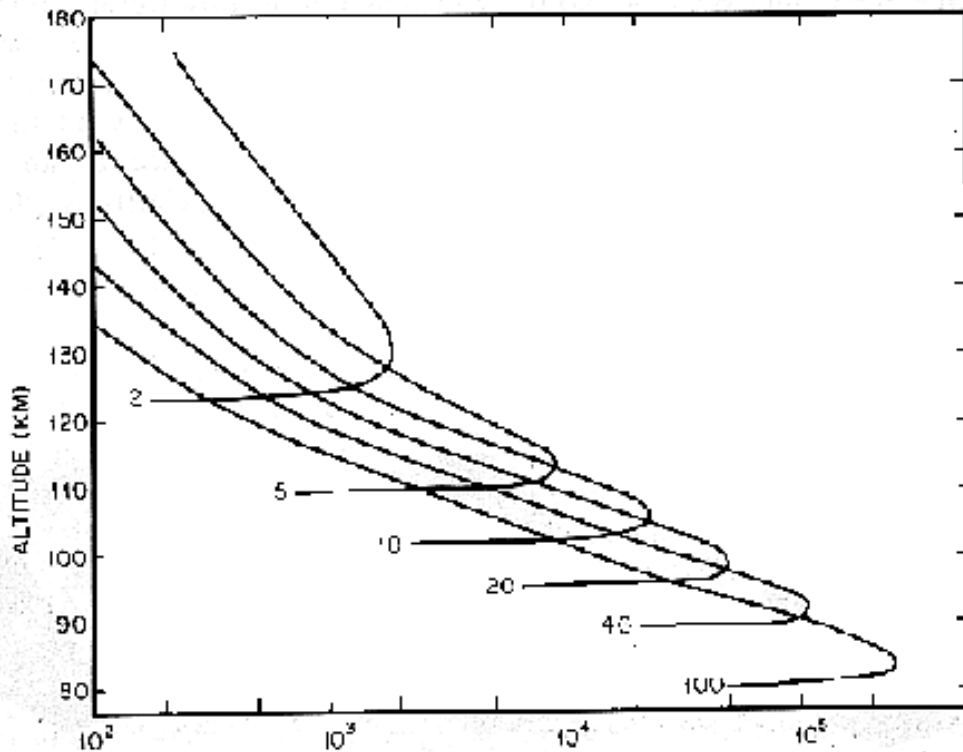
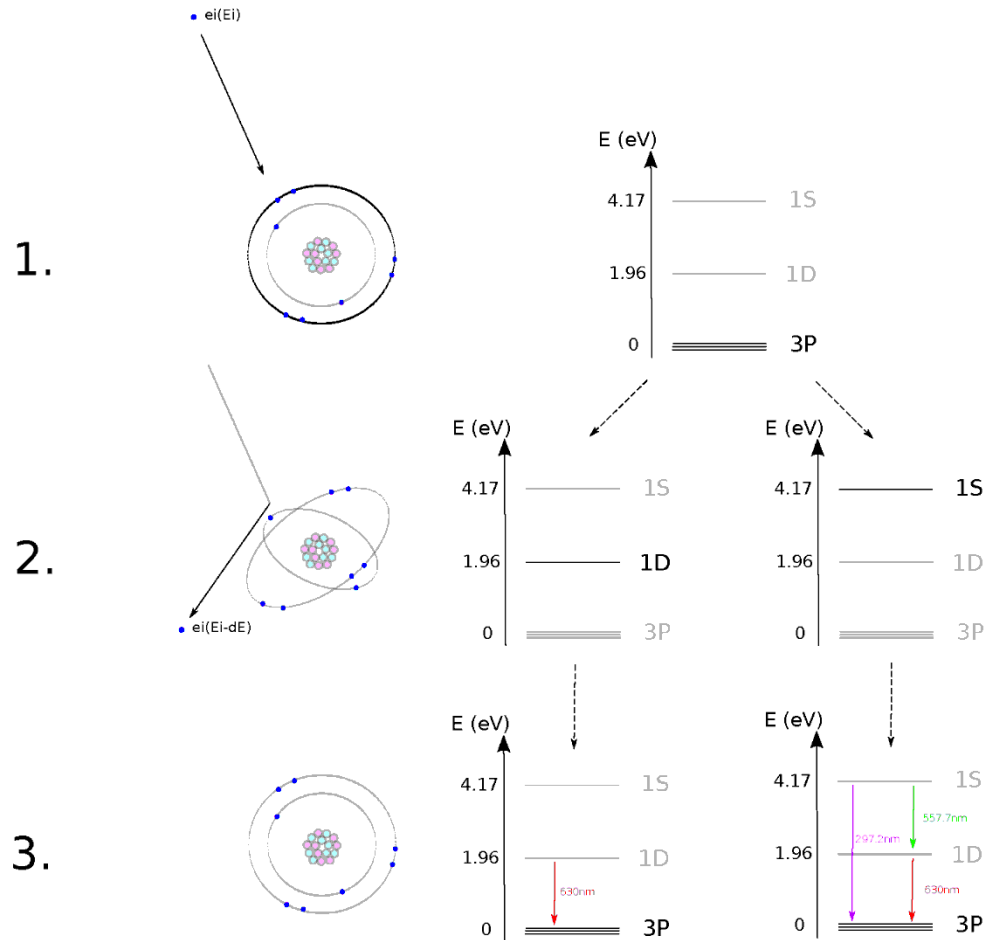


figure 1-4 : profils verticaux des taux d'ionisations normalisés pour différents flux d'électrons monoénergétiques précipitants dans l'atmosphère le long des lignes de champ magnétique. Les énergies précipitantes sont indiquées auprès de chaque courbe (en keV). L'axe horizontal représente les productions, en cm⁻³.s⁻¹.

Emissions lumineuses

exemple de l'oxygène atomique O

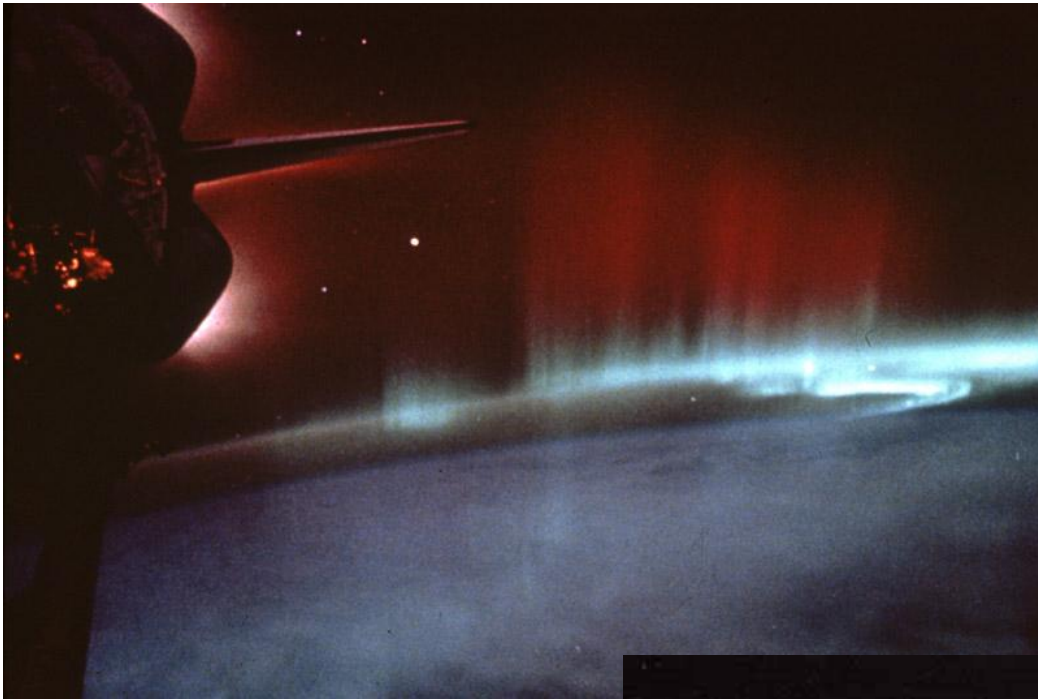




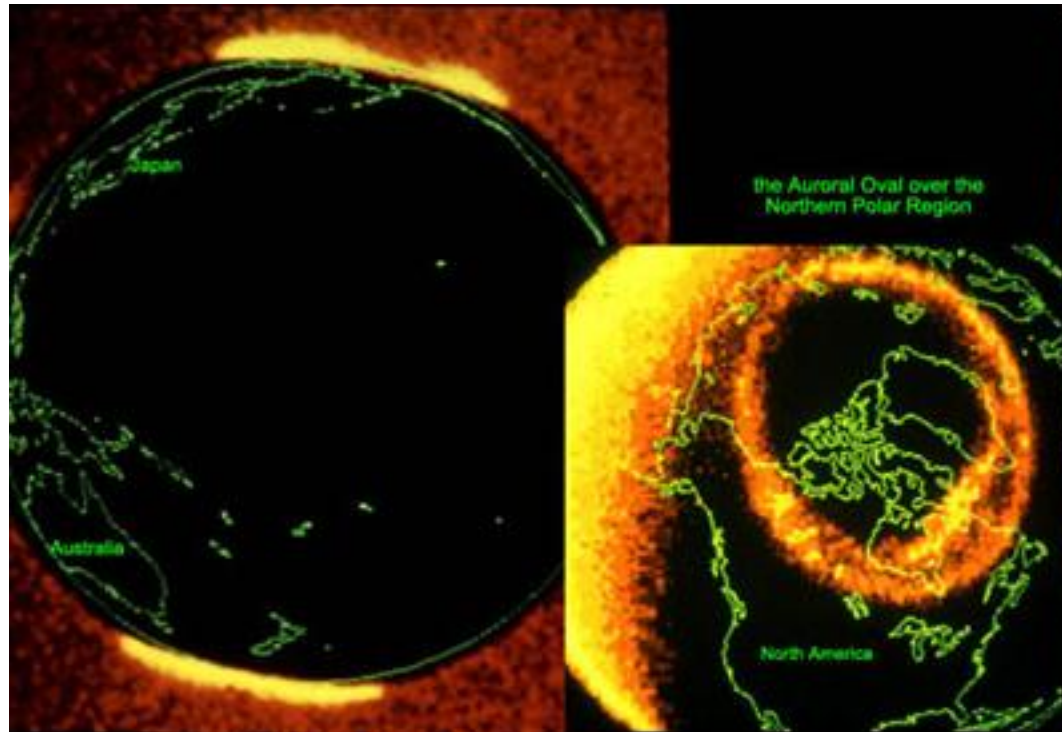




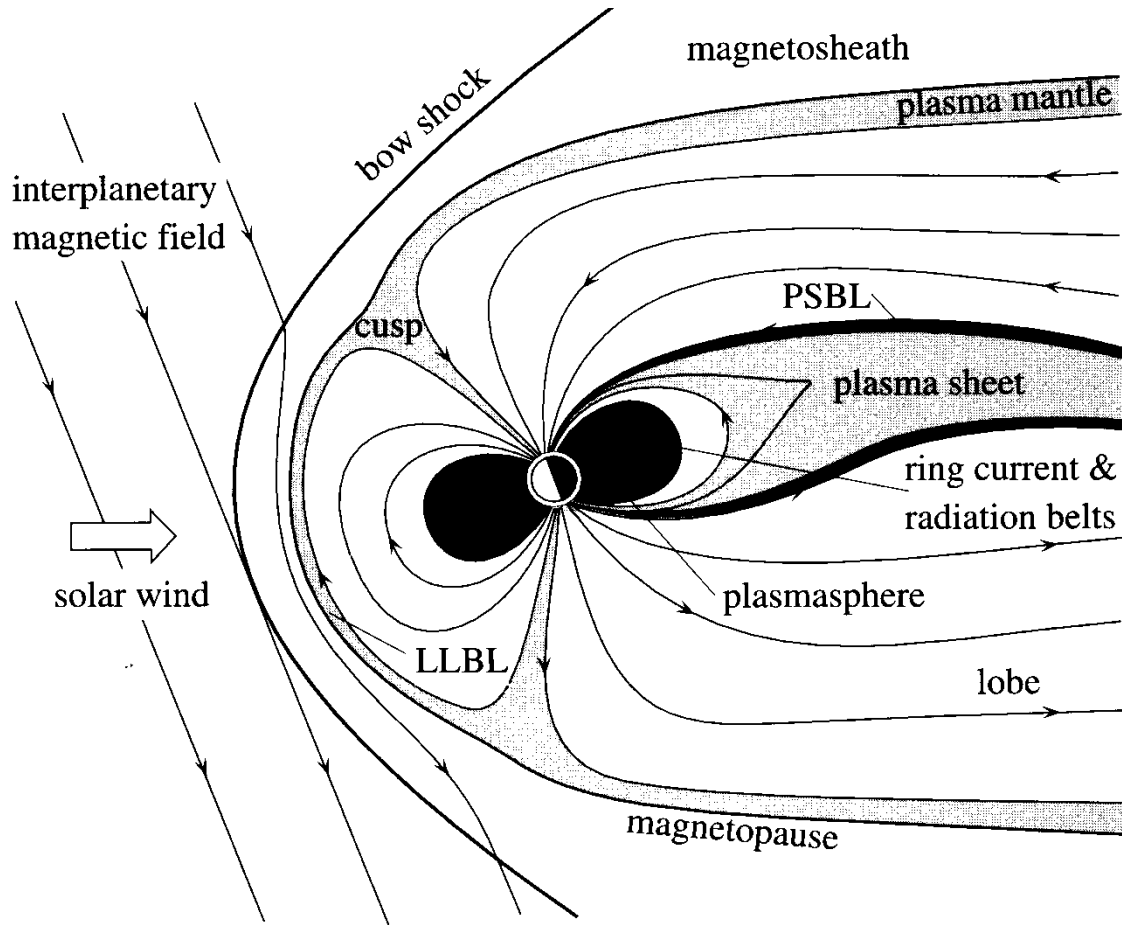




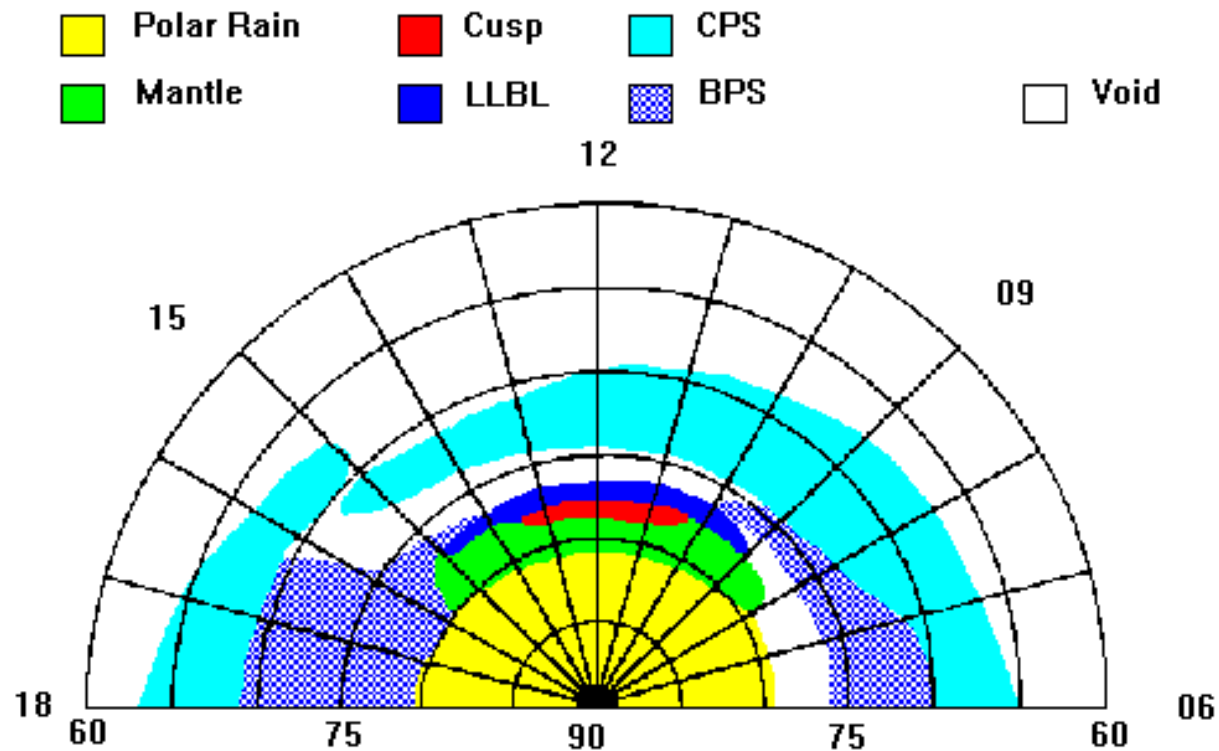
Oval auroral



Pénétration du vent solaire dans l'ionosphère



Projection dans l'ionosphère des régions magnétosphériques





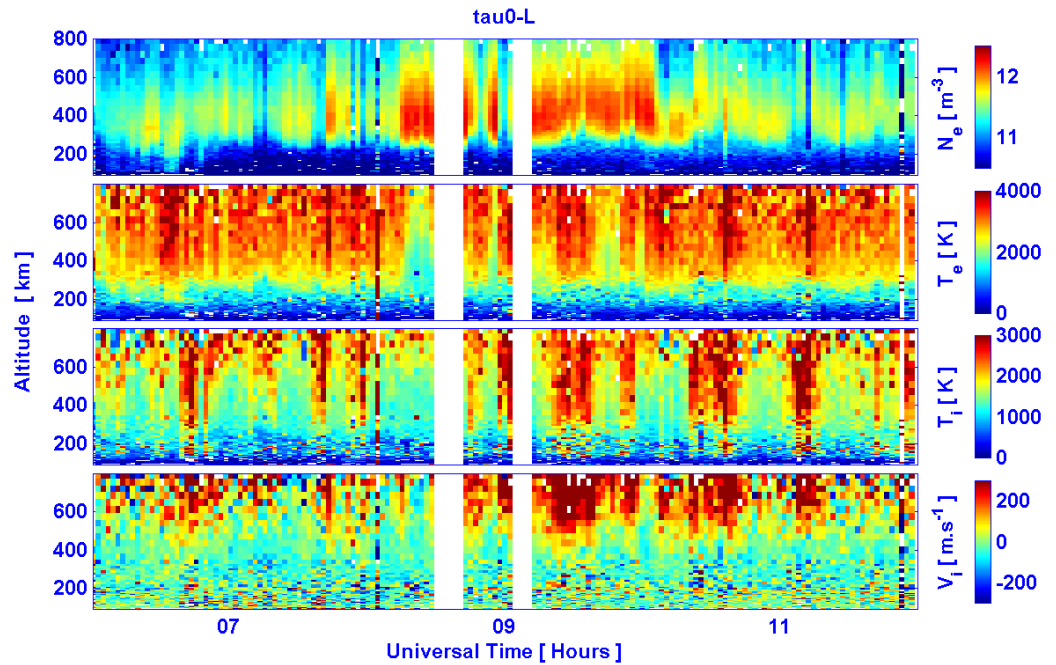
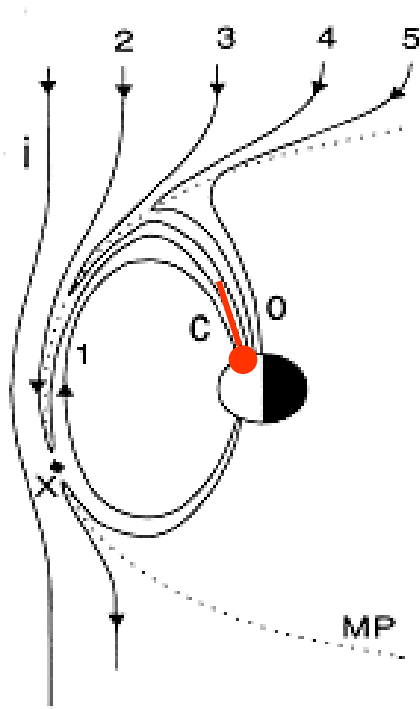
KHO-SPEAR-ESR



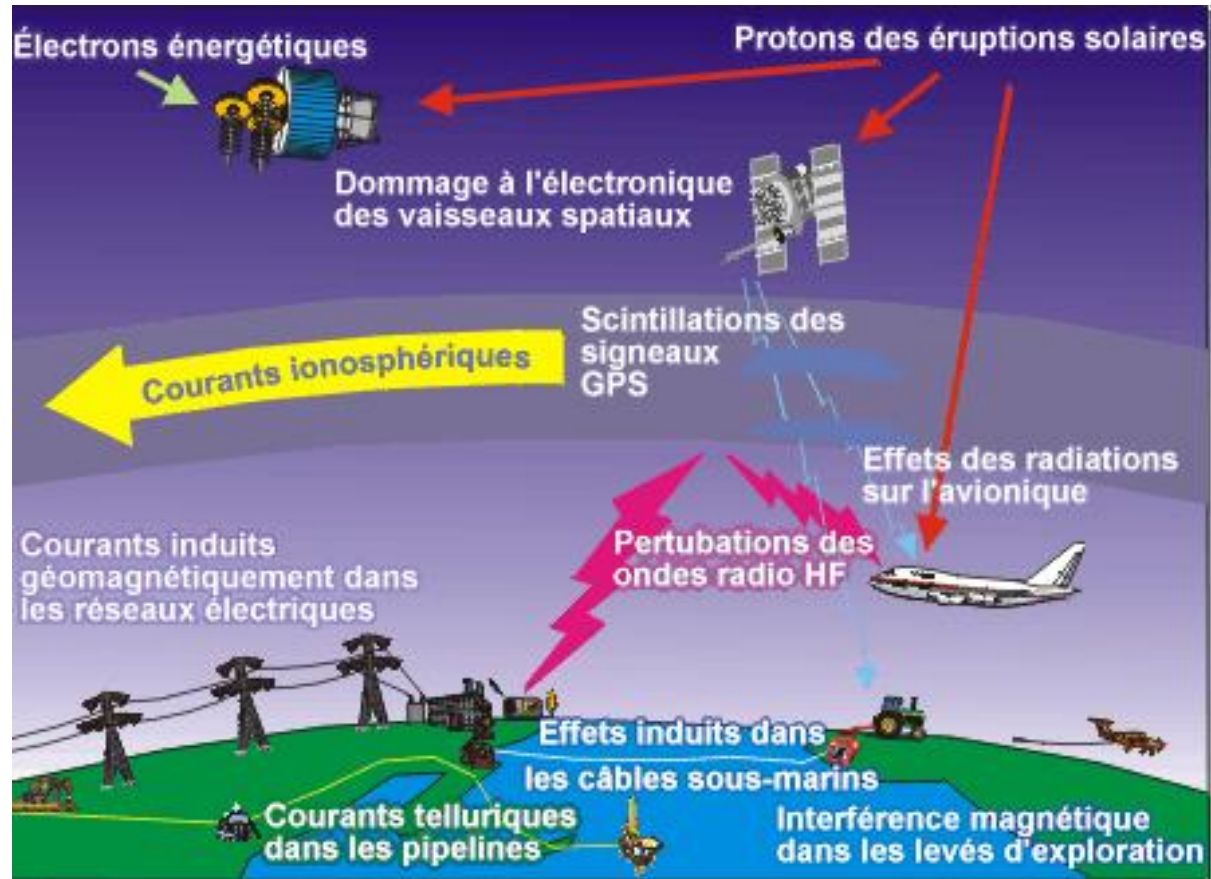
Radars EISCAT



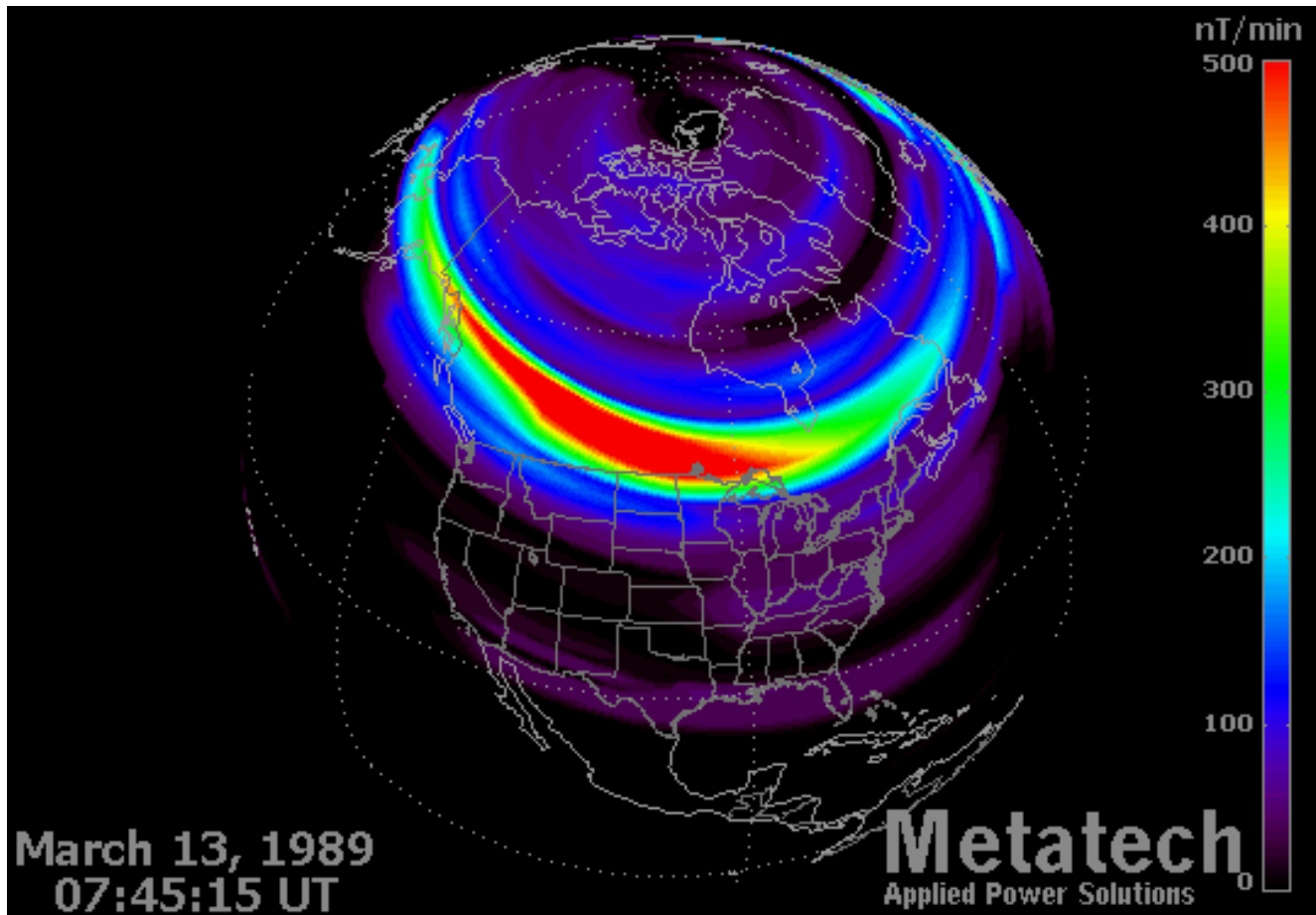
Précipitation de particules du vent solaire vue par un radar



Météorologie de l'espace



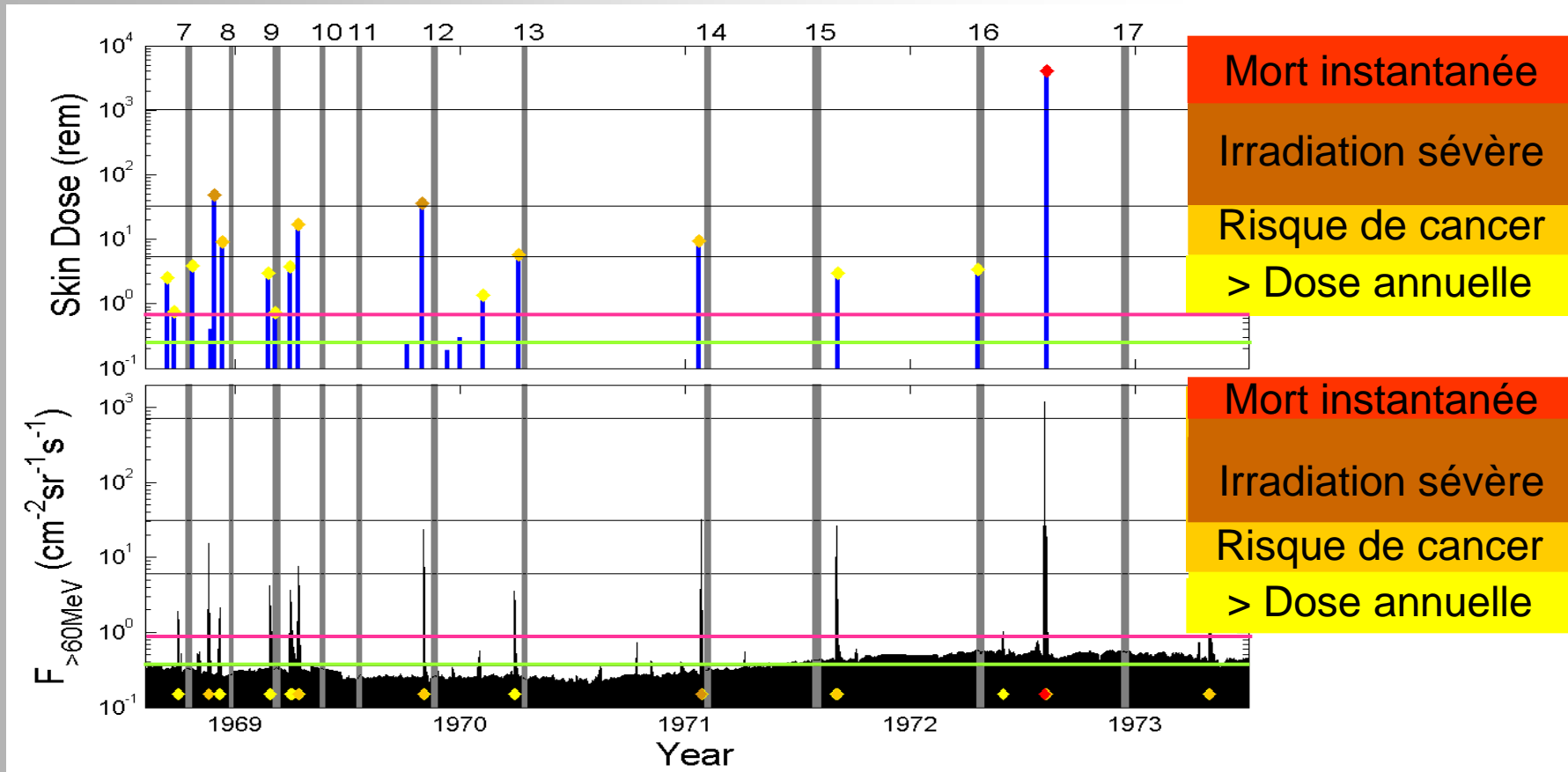
13 mars 1989





Missions Apollo

- Protons énergétiques solaires (SEP) pendant l'ère Apollo



Mort instantanée

Irradiation sévère

Risque de cancer

> Dose annuelle

Mort instantanée

Irradiation sévère

Risque de cancer

> Dose annuelle

— Dose annuelle max.

— Dose annuelle
moyenne sur Terre