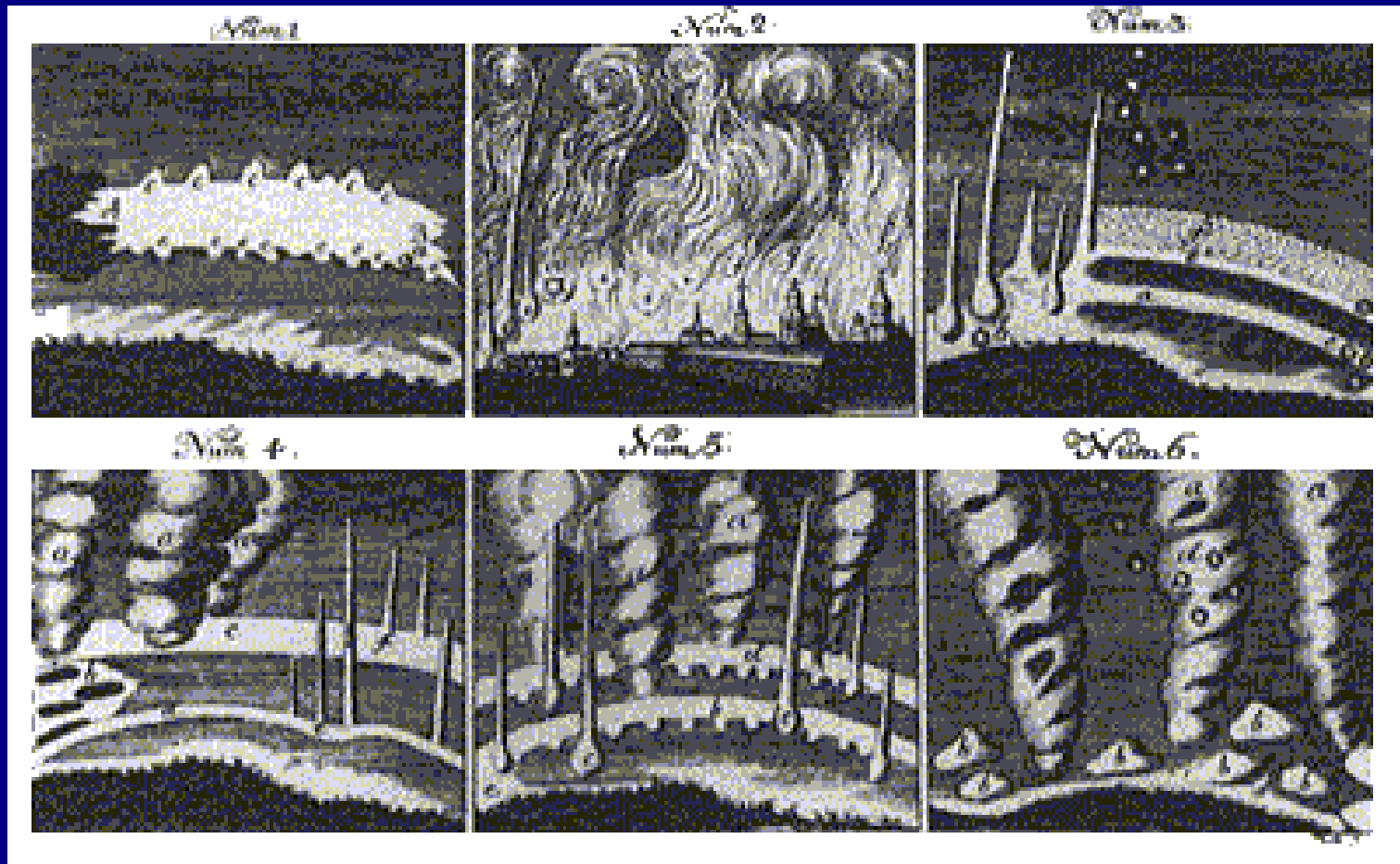


Qu'est-ce que c'est ?



Vu (et interprété) en 1716 par Lindquist.



Option O3 plasmas spatiaux

Fabrice Mottez

Observatoire de Paris-Meudon



Nuage

Pas d'aurore

Arc auroral

Pleine Lune

Aurore diffuse



Photographie: Olivier Grünwald



<10 km

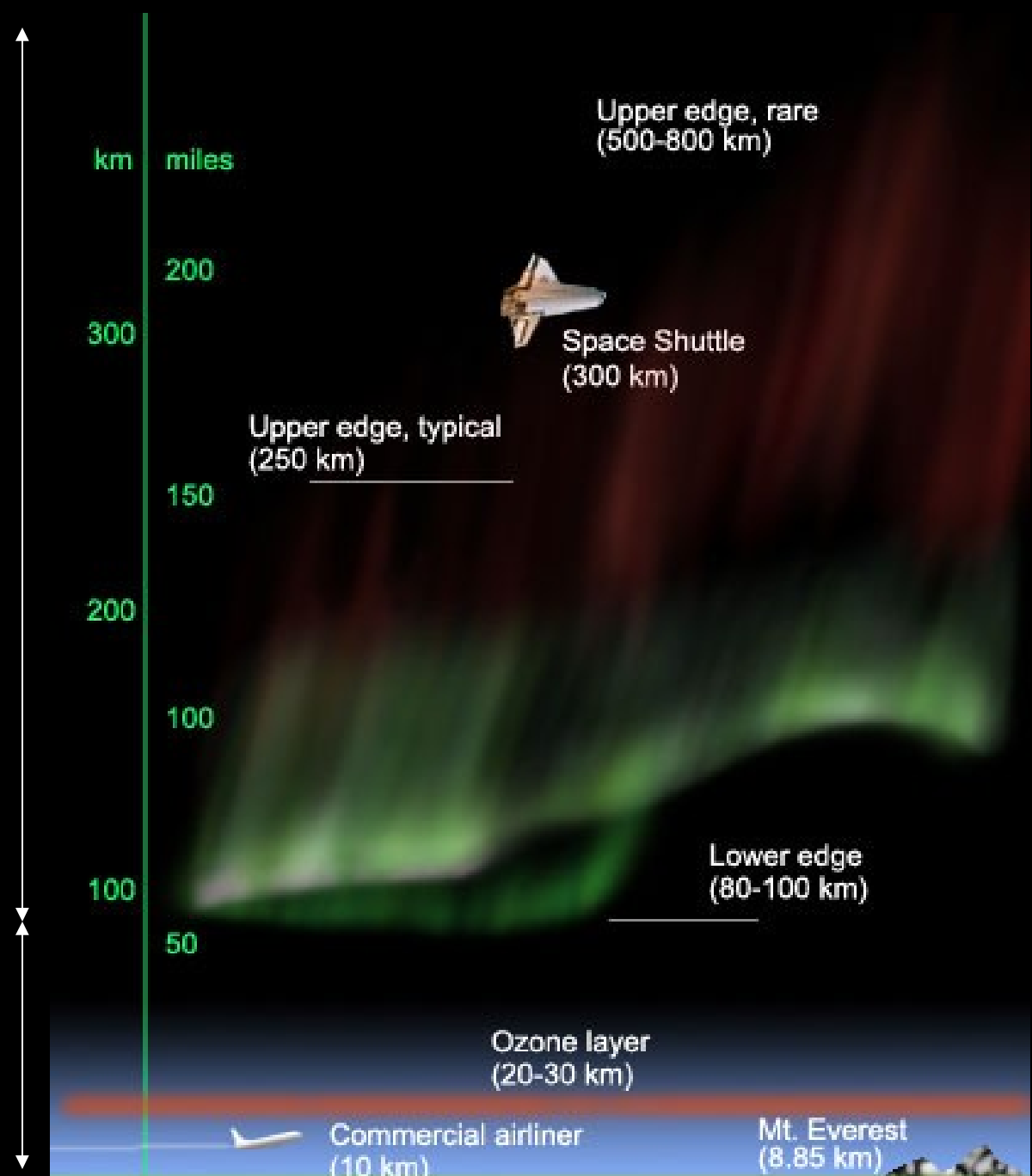
100 à 1000 km

80 km

L'atmosphère et l'ionosphère

Atmosphère ionisée
(ionosphère)

Atmosphère neutre



Les aurores et l'ionosphère

Des tirs de fusée [Meredith, 1954] prouvèrent que les particules causant les aurores sont des électrons en provenance de l'espace.

Harang [1951] calcula que si des électrons provoquent les aurores, il doivent avoir une énergie de 15-30 keV (surestimé).

Mc Illwain [1960] estima leur énergie à 6 keV.



Tir de fusée de sondage ionosphérique, à Poker Flat en Alaska. [U. Cornell, Kintner et Kelley].

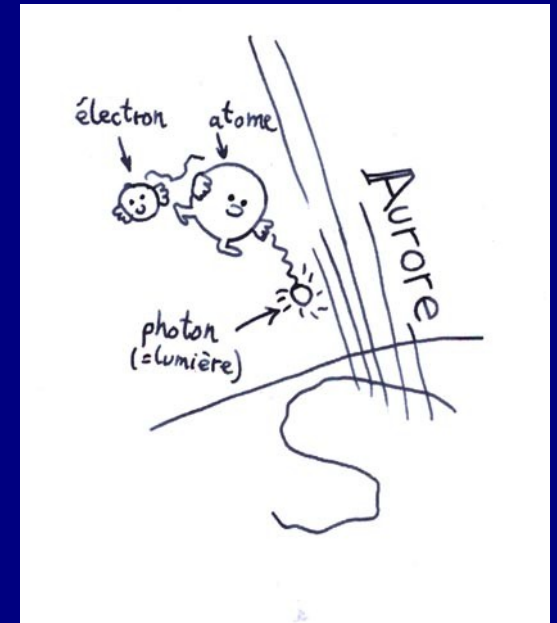
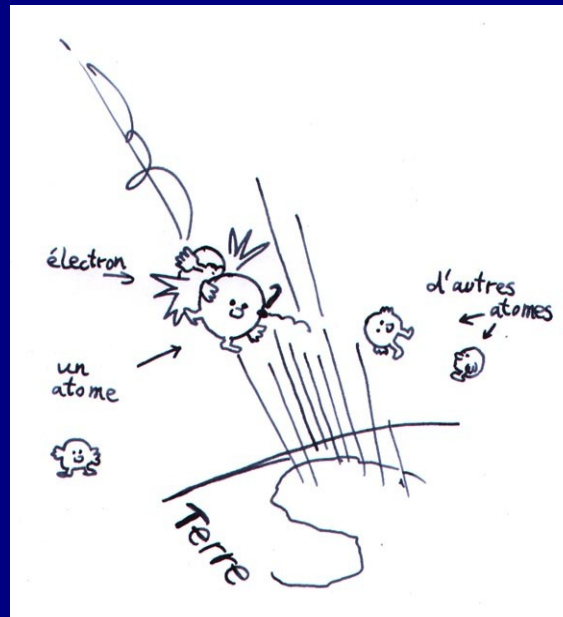
Les aurores et la lumière

Les aurores sont produites dans l'ionosphère.

Des particules bousculent les atomes/ions et leur apportent de l'énergie.

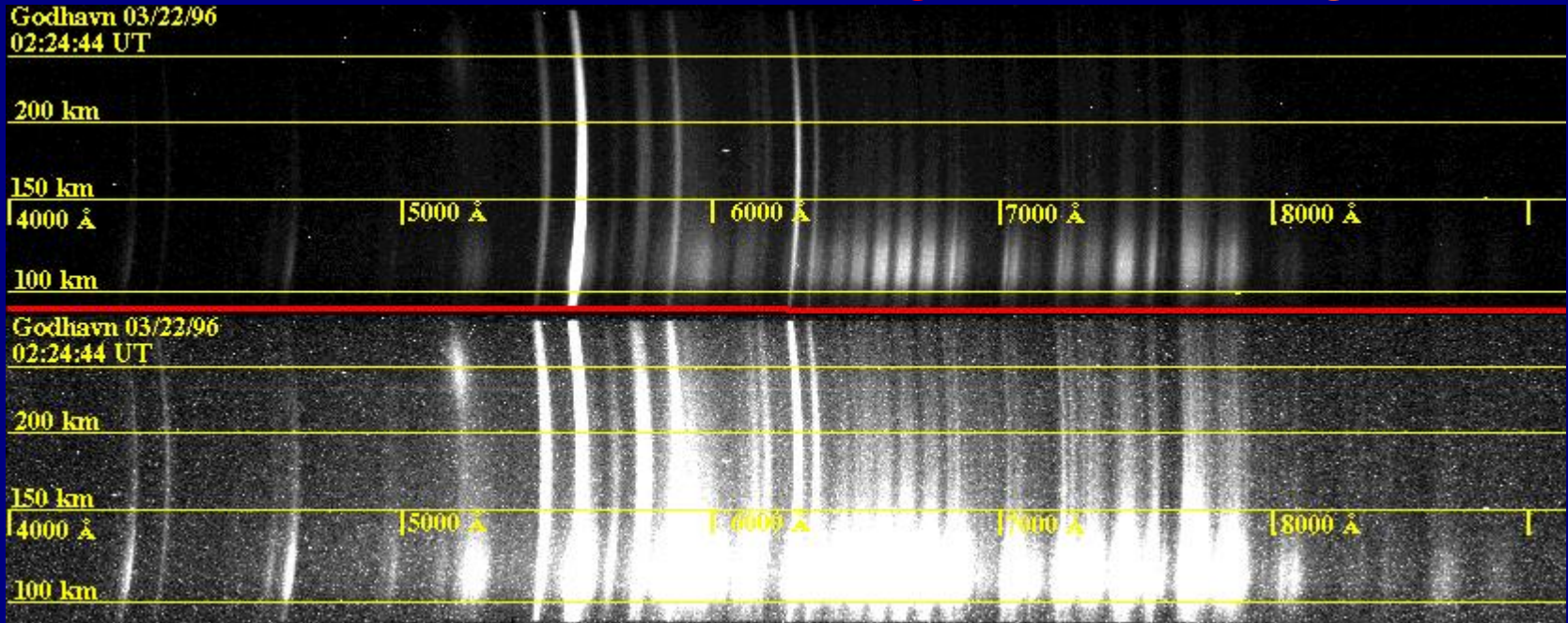
Les atomes excités restituent leur énergie en émettant un photon : de la lumière. Ce sont ces photons que nous contemplons lors des aurores.

L'atome quand à lui retrouve son état de repos (bien mérité).



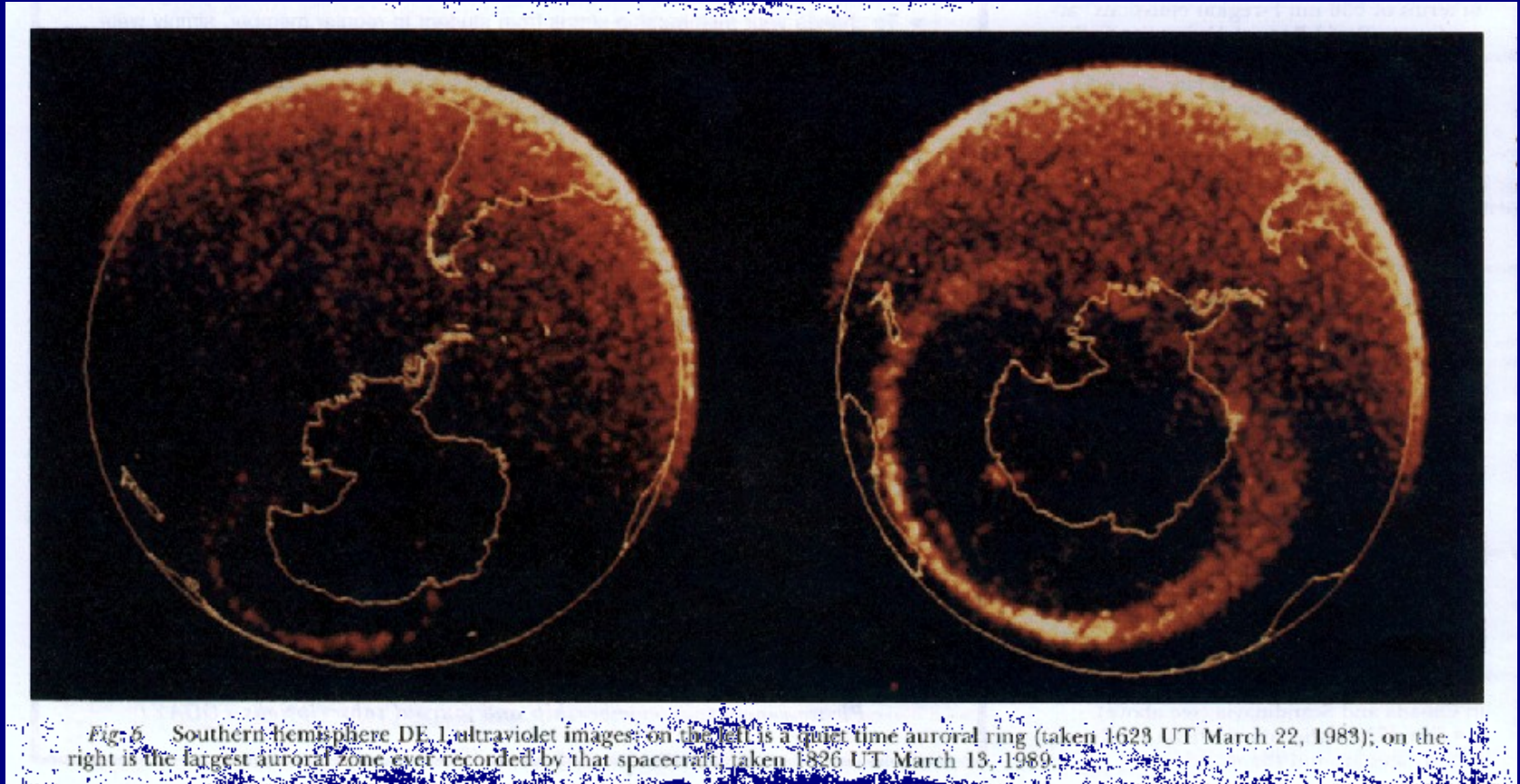
Un spectre auroral enregistré au Groenland

Vert Jaune Rouge Infrarouge



Spectrogramme imageur, on voit la dépendance du spectre (longueur d'onde en horizontal) avec l'altitude (axe vertical). Le spectre du dessous est le même, mais surexposé.
[EOSL, 1996]

Les aurores sont-ils seulement des phénomènes lumineux et radio ? L'exemple des très fortes aurores en mars 1989.



Ovale auroral en période calme et pendant l'orage magnétique du 13 mars 1989. [Dynamic Explorer 1, NASA]

Les effets sur les réseaux électriques.

13 mars 1989 : 6 millions de Canadiens (dont Montréal et Québec) et Etats Uniens sans électricité pendant 9 heures ou plus. 20 000 MW distribués normalement.

Pannes en Suède (au même moment).

Pannes de téléphone, de communications maritimes et avec des satellites.

Quelques usines HiTech arrêtent leur production.



Transformateur d'une centrale nucléaire US brûlé le 13 mars 1989.

Ce qui se cache derrière ces pannes

Le 13 mars 1989 :

Des variations de 6 degrés dans la direction du **champ magnétique**.
Champ magnétique beaucoup plus intense (certains magnétomètres saturés pendant plusieurs heures.)

Les modifications du champ magnétique terrestre induisent des chutes de tension importantes (des centaines de Volts) dans les grands réseaux électriques, d'où les pannes.

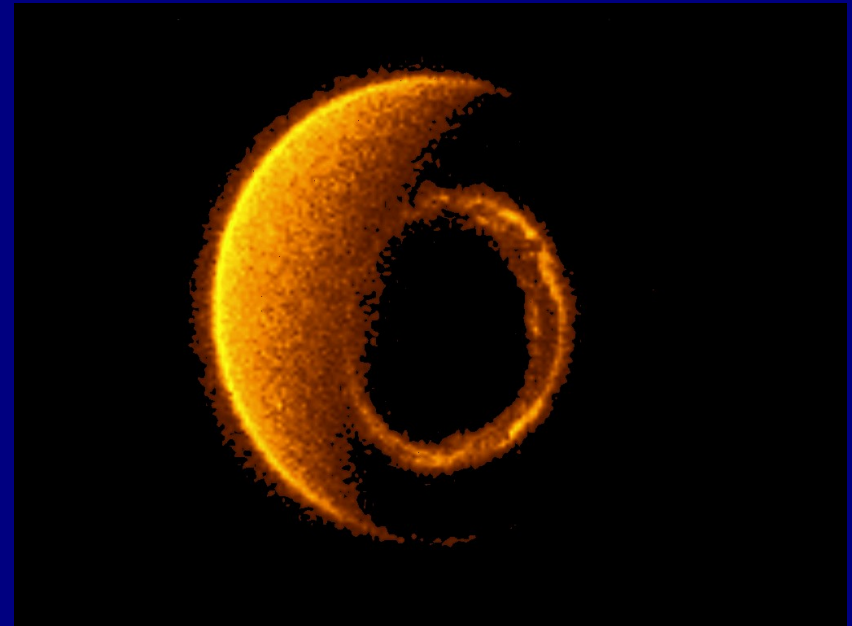


Les aurores : phénomène local ou global ?

A partir des années 1980, on a embarqué des caméras UV à bord des satellites.

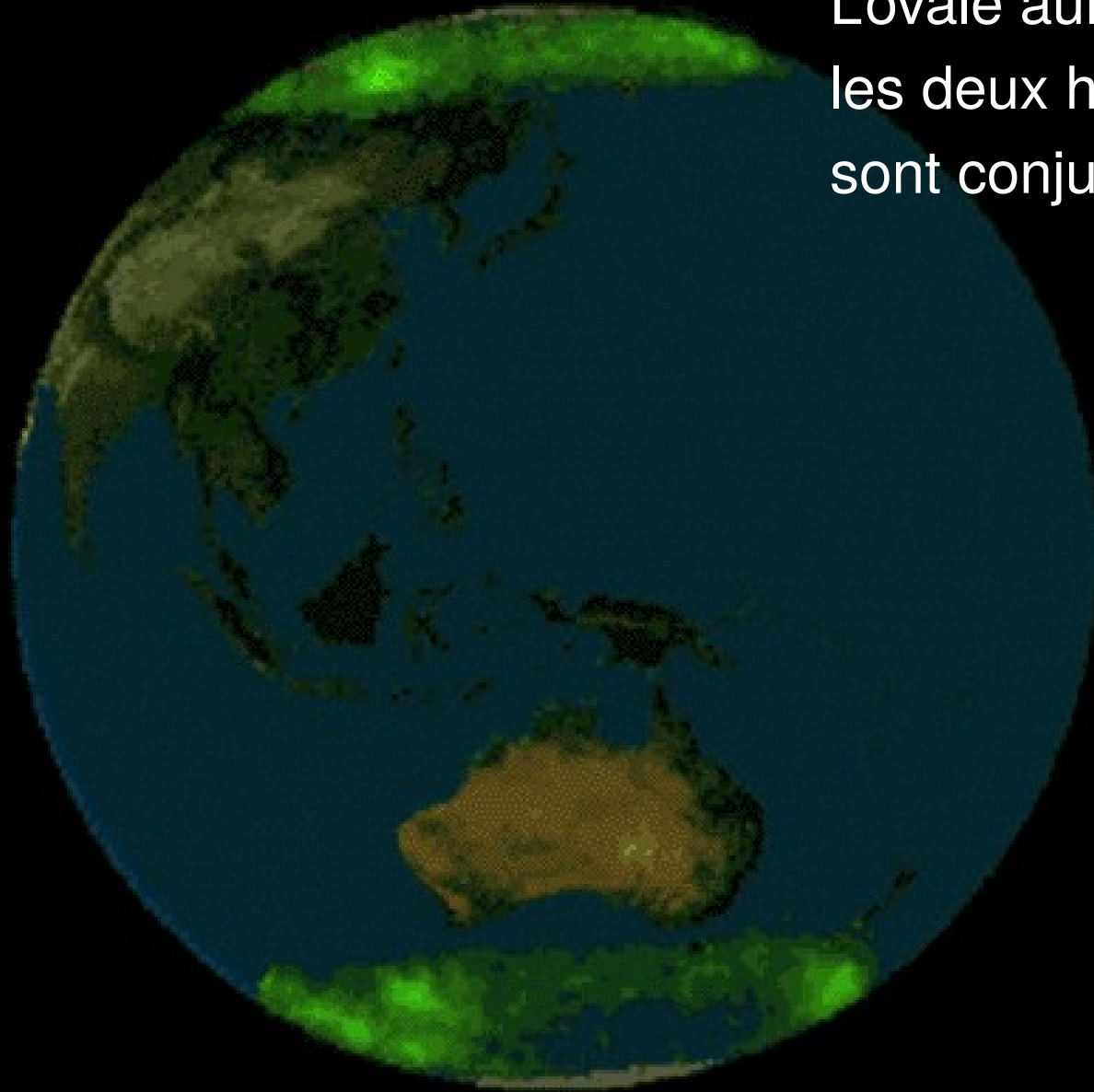
C'est en UV (non visibles au sol) que les aurores sont les plus brillantes.

On a eu une vision globale des régions aurorales.

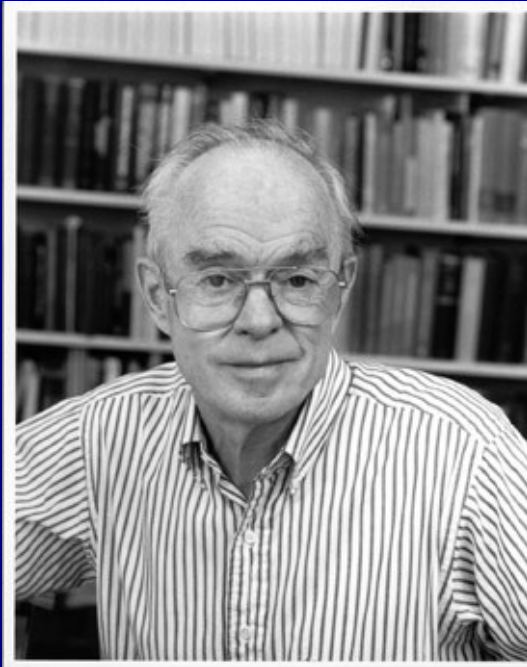


L'ovale auroral vu par la caméra UV de la sonde Dynamic Explorer 1 [U. Iowa]

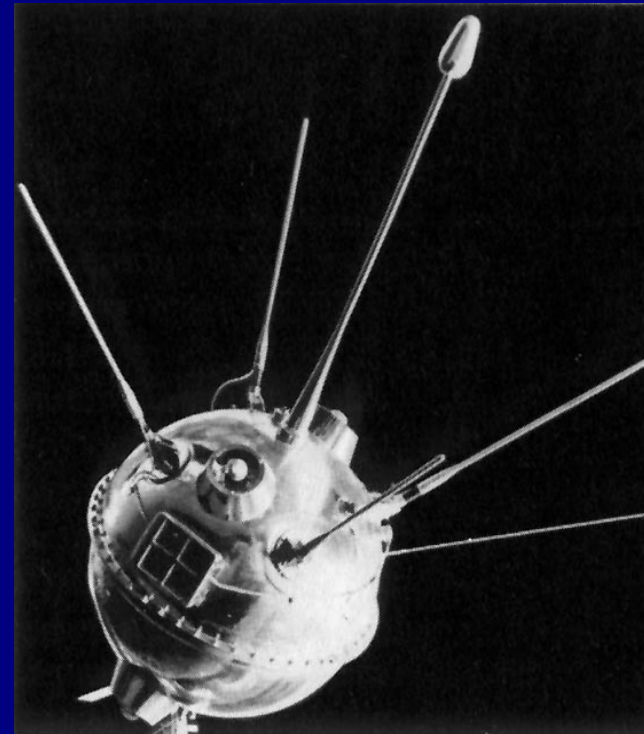
L'ovale auroral :
les deux hémisphères
sont conjugués.



Un événement important : la découverte du vent solaire.

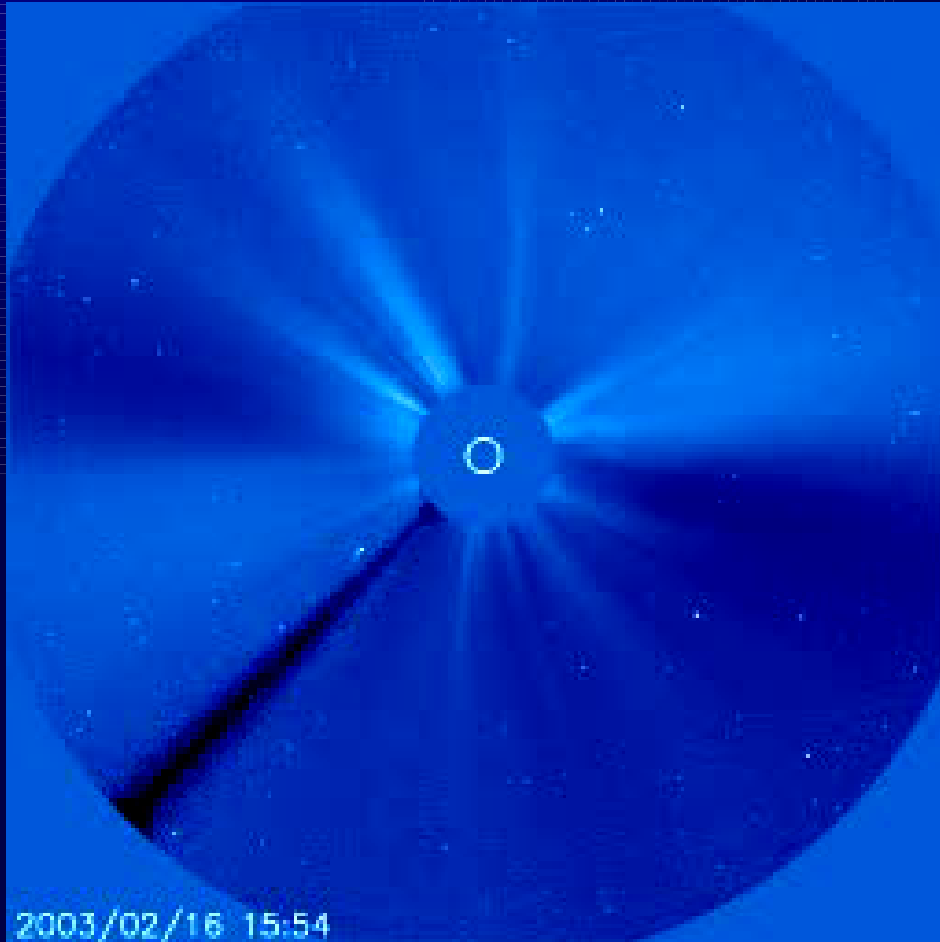


Eugène Parker,
prédiction théorique (1957).



La sonde soviétique Luna 1 (1959)
confirmation expérimentale.

Le vent solaire



Lasco / Soho

Un plasma (d'électrons protons et 25 % de noyaux d'hélium (en masse)) est continûment soufflé du Soleil et remplit tout l'espace interplanétaire

Il est peu dense, mais rapide, entre 300 et 800 km/s.

Trois choses importantes

Vent solaire

Une planète avec une atmosphère conductrice (ionosphère)

Un champ magnétique planétaire.

Le résultat

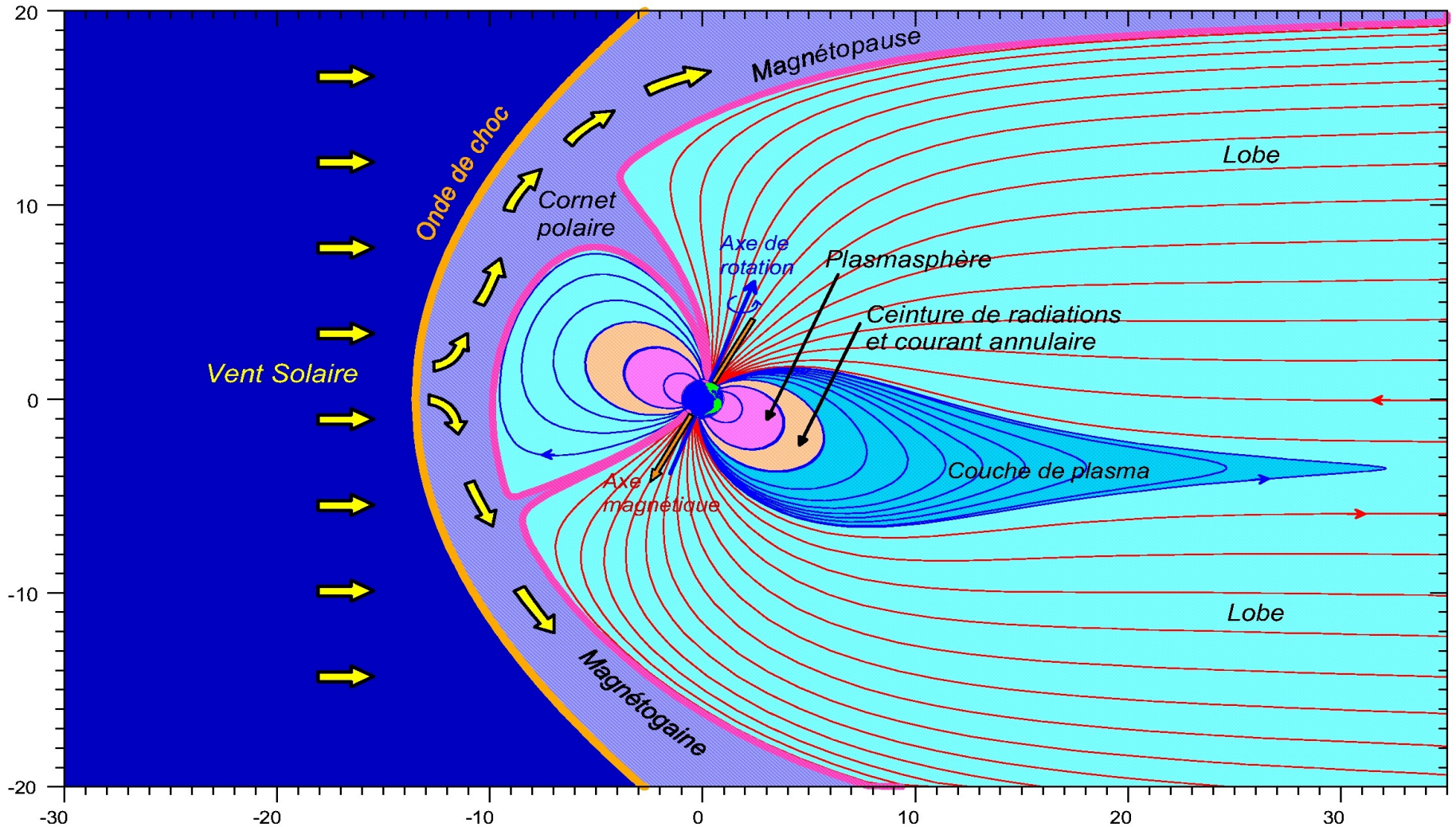
L'interface entre le vent solaire et l'ionosphère est la magnétosphère.

Champ magnétique terrestre avec le vent solaire.

Visualisation des lignes de force du champ magnétique de la Terre

Modèle: Tsyganenko 87 version exshor ikp=4 (kp= 2+) Date/heure: 16 janvier 2001 02:00 Repère: GSM

P. Robert, CETP/CNRS, 1996



La magnétosphère de la Terre

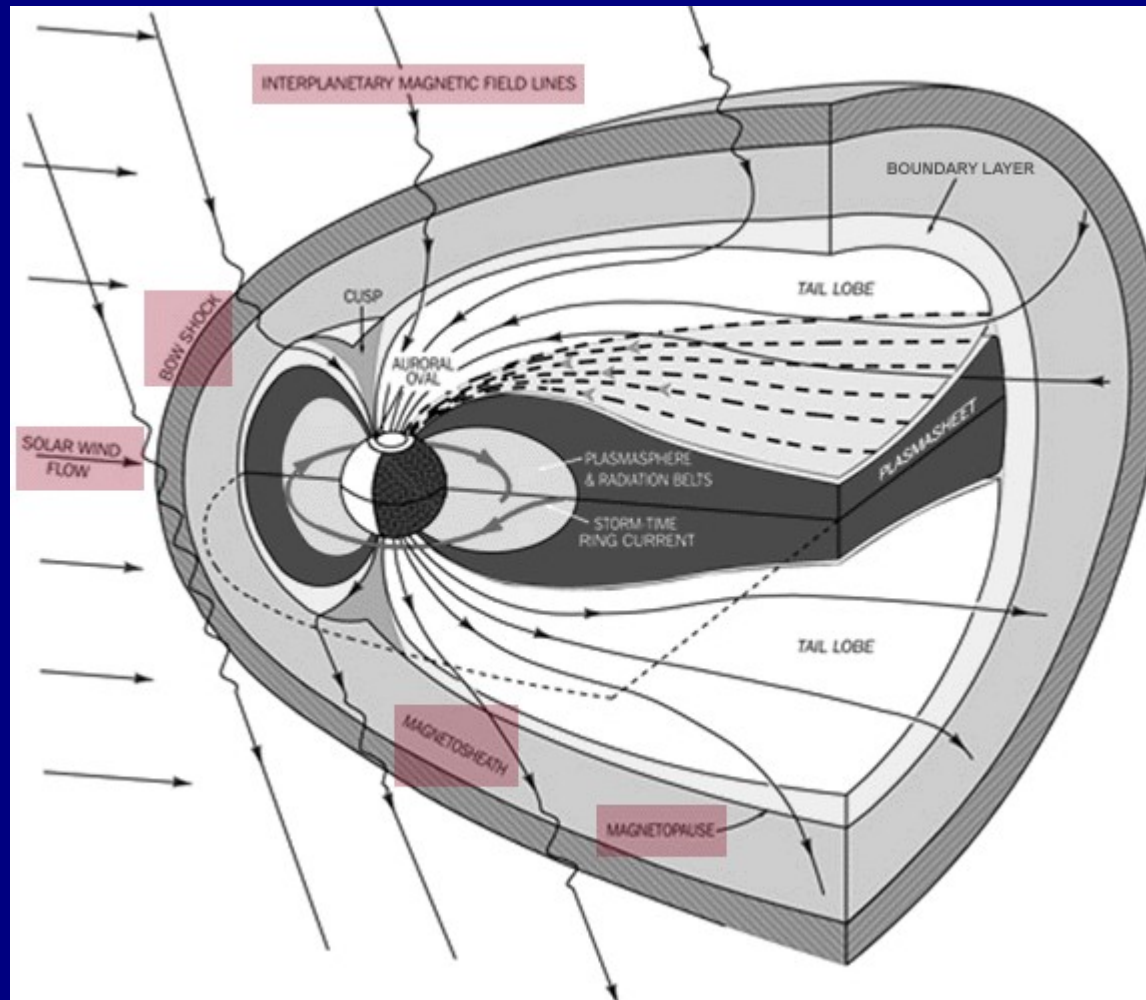


Illustration: ?

Le vent solaire est-il la cause *directe* des aurores ?
NON.

Le vent solaire qui entre dans la magnétosphère
ne se dirige pas vers la Terre.

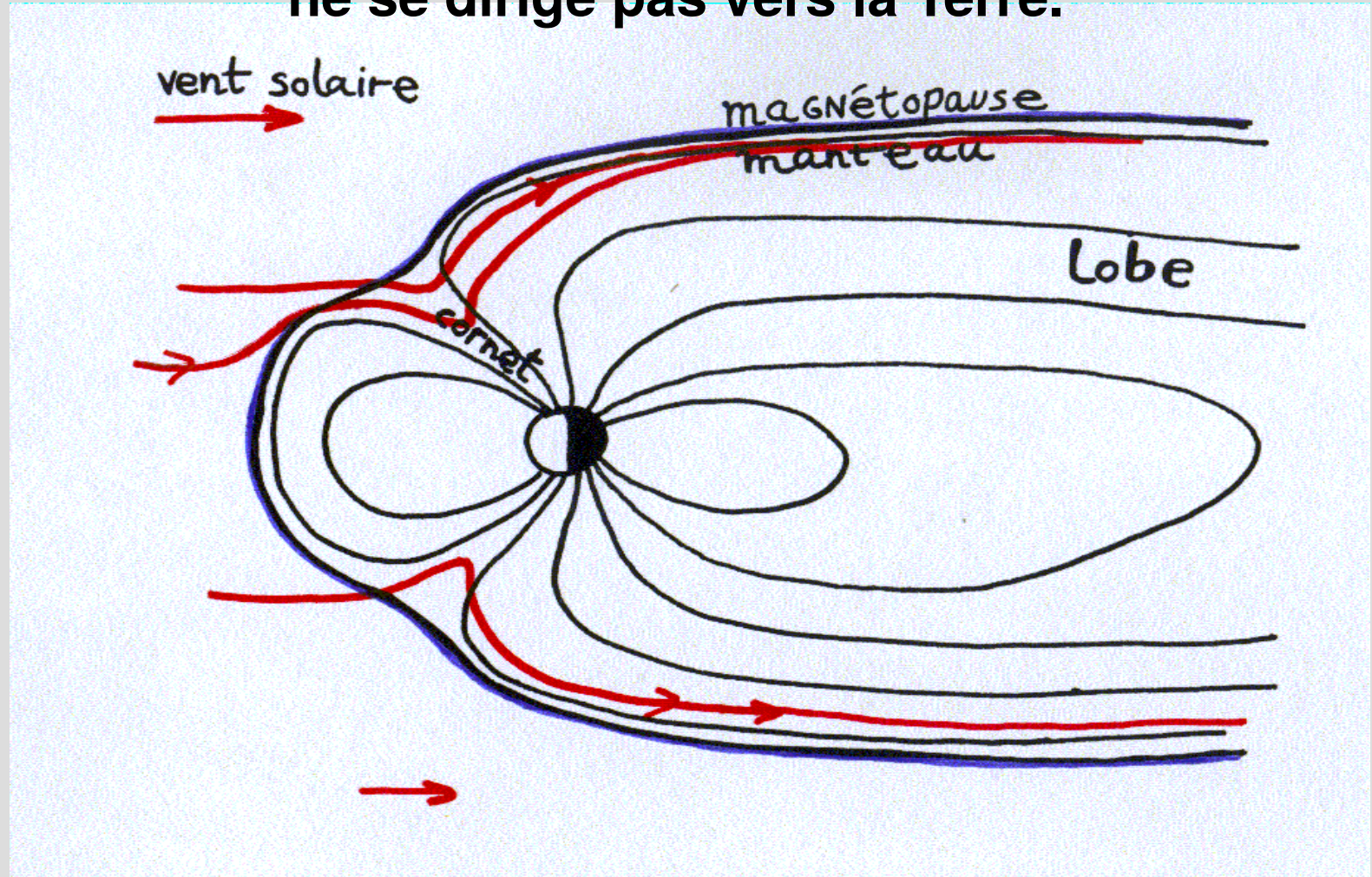
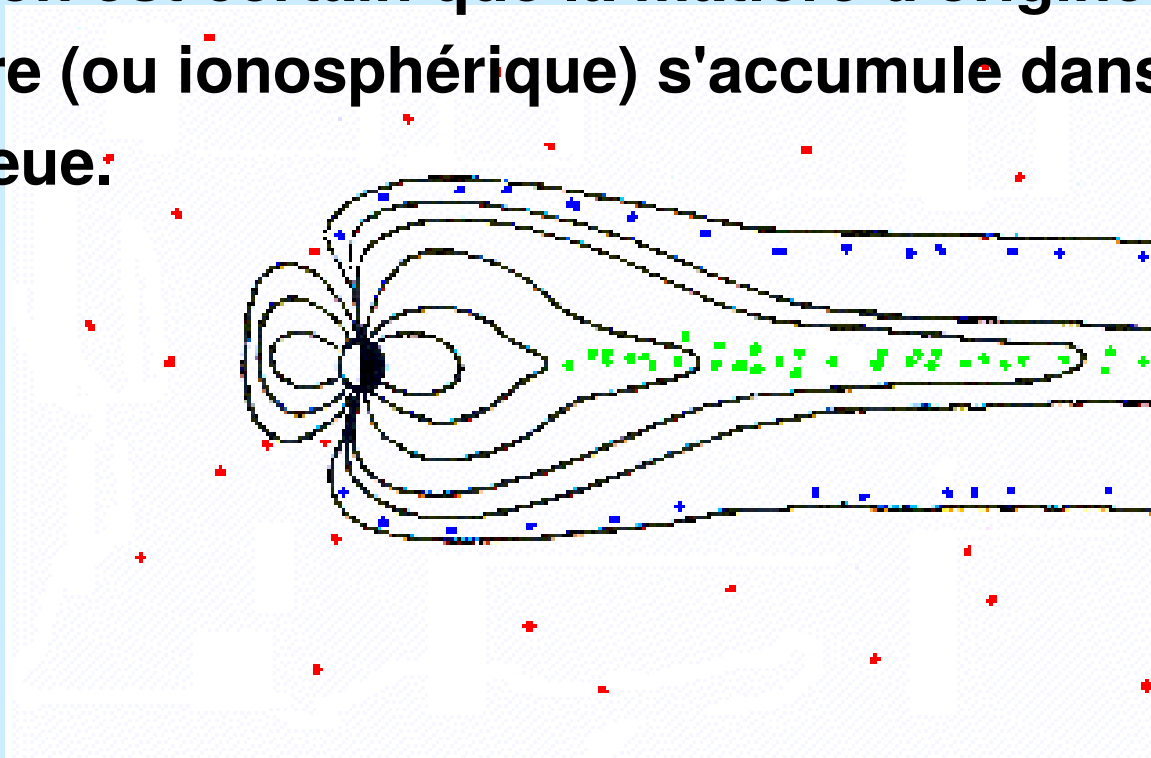


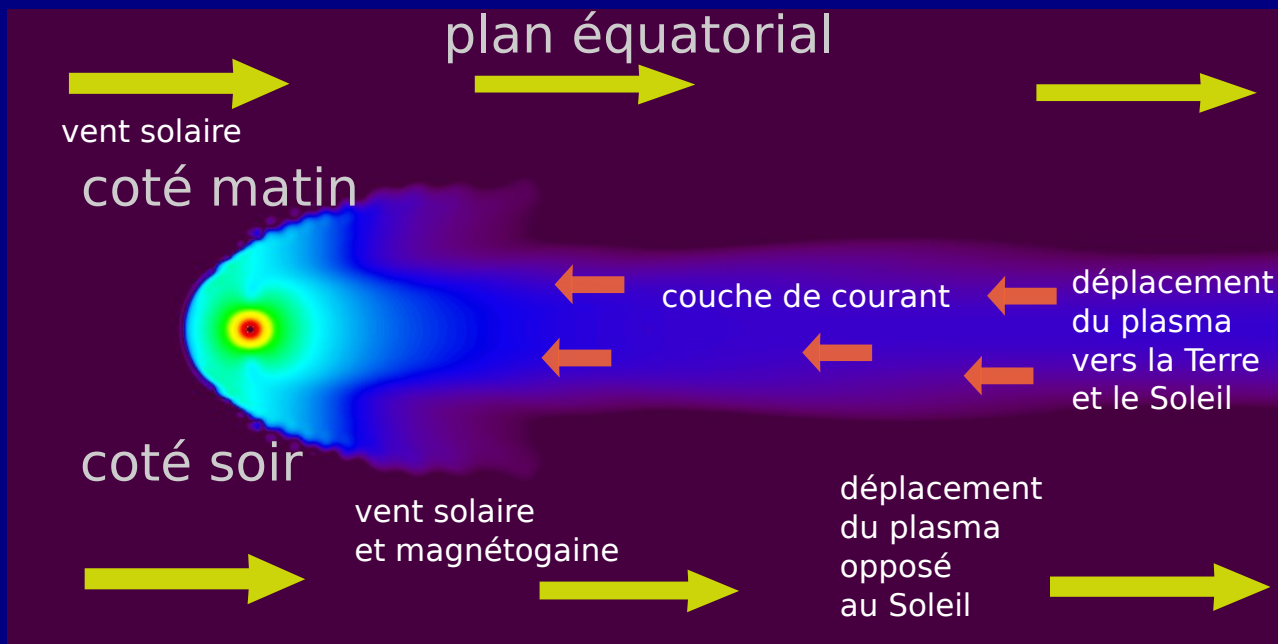
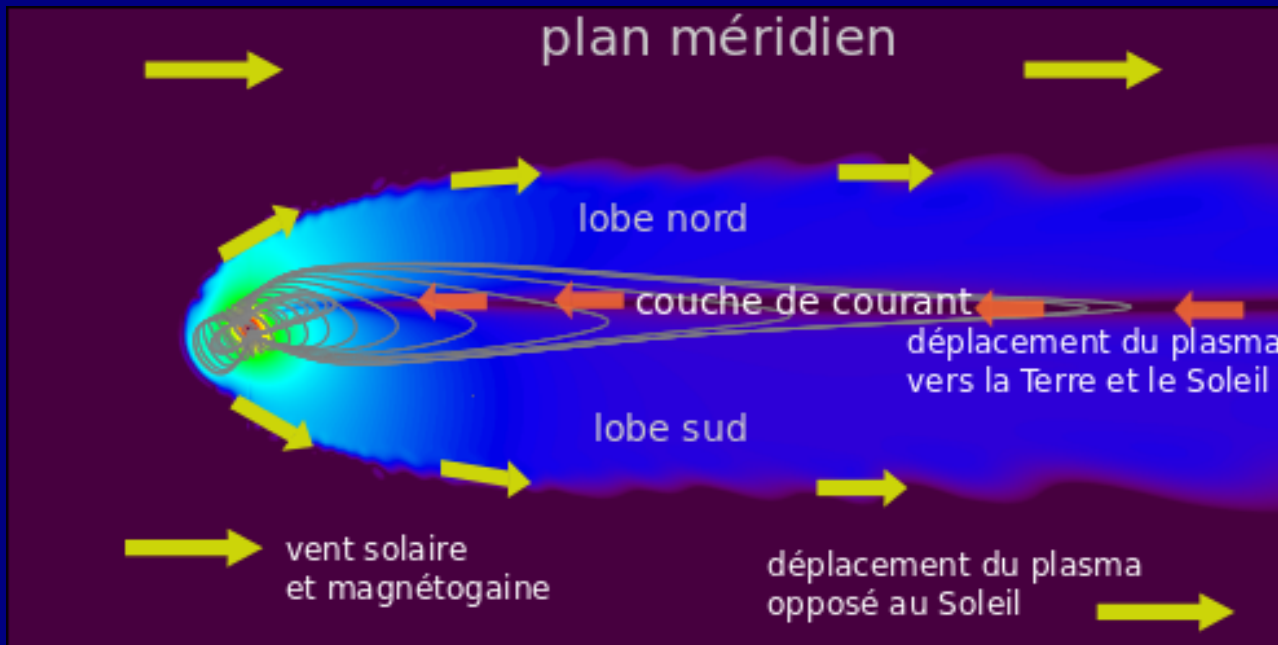
Illustration: Fabrice Mottez (CETP)

La convection magnétosphérique :

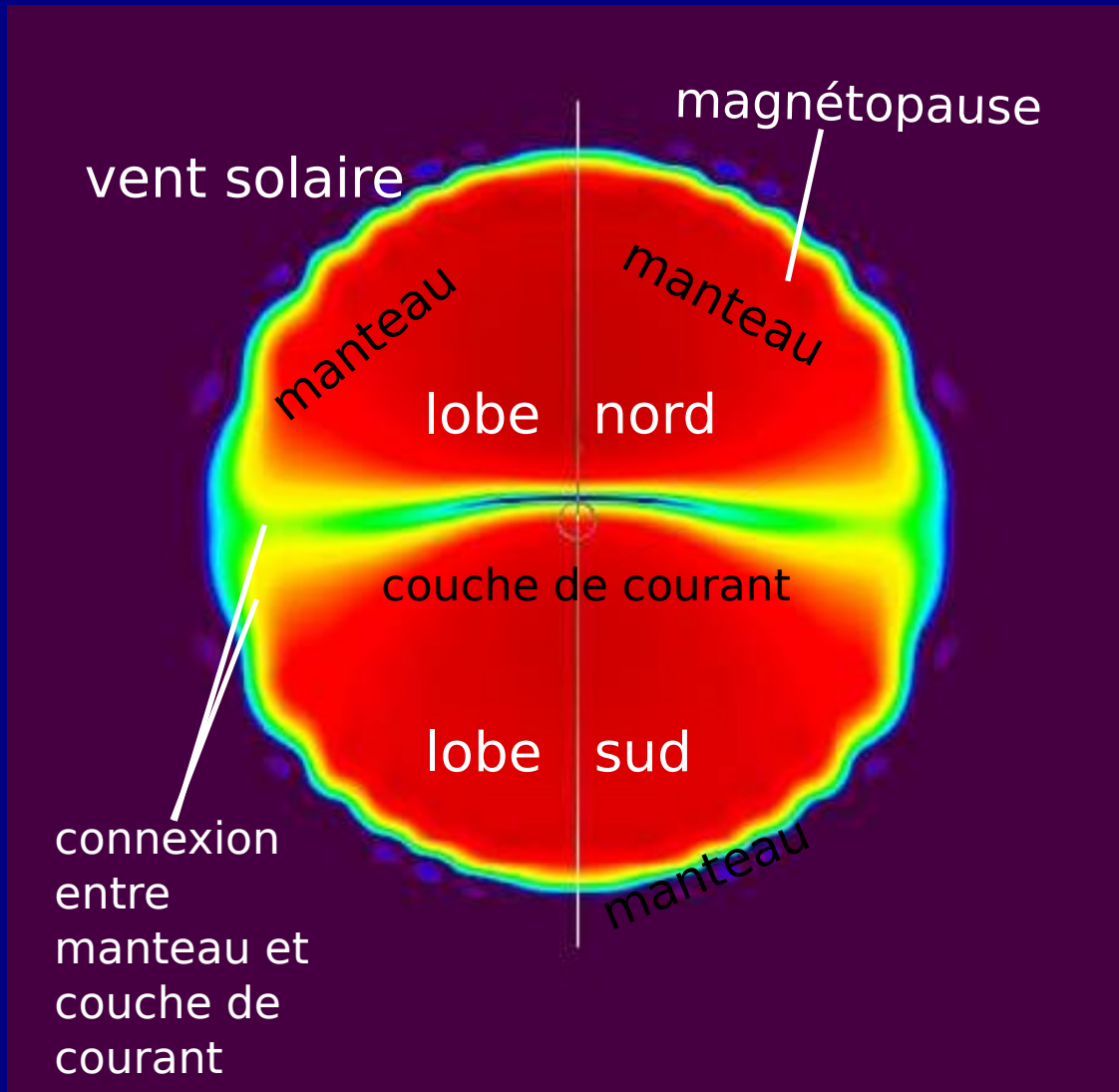
On ne sait pas si la convection se produit de manière continue (sujet polémique).

Mais on est certain que la matière d'origine solaire (ou ionosphérique) s'accumule dans la queue:



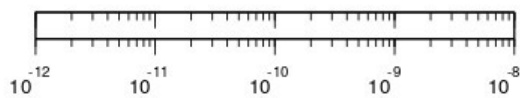
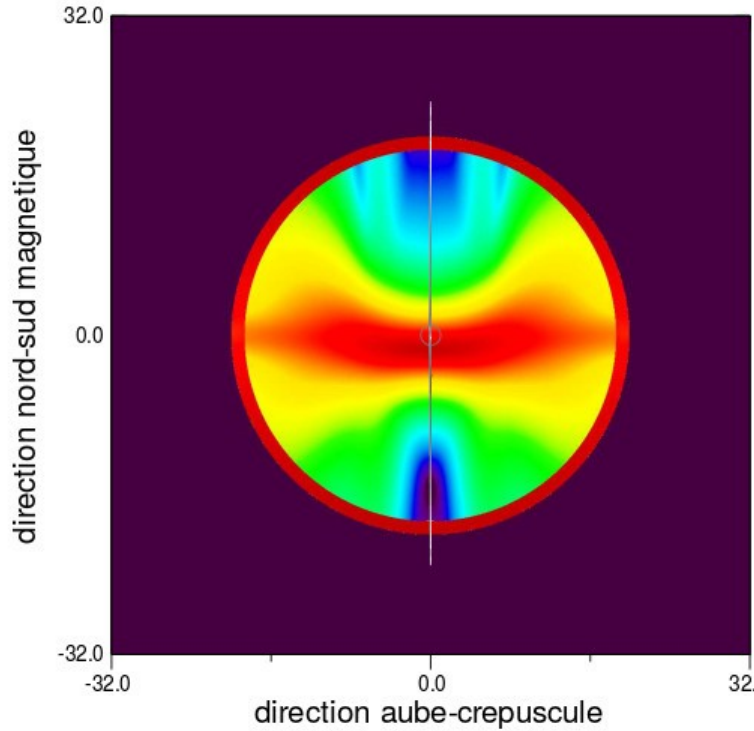


Coupe dans le plan transverse à la direction du Soleil,
Loin (plus de 10 rayons terrestres) coté nuit.

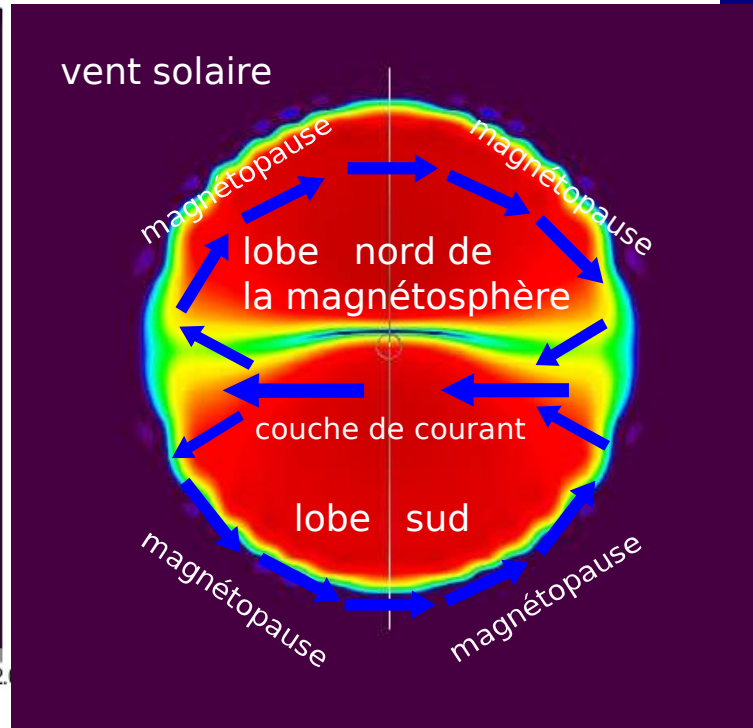


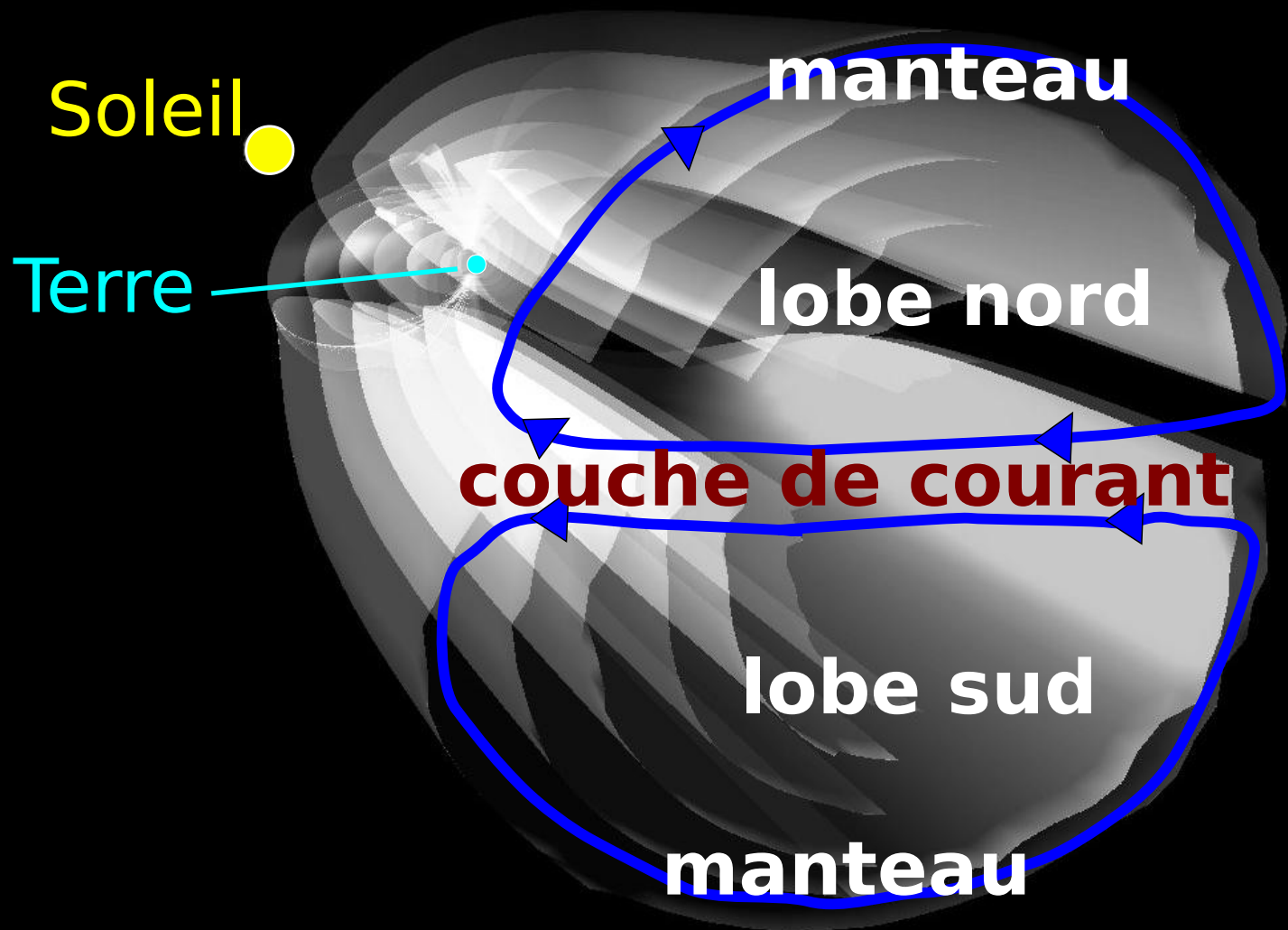
Circulation d'un courant électrique le long de la frontière Et dans la couche de courant.

Module de la densité de courant électrique



Module de B et direction de J

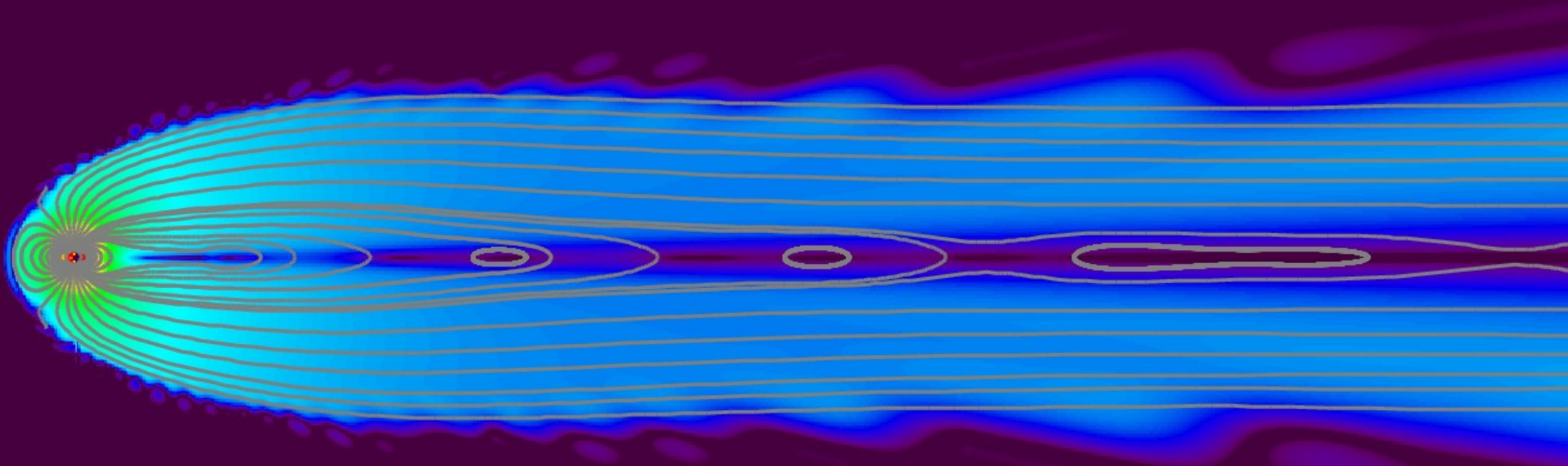




Instabilité de vecteur d'onde
le long de l'axe Terre-Soleil

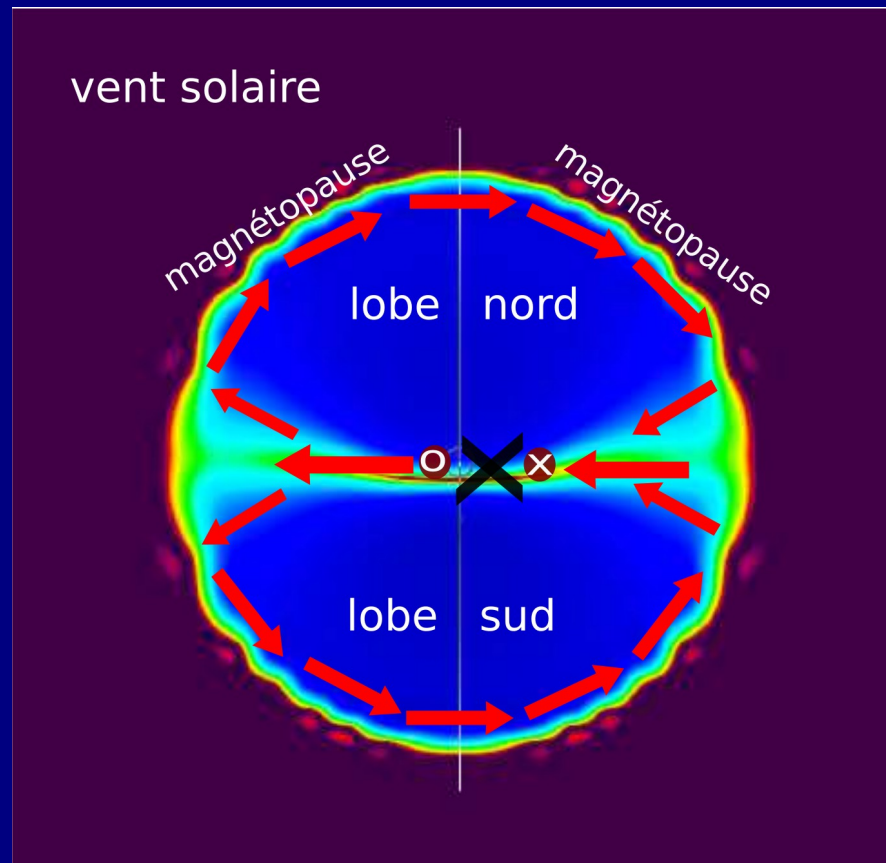
Instabilité de déchirement / tearing mode instability.

Formation d'îlots magnétiques séparés par des zones de
reconnexion magnétique.



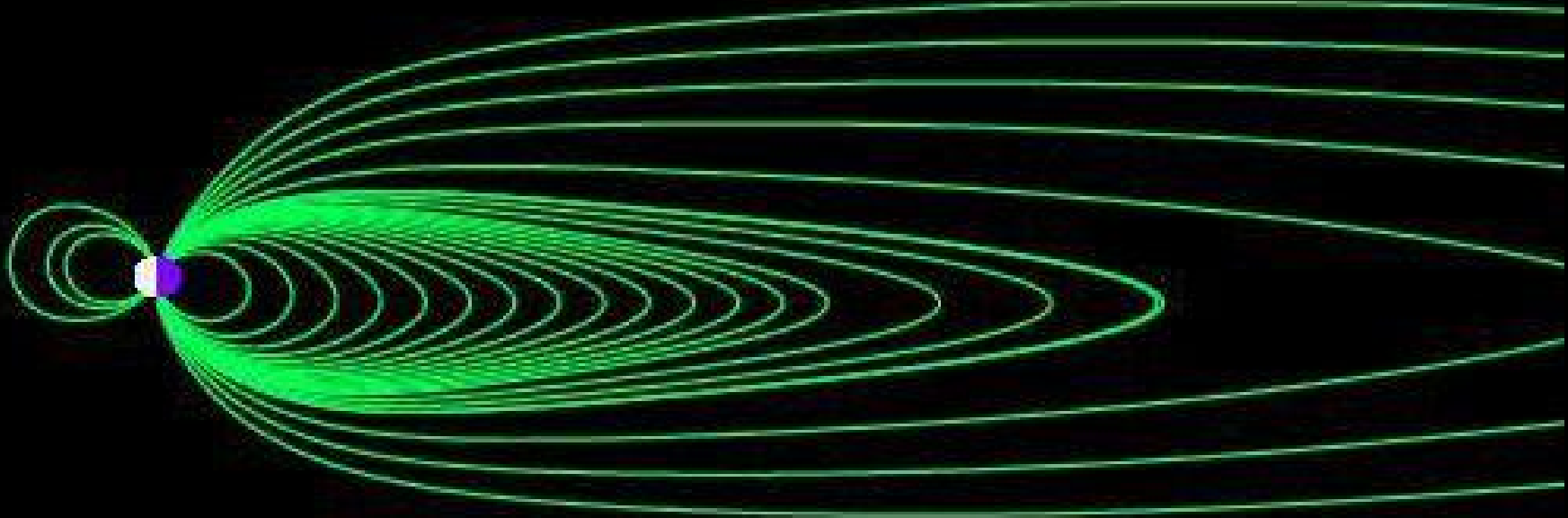
Instabilité de vecteur d'onde dans la direction est-ouest.
Interruption du courant « dawn to dusk » dans la couche de courant.

Par exemple instabilité de ballonnement (balloning instability).
Le courant qui structure le coté nuit de la magnétosphère doit trouver un autre chemin.



Les «cycles» de la magnétosphère (I)

AU COMMENCEMENT ...



champ magnétique de type dipolaire

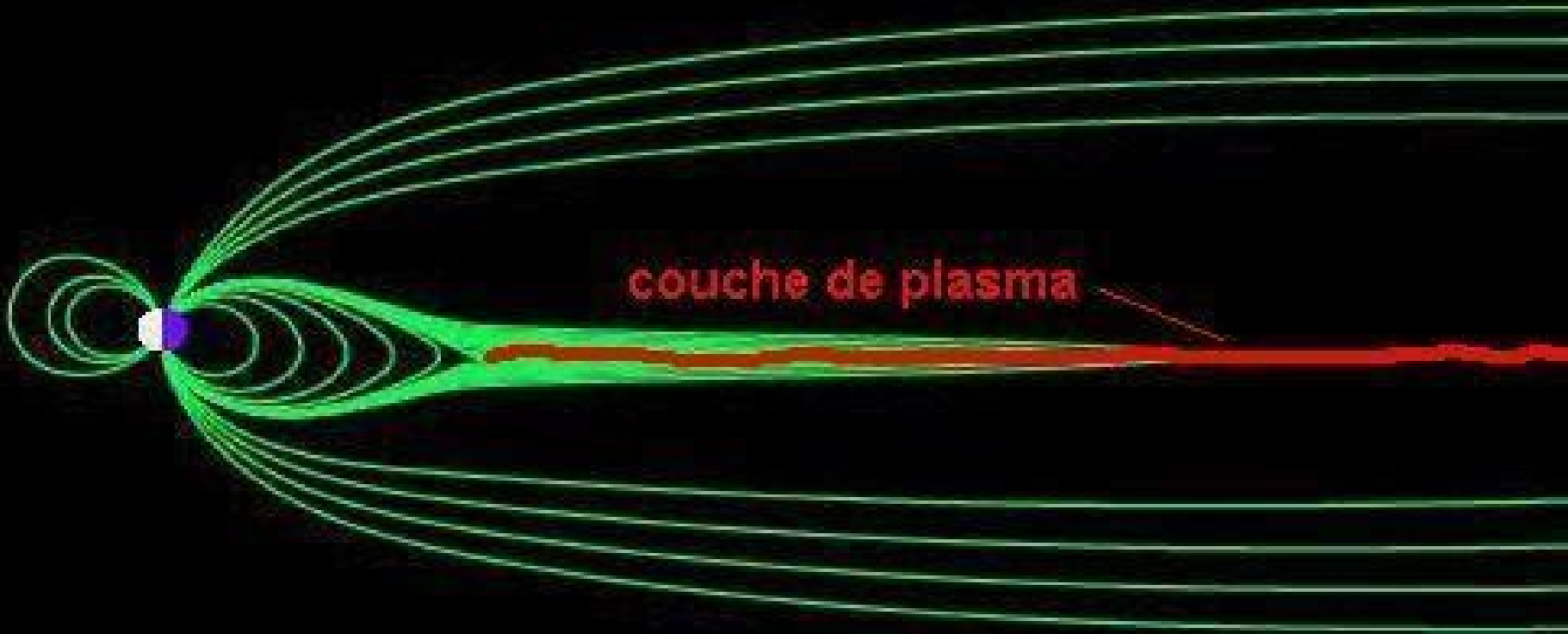
Les «cycles» de la magnétosphère (II)

PHASE DE CROISSANCE



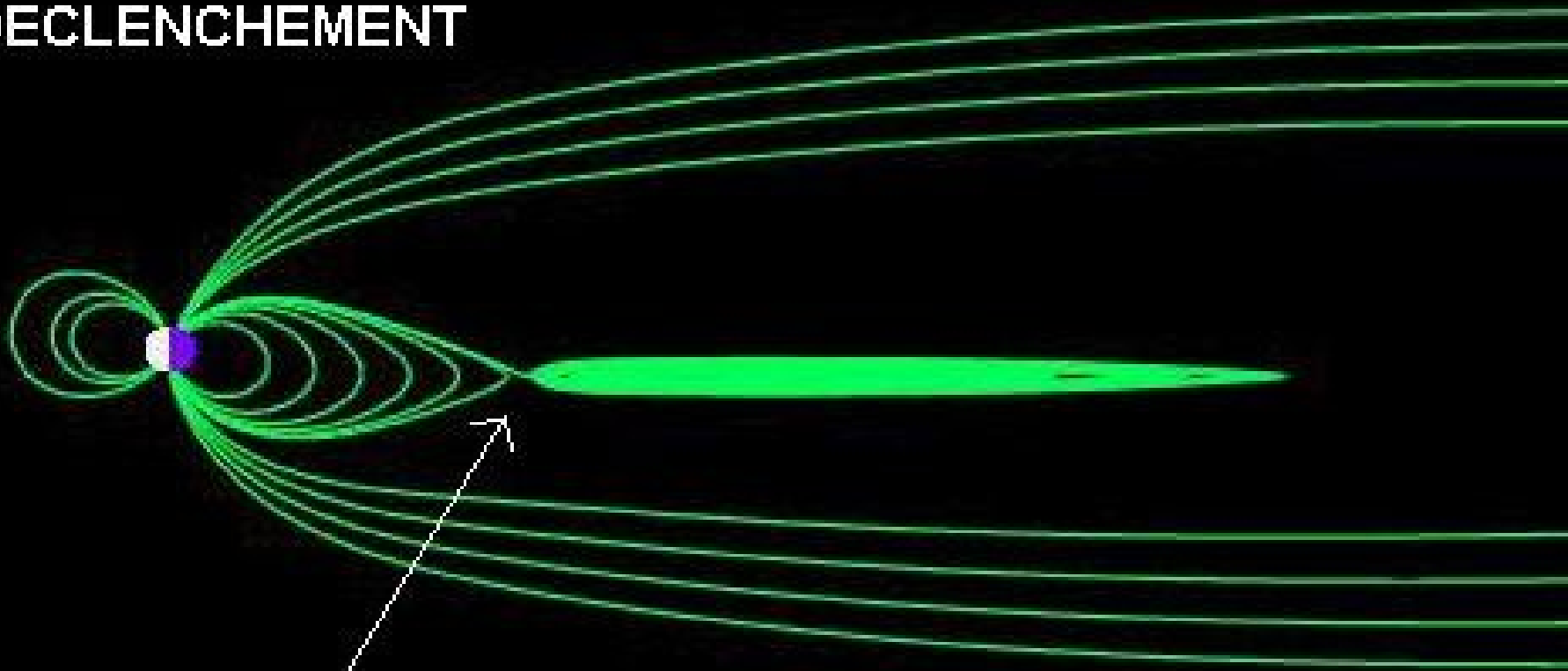
champ magnétique de type queue

Les «cycles» de la magnétosphère (II bis)



Les «cycles» de la magnétosphère (III)

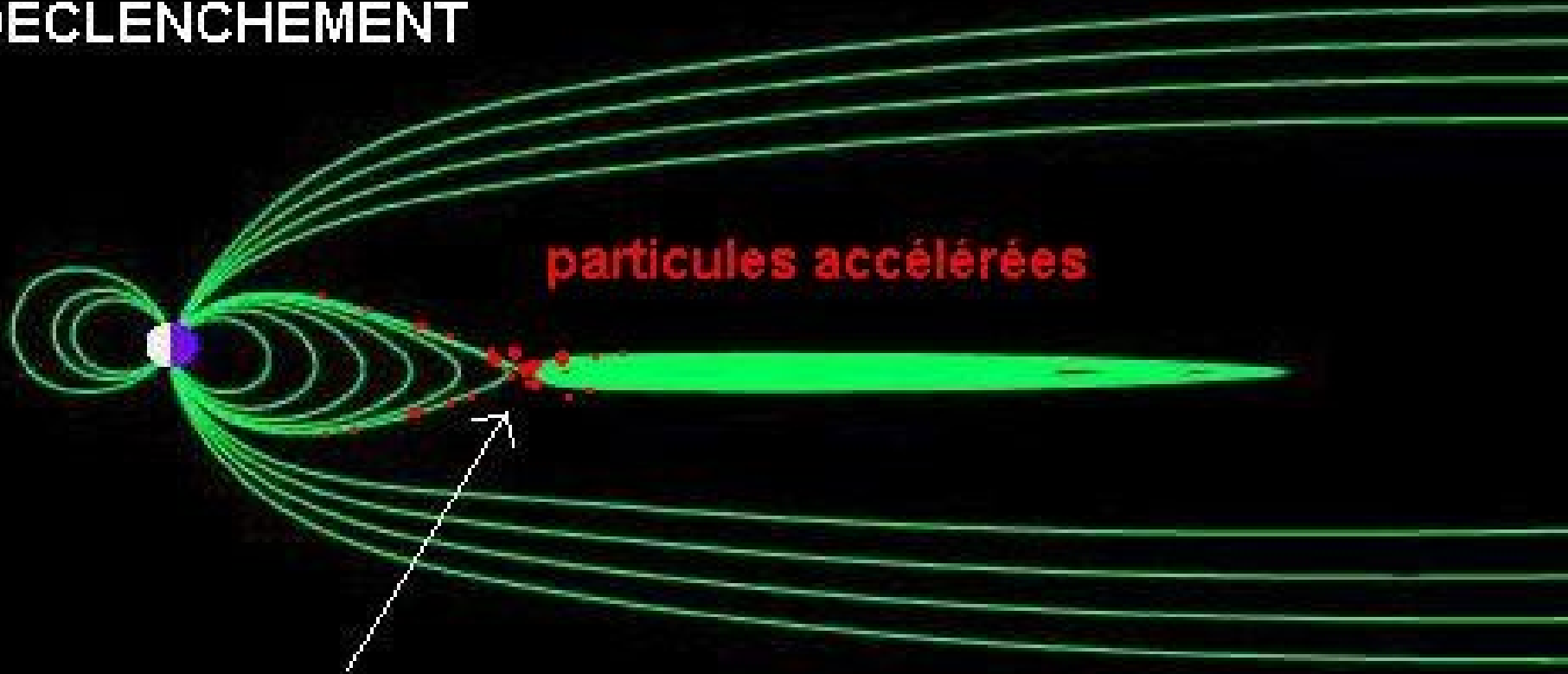
DECLENCHEMENT



interruption de courant

Les «cycles» de la magnétosphère (III bis)

DECLENCHEMENT

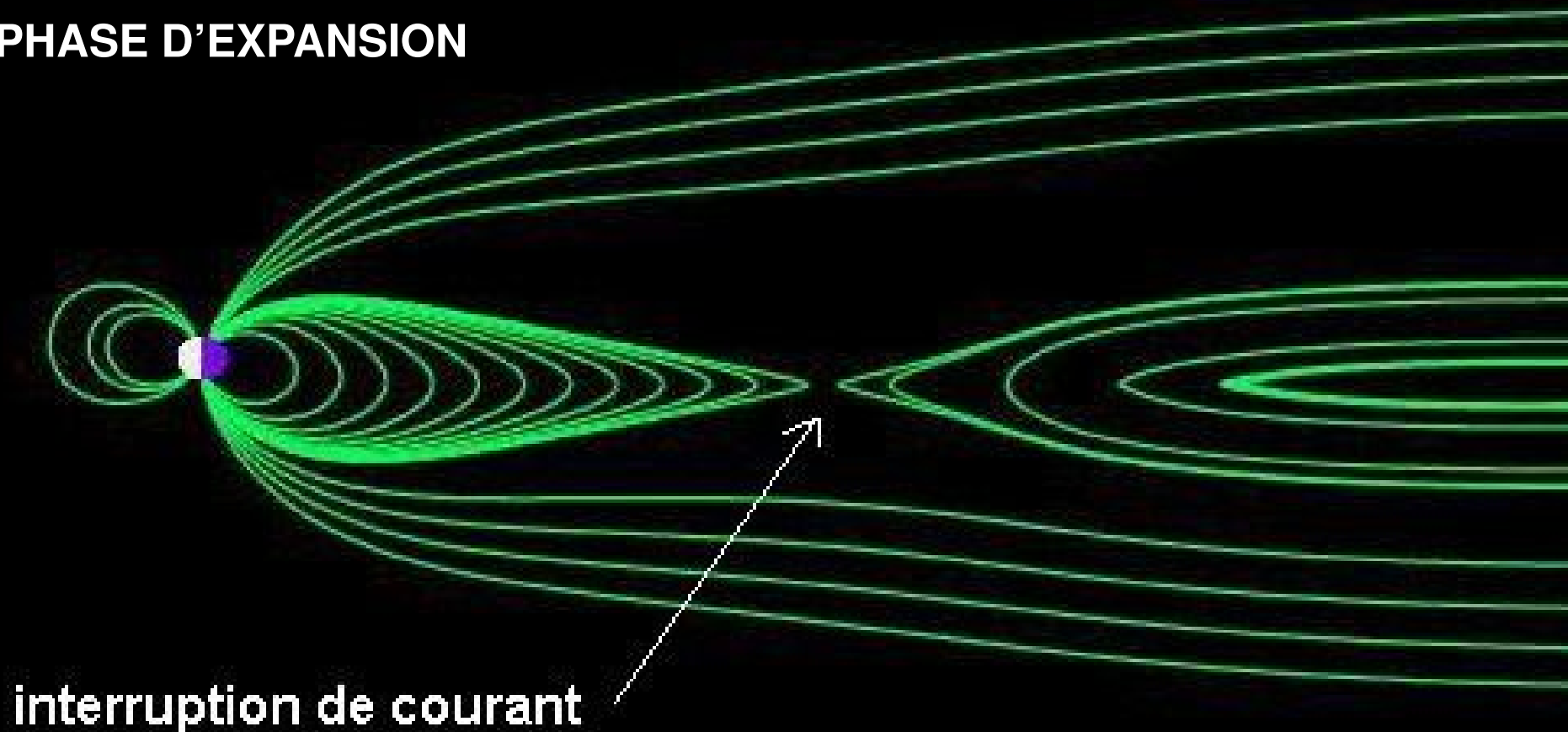


particules accélérées

interruption de courant = région d'accélération

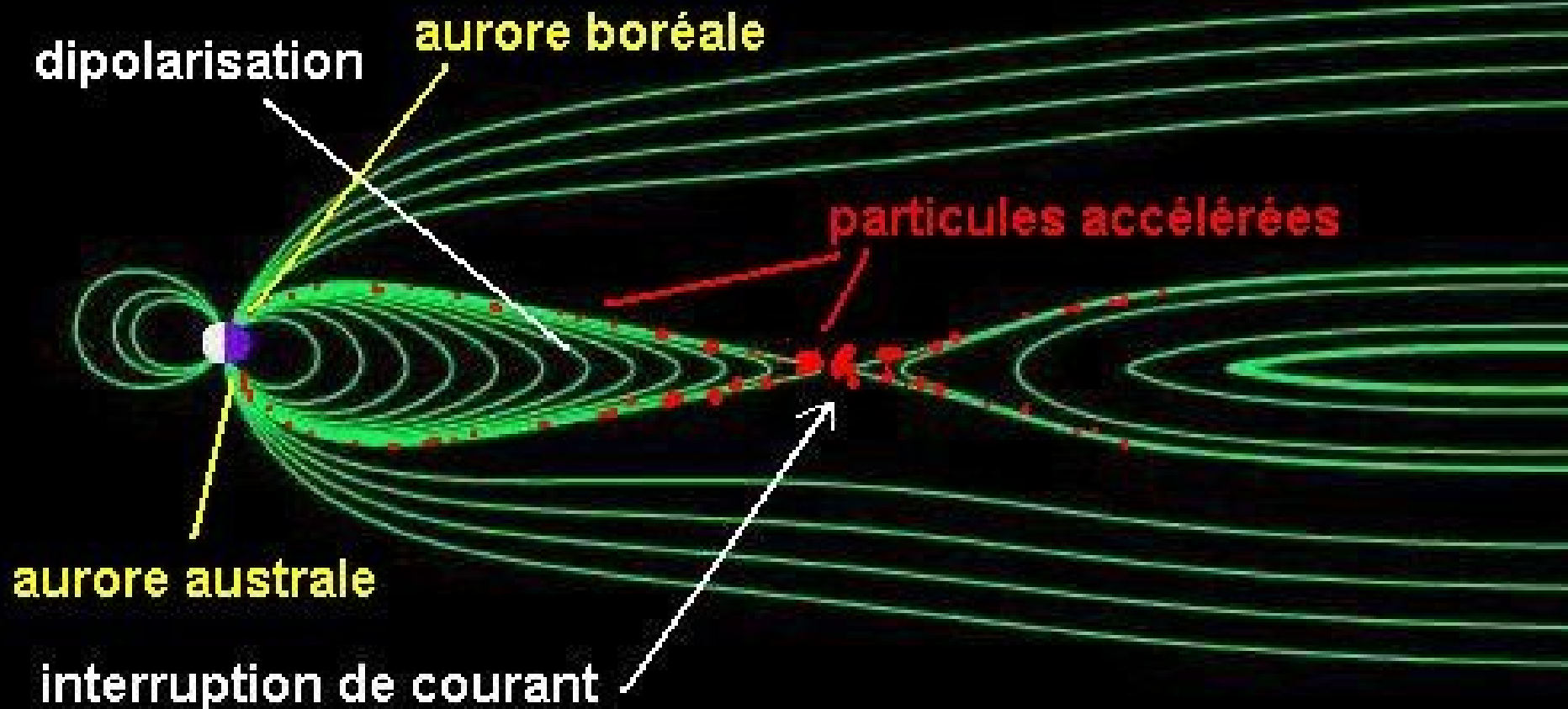
Les «cycles» de la magnétosphère (IV)

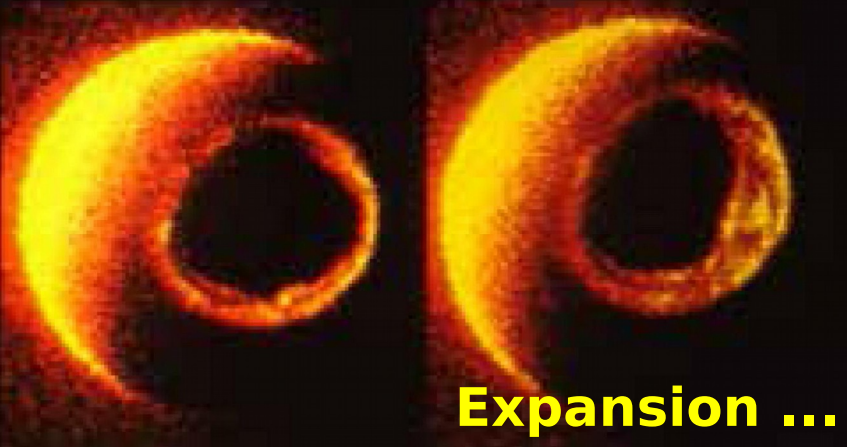
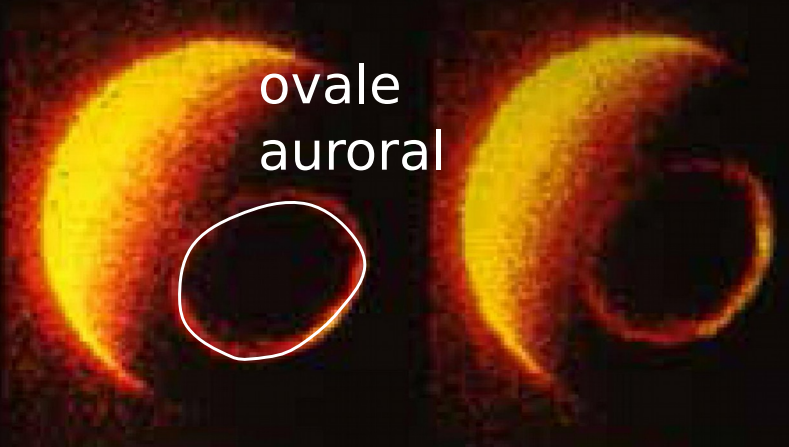
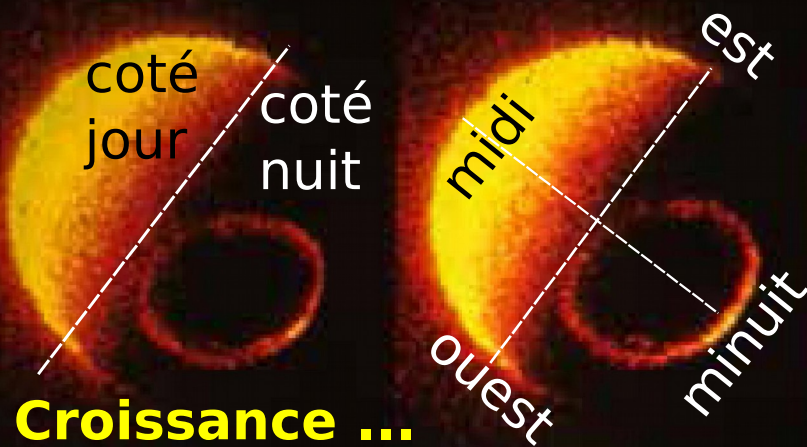
PHASE D'EXPANSION



Les «cycles» de la magnétosphère (IV bis)

PHASE D'EXPANSION





Que se passe-t-il lors des tempêtes du vent solaire ?

Comme tous les vents, le vent solaire connaît des tempêtes.

Lorsqu'une telle tempête atteint la Terre, le champ magnétique en subit l'influence. La magnétosphère est comprimée et met 3 jours pour reprendre sa forme initiale. Un tel événement s'appelle un **orage magnétique**.

Lors des orages magnétiques, on observe de très belles aurores. (Par exemple celles du 13 mars 1989.)

Mais les **orages ne sont pas une condition nécessaire**, on voit aussi de belles aurores quand le vent solaire est calme.

D'autres magnétosphères

Les ingrédients :

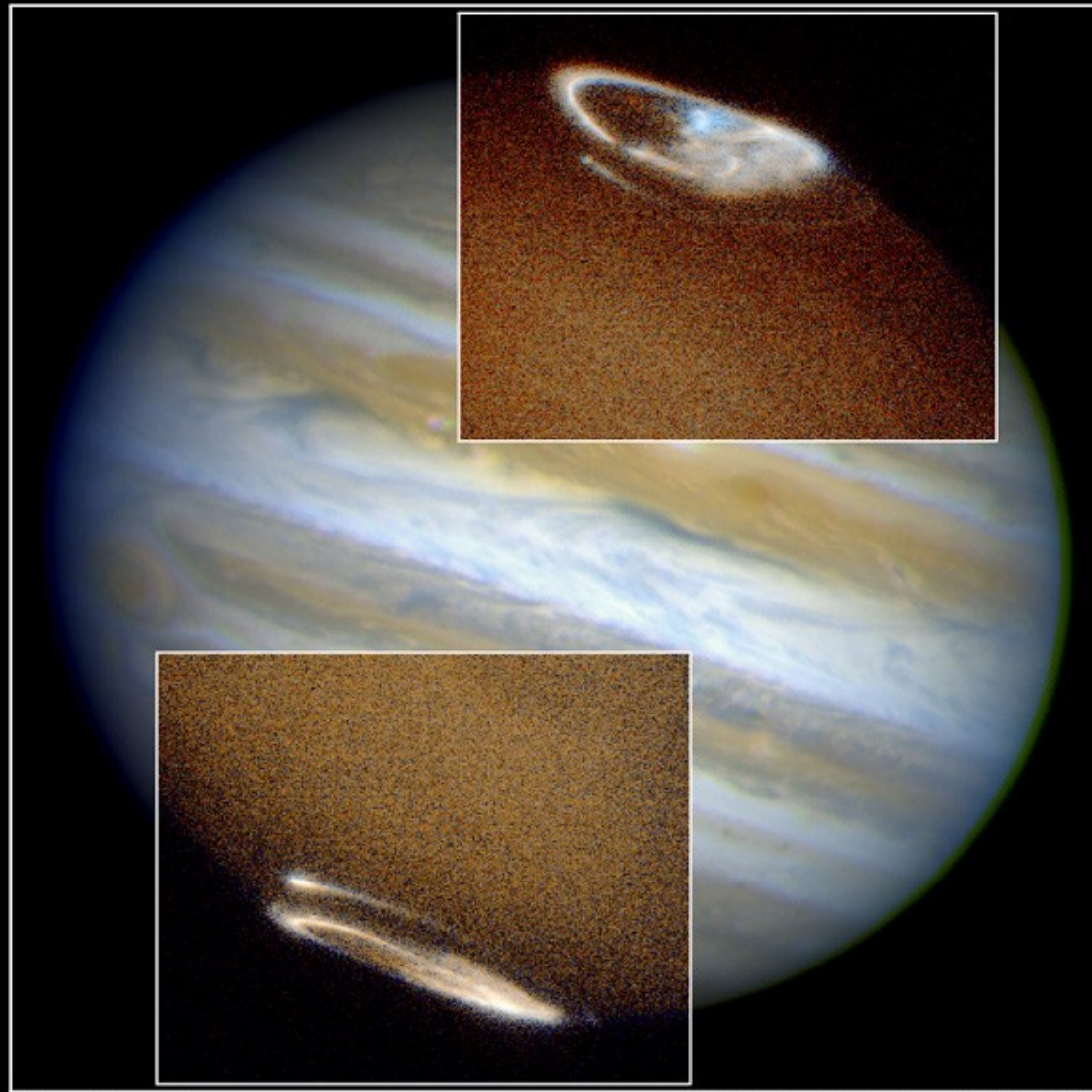
Une planète ayant un champ magnétique intrinsèque.

Un vent solaire/stellaire baignant ces planètes.

Une ionosphère.

Terre, Mercure, Jupiter, Saturne, Neptune et Uranus,
certains satellites de Jupiter.

D'autres magnétosphères



Jupiter Aurora

HST • STIS • WFPC2

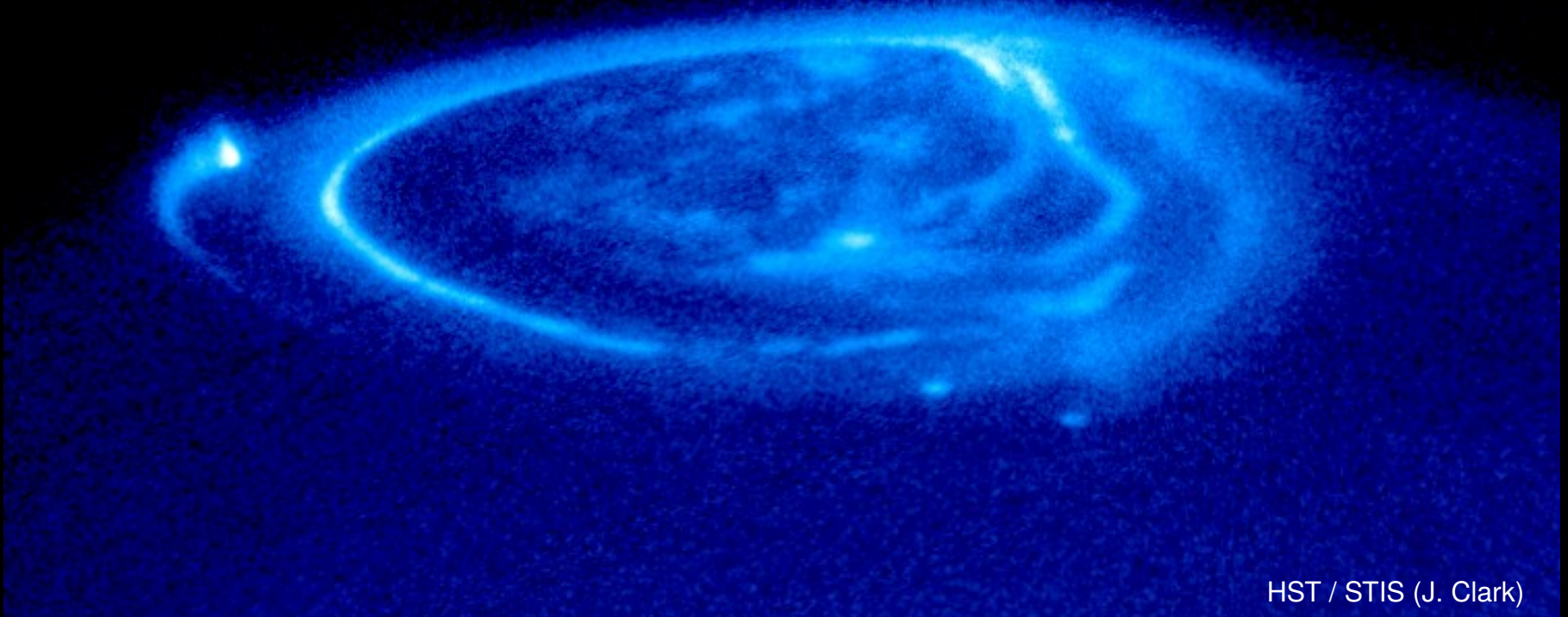
PRC98-04 • ST Sci OPO • January 7, 1998
J. Clarke (University of Michigan) and NASA

Les ingrédients :

Une planète ayant un champ magnétique.

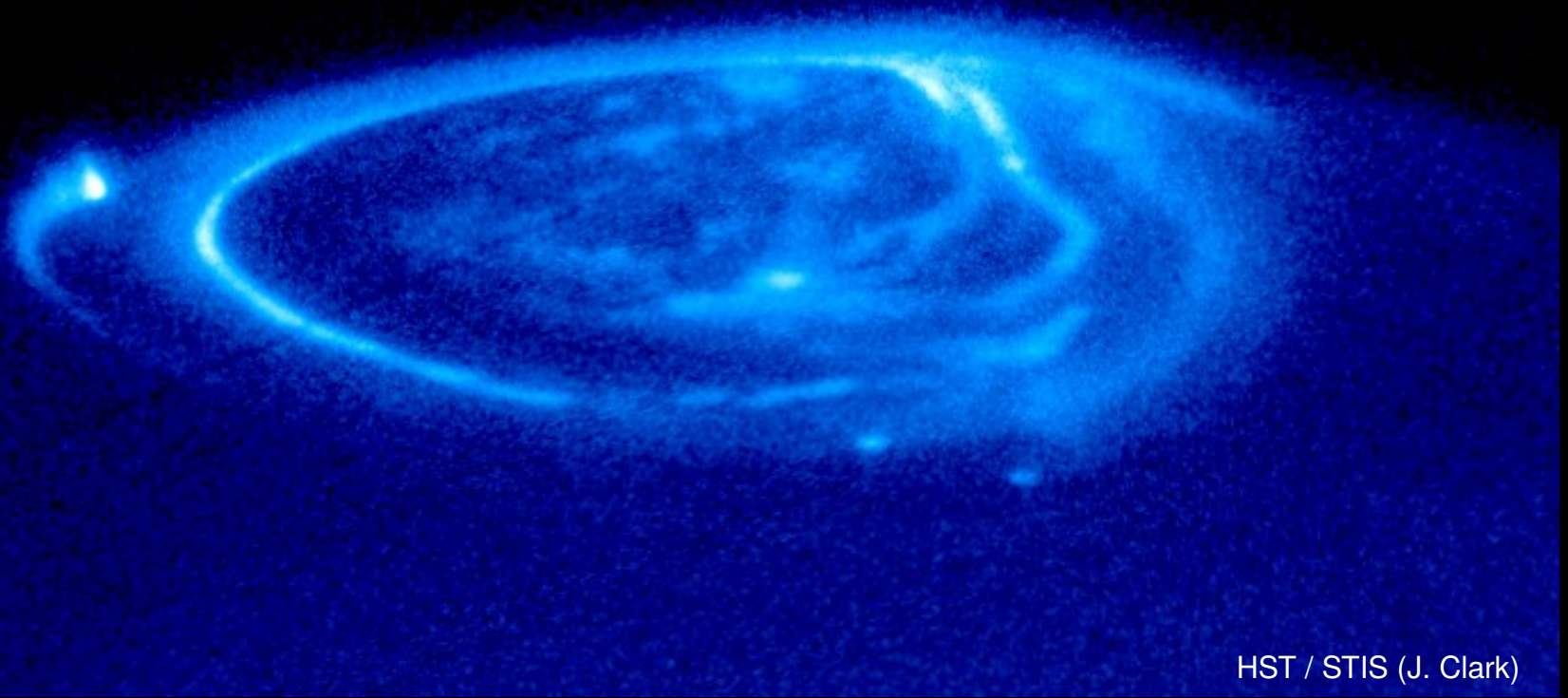
Un vent solaire/stellaire baignant ces planètes.

Une ionosphère.



Aurores sur Jupiter

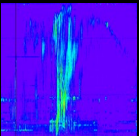
Les aurores sur les autres planètes
s'accompagnent aussi de modifications
du champ magnétique et
d'émissions radioélectriques



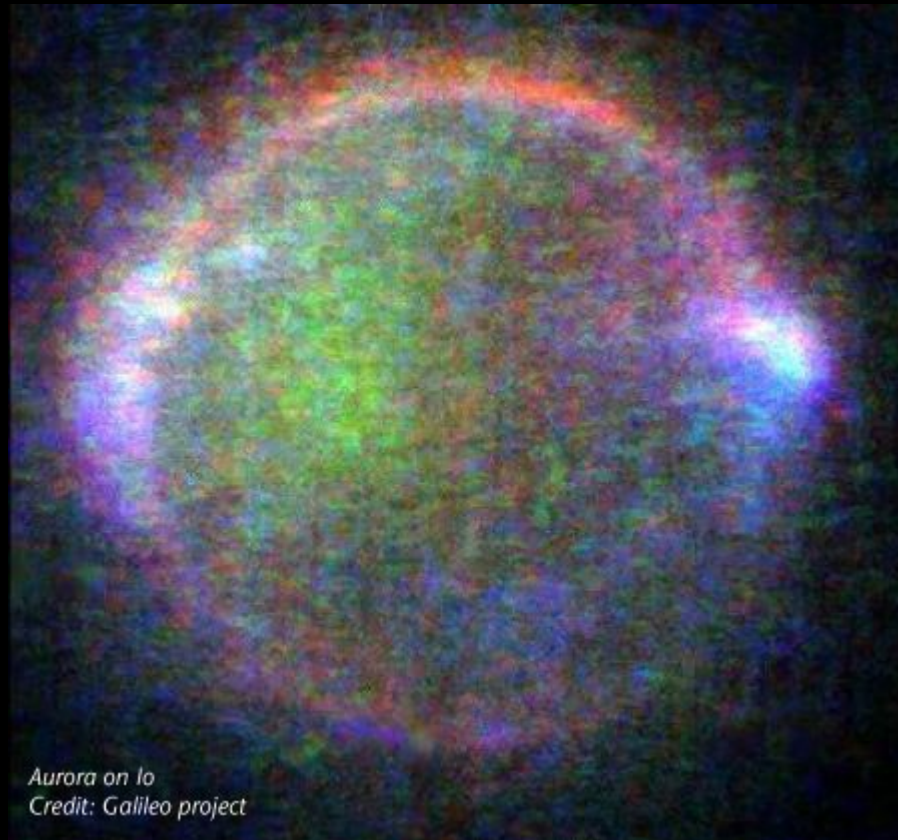
HST / STIS (J. Clark)

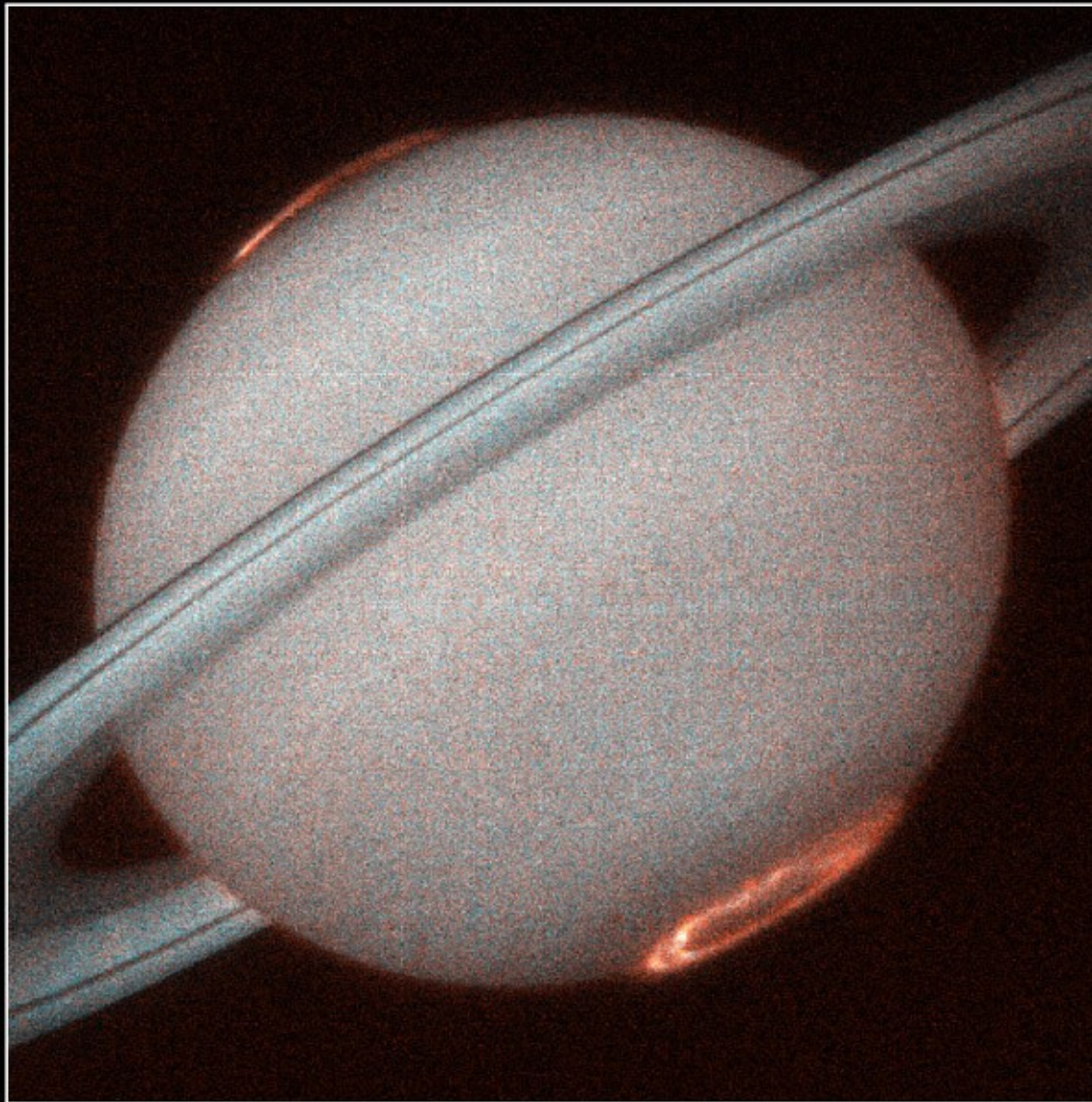
Emissions décimétriques (10-40 Mhz) de la magnétosphère de Jupiter
enregistrées pendant 1 heure à Nancay.

[P. Zarka, LESIA, Obs.Paris Meudon]



Une aurore sur le satellite Io de Jupiter

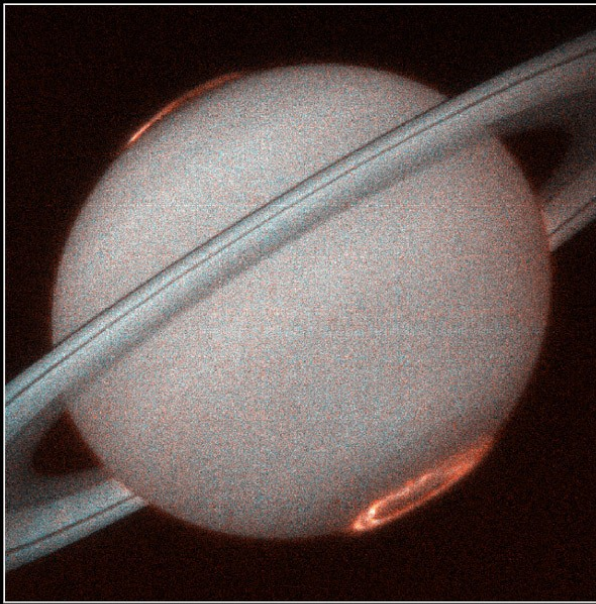




Saturn Aurora

HST • STIS

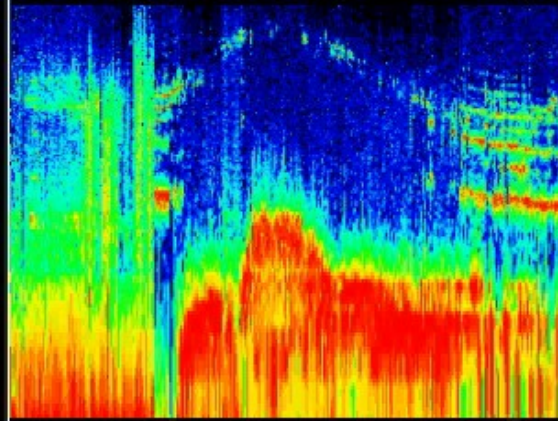
PRC98-05 • ST Sci OPO • January 7, 1998 • J. Trauger (JPL) and NASA



Saturn Aurora

PRC98-05 • ST ScI OPO • January 7, 1998 • J. Trauger (JPL) and NASA

HST • STIS

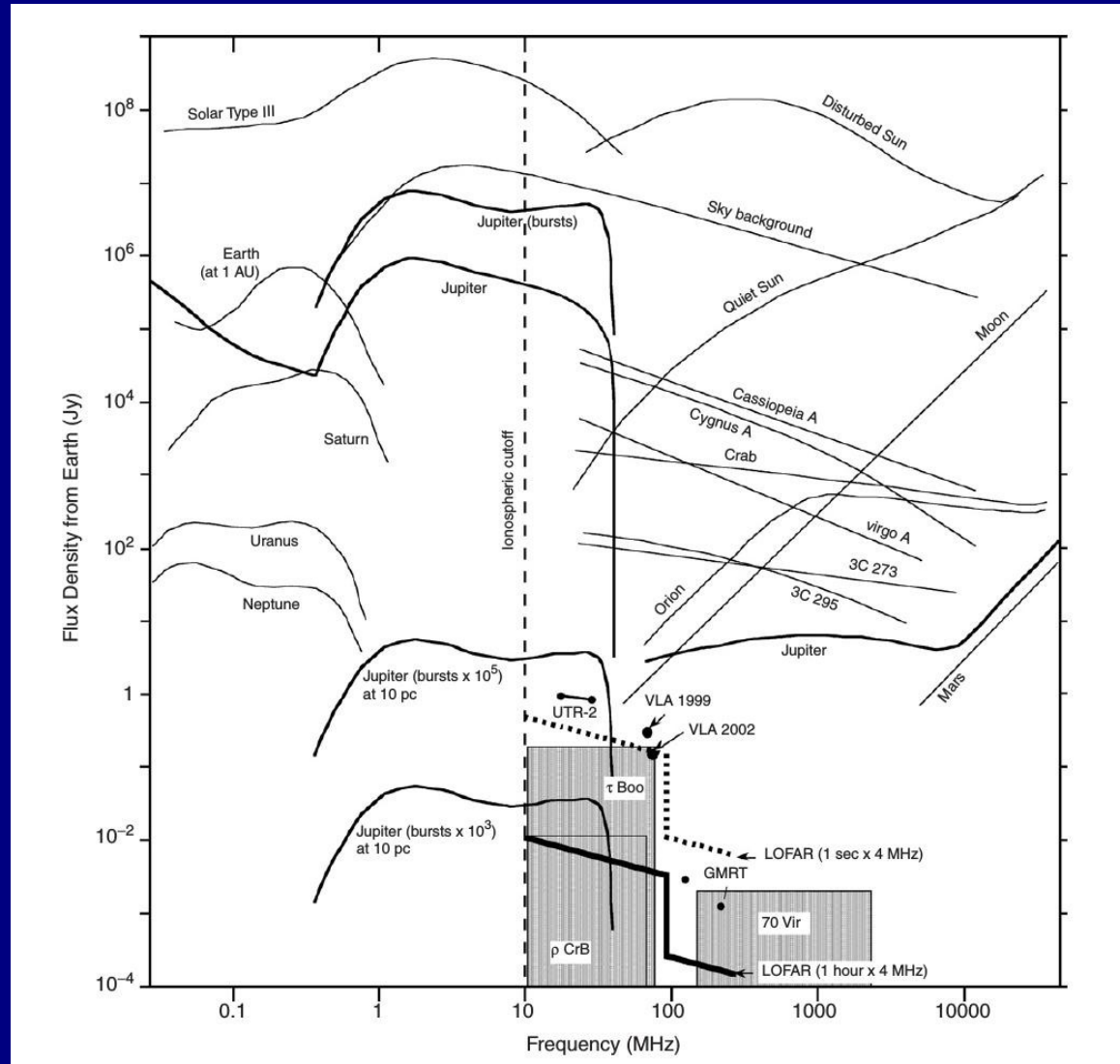


Emissions radio de la magnétosphère de Saturne
enregistrées in-situ par la sonde Galileo [Gurnett, U. Iowa]

Intensité de
Rayonnements
radio
d'origine
cosmique.

Derrière tout cela :
Des plasmas
chauds et dilués,
comme ceux de la
magnétosphère.

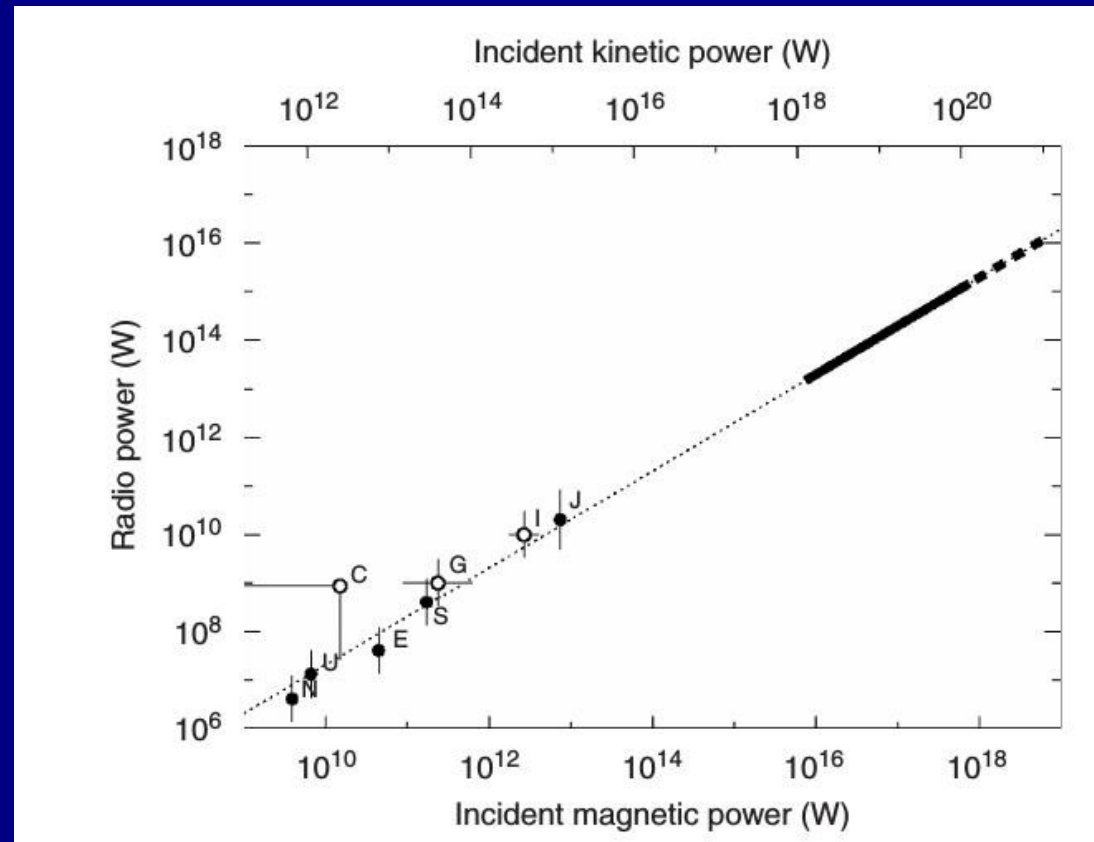
(Parfois avec des
particules très
relativistes.)



[Zarka 2007]

Exoplanètes

Celles qui sont très proches de leur étoile : jupiter chauds. Elles sont soumises à un vent a priori très fort. On peut envisager une magnétosphères très active... et pourquoi pas ? l'observer.

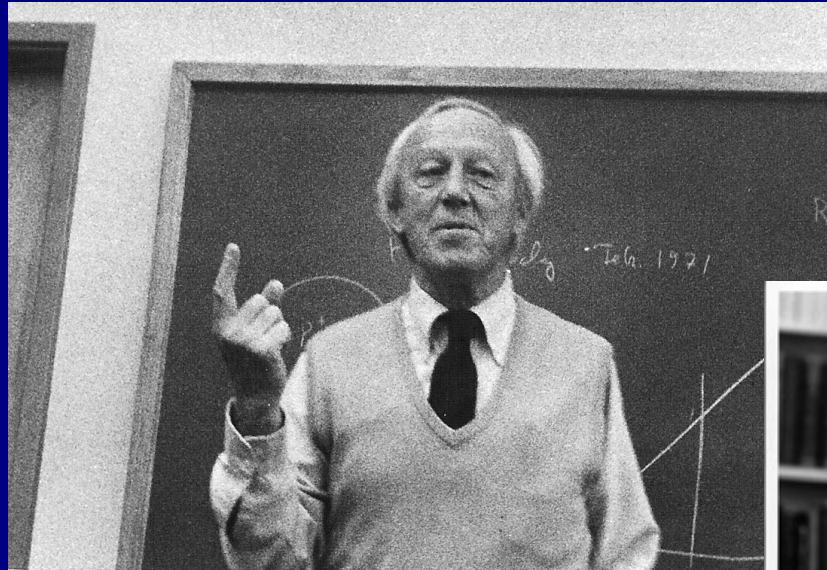


[Zarka 2007]

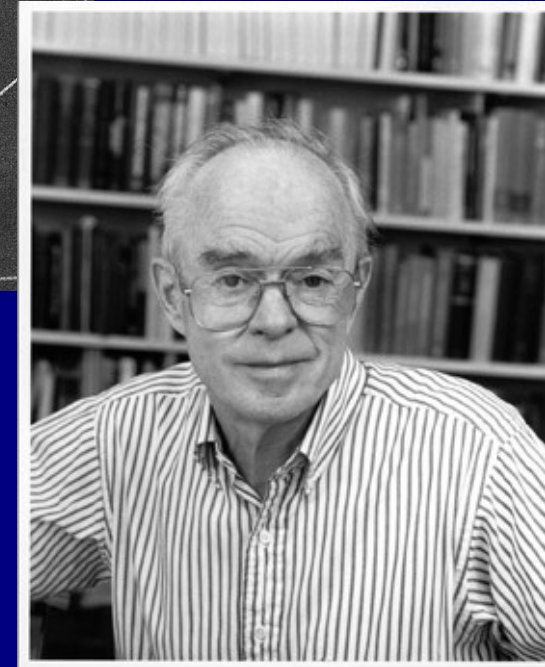
Quelques héros de la physique des plasmas (essentielle pour la physique spatiale)



Lev Davidovitch
Landau (Nobel 1962)



Hannes Alfvén
(Nobel 1970)



Eugene Parker

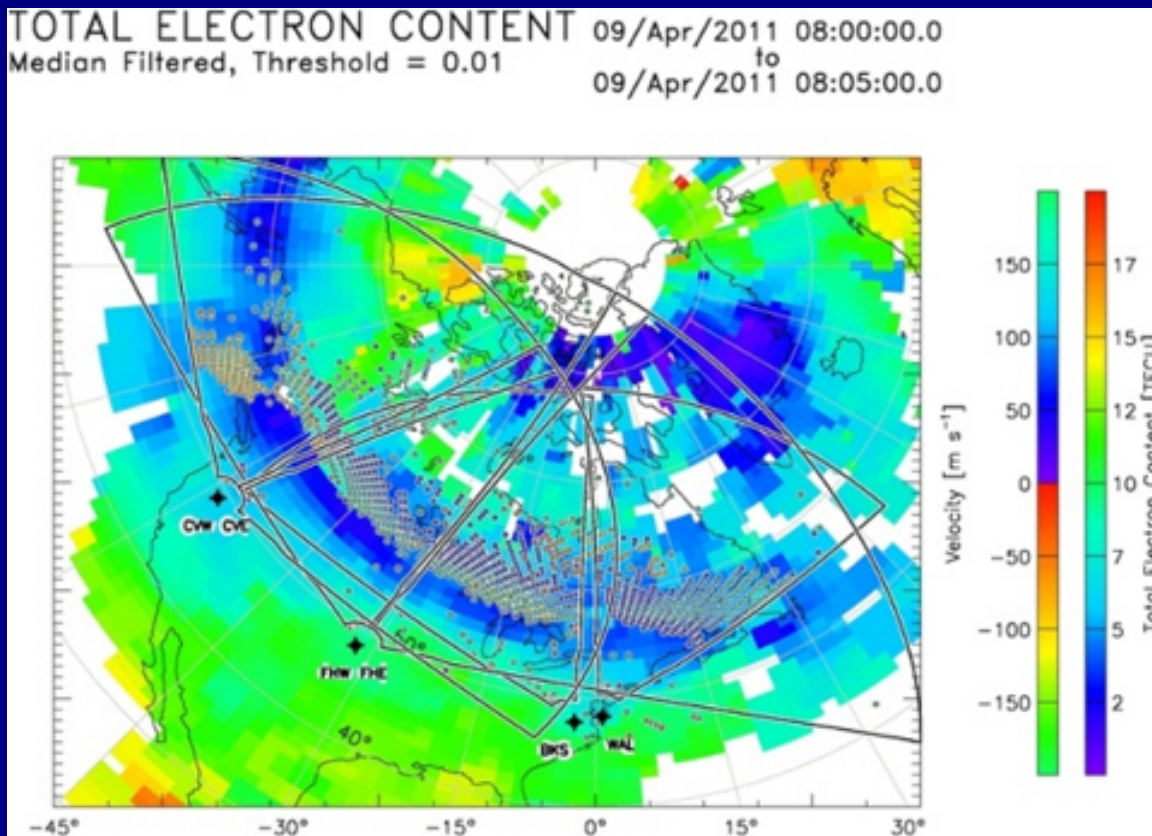
Objectif de ce cours

- Comprendre les différentes approches (sans-force, MHD, fluides, mouvement des particules) pour les plasmas des environnements planétaires.
- Admettre qu'il n'existe pas un modèle complet cohérent, y compris avec les simulations numériques.
- Donc « faire de la physique », des approximations, et en connaître les limites...
- Une approche des données spatiales. Faire le lien avec les modèles pour comprendre ce qui est mesuré.

Perspectives pour la recherche

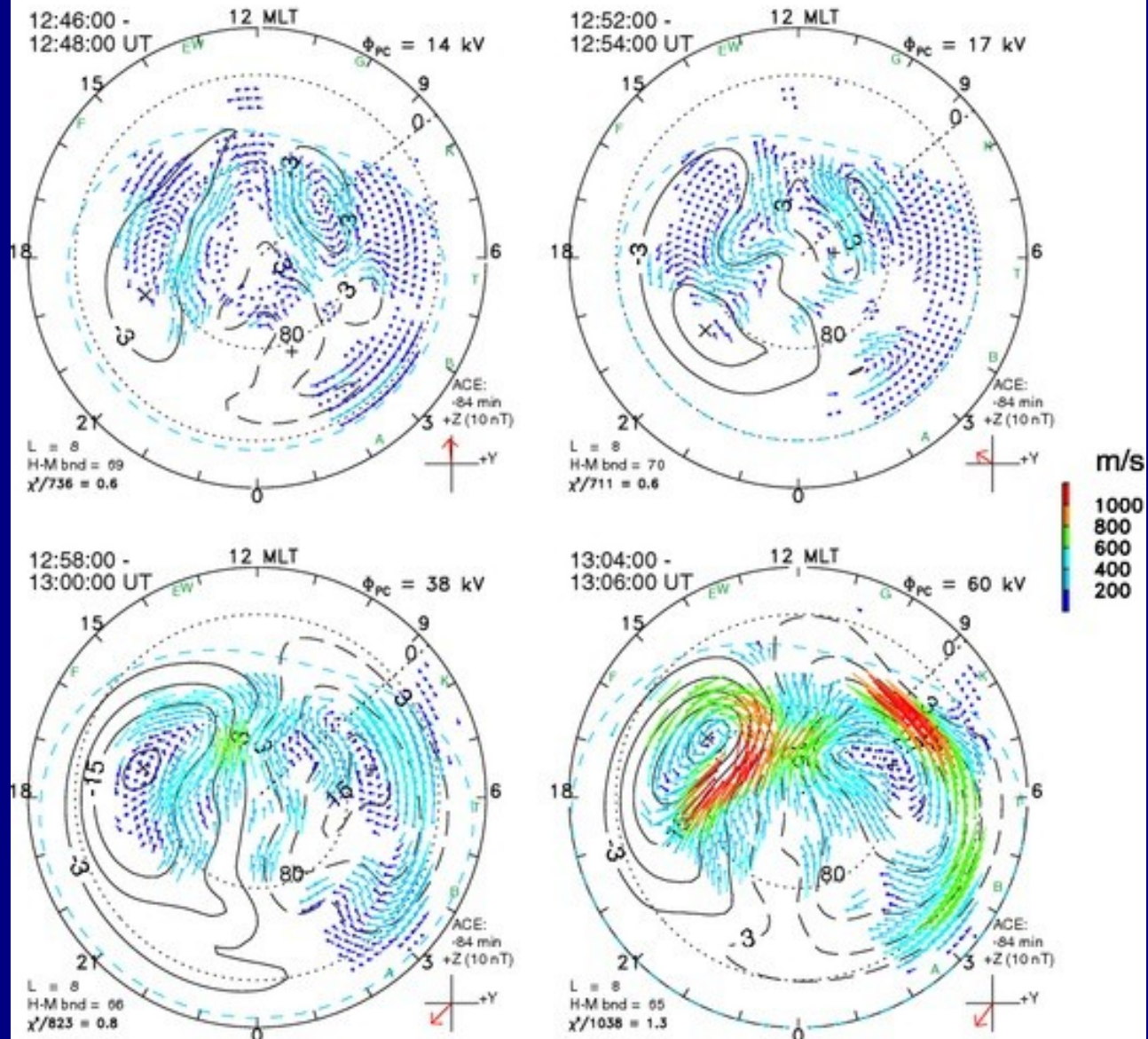
- Repousser les limites des modèles.
- Comprendre la dynamique des plasmas spatiaux
- Tenter des modèles prédictifs combinés à des réseaux optimisés pour l'acquisition des données (météo spatiale)
- Fournir des données utiles pour l'industrie (réseaux électriques, télécoms, transport aérien / protection des personnels, protection des satellites.
- Améliorer la conception des satellites et des instruments à bord.
- Astrophysique. Grâce à l'observation in-situ, fournir des modèles, des « paradigmes », généraux. Les appliquer à des objets plus lointains : exoplanètes, couronnes d'étoiles, magnétosphères d'astres compacts /trous noirs, champs magnétiques galactiques...

Densité ionosphérique vue par réseau de radars Super Darn



Vitesses horizontales dans l'ionosphère

12/03/2001



Module de la densite de courant électrique

