

La structure de la magnétosphère terrestre



Laboratoire de Physique des Plasmas

IMAOC6 2024 (14-25/Oct.) - Conakry, Guinée

Olivier Le Contel (compléments)

Cours préparé par M. Berthomier (IMAO 2019)

Laboratoire de Physique des Plasmas

CNRS, École Polytechnique et Sorbonne Université, Paris

Courriel: olivier.lecontel@lpp.polytechnique.fr



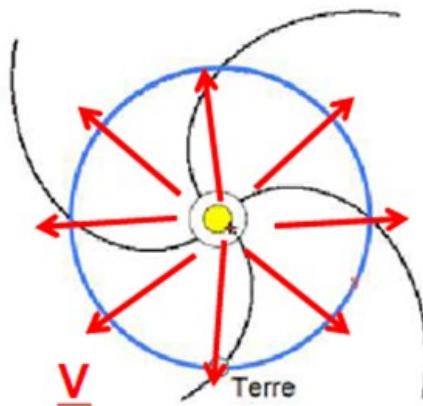
Objectif et plan du cours



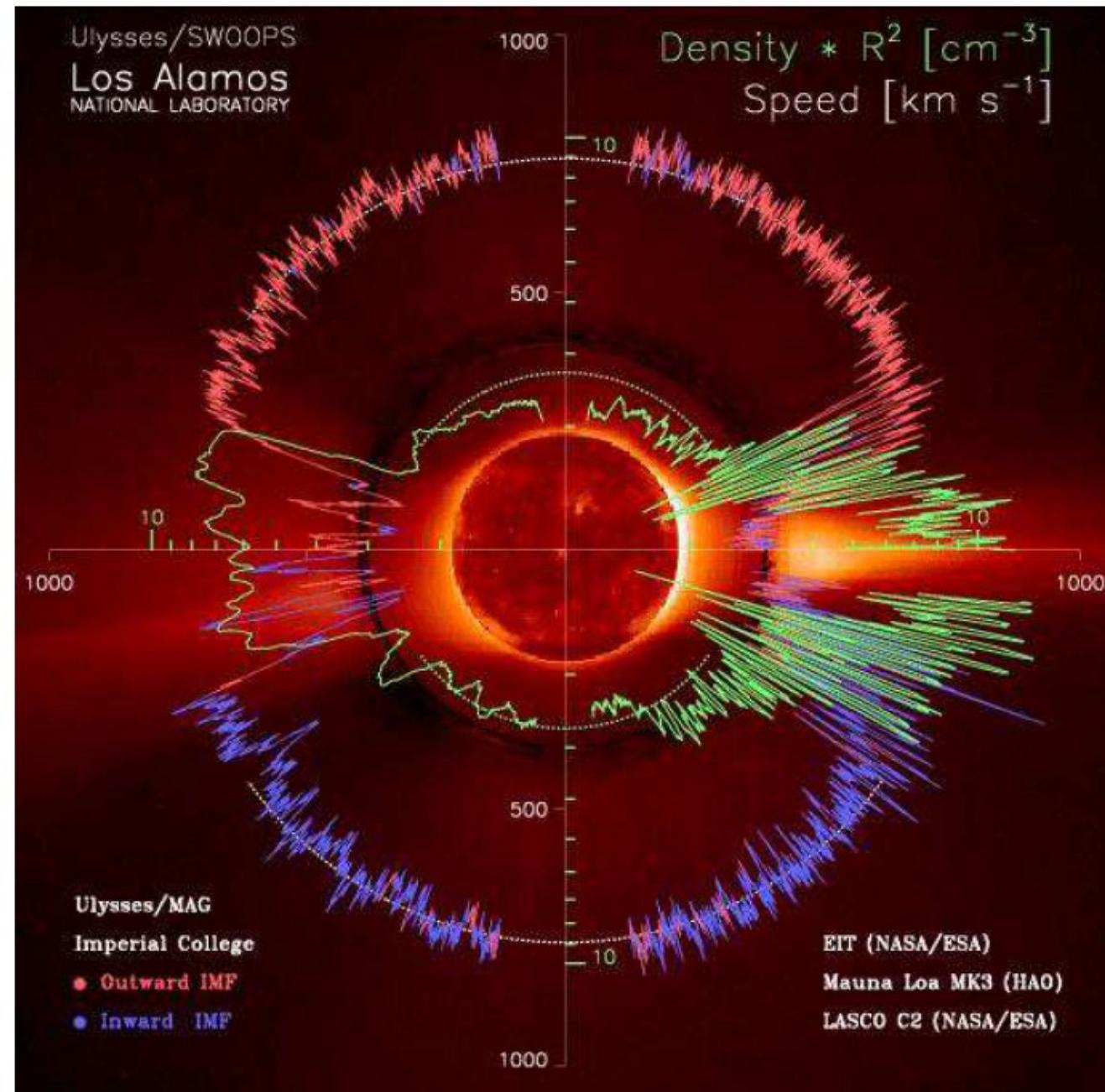
L'objectif de ce cours est de présenter la morphologie globale de la magnétosphère terrestre, l'origine physique et la nature des différentes régions qui la composent.

0. Quelques notions sur le vent solaire
1. Le choc amont et la magnétogaine
2. La magnétopause
3. La convection magnétosphérique
4. Courants et régions de haute latitude
5. La magnétosphère interne

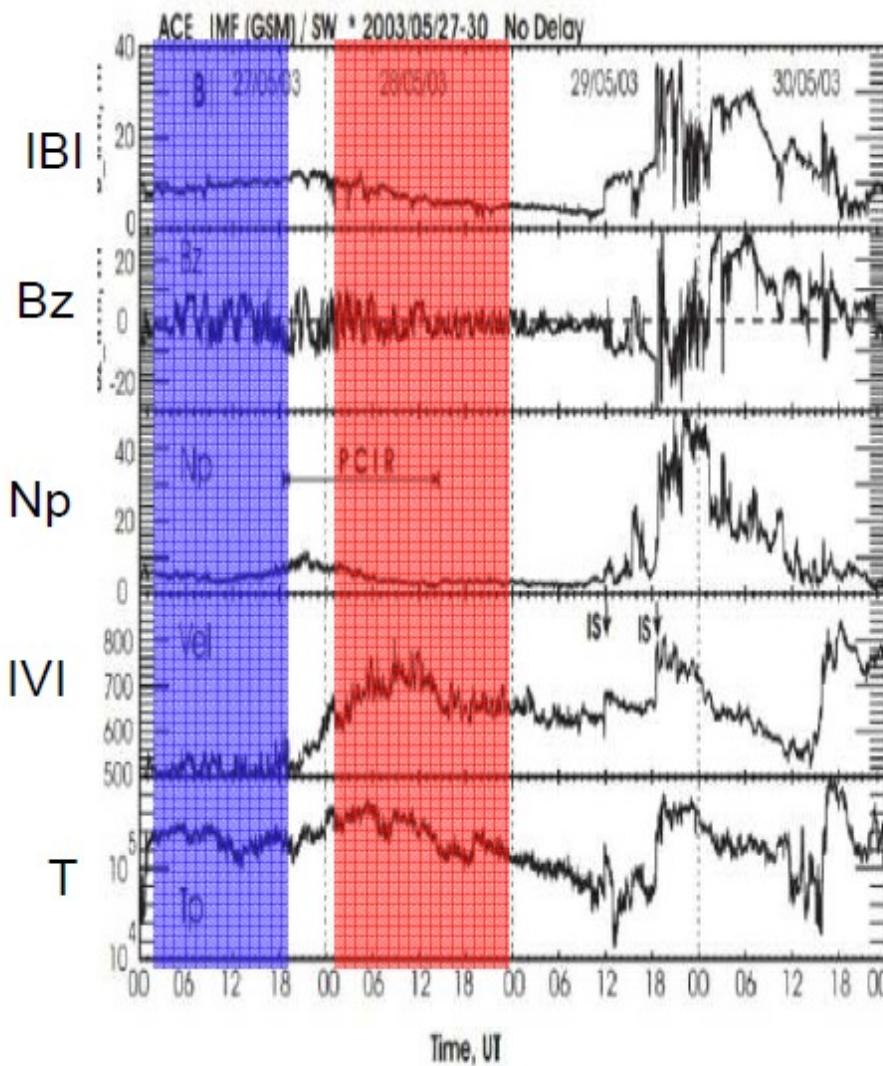
Le vent solaire



Composite: couronne solaire (SoHO, HAO) et mesures de la vitesse et de la densité du vent solaire (Ulysse): vent solaire rapide et peu dense dans des régions étendues autour des pôles du Soleil, vent solaire lent et dense dans des régions équatoriales, avec de fortes fluctuations en fonction de la latitude (structures magnétiques étroites qui canalisent le flux de matière).



Le vent solaire: Mesures près de la Terre



Des particules chargées: H+, e-, (noyaux He=particules α) ...

En expansion radiale:

- VS **rapide** (trous coronaux): 600-800 km/s, faible densité
- VS **lent** : 300-400 km/s, forte densité

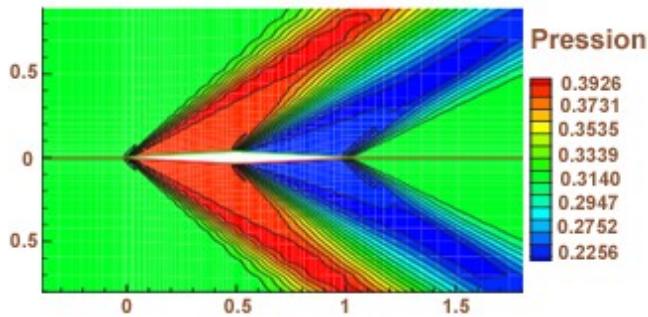
Vitesse du son : $c_s^2 = \frac{\gamma p}{\rho}$

Vitesse d'Alfvén ; $V_A^2 = \frac{B^2}{\rho \mu_0}$

~ 30 à 50 km/s

→ Vent solaire supersonique et super-Alfvénique

1. Le choc amont et la magnétogaine



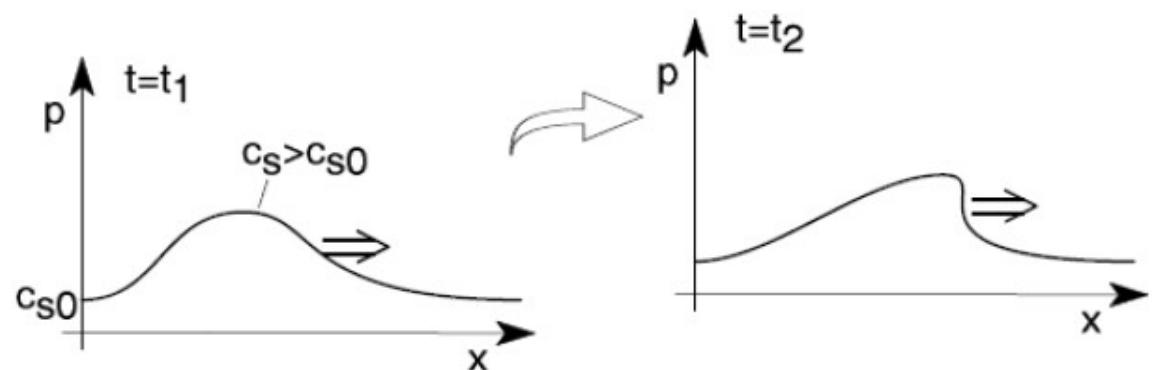
- Les chocs dans un fluide sont des phénomènes bien connus
- Un avion subit une onde de choc quand il passe le « mur du son »

Comment un choc se forme-t-il ?

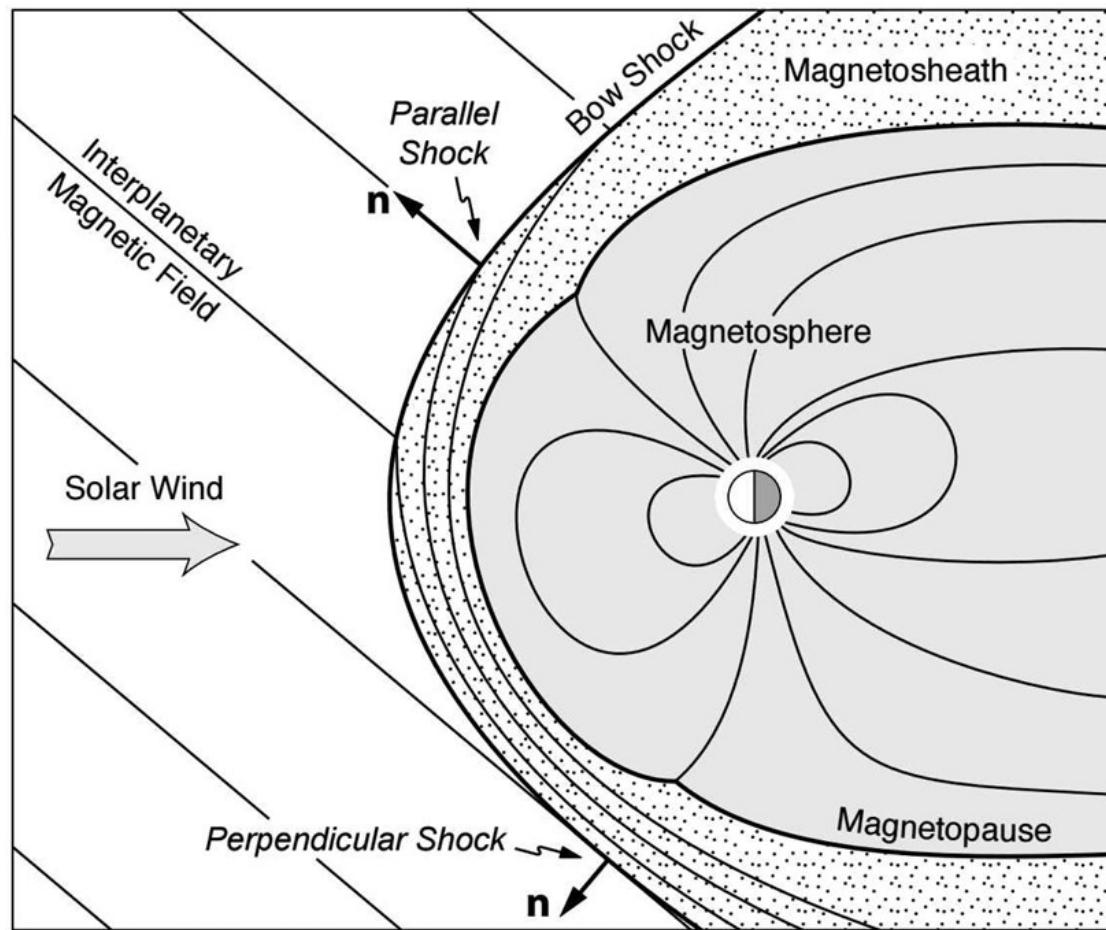
- Dans le cas d'un gaz adiabatique, il existe des ondes compressives correspondant à des variations de pression ΔP et de vitesse de phase

$$c_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad \gamma = C_p / C_v$$

- Dans le cas de faibles perturbations ΔP , la vitesse de phase au sein de l'onde ne varie pas significativement et le profil de l'onde est stable
- Dans le cas de fortes perturbations ΔP :
 - La vitesse augmente localement
 - Le profil de l'onde se raidit
 - Un choc se forme dans le gaz

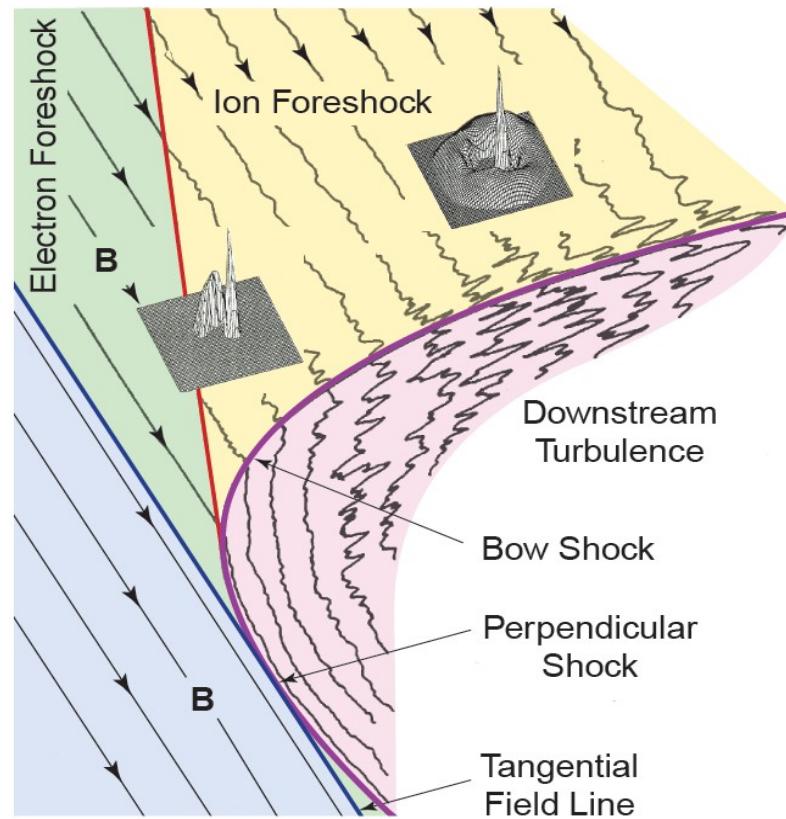
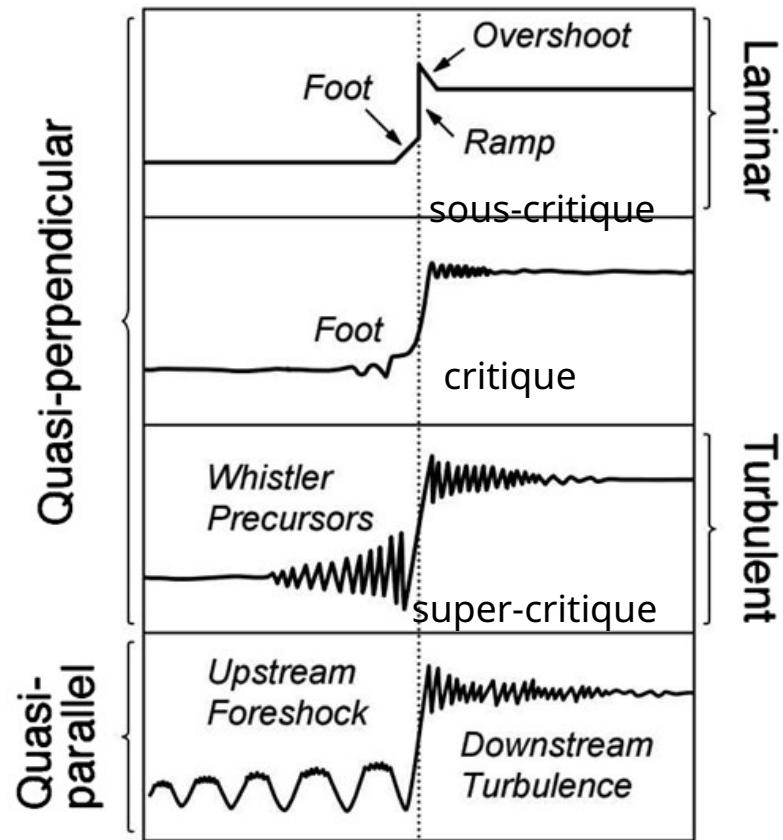


La morphologie du choc terrestre



- La magnétosphère terrestre forme un obstacle dans le vent solaire
- Elle interagit avec le vent solaire « choqué », la magnétogaine
- Comment le choc filtre-t-il les variations du vent solaire ?

Chocs quasi-parallèles ou quasi-perpendiculaires



- Importance du nombre de Mach : $M = U_{\text{flot}}/V_A \gg 1$.
- Super-critique si $U_{\text{flot,aval}} > C_{S,\text{aval}}$ dans le repère du choc
- Particules réfléchies et accélérées dans le choc créent une turbulence d'onde et contrôlent la dynamique du choc qui est très grande dans le cas quasi-parallèle

Mesures dans le préchoc par la mission MMS le 30 janvier 2019 (Turner et al., ApJL, 2021)

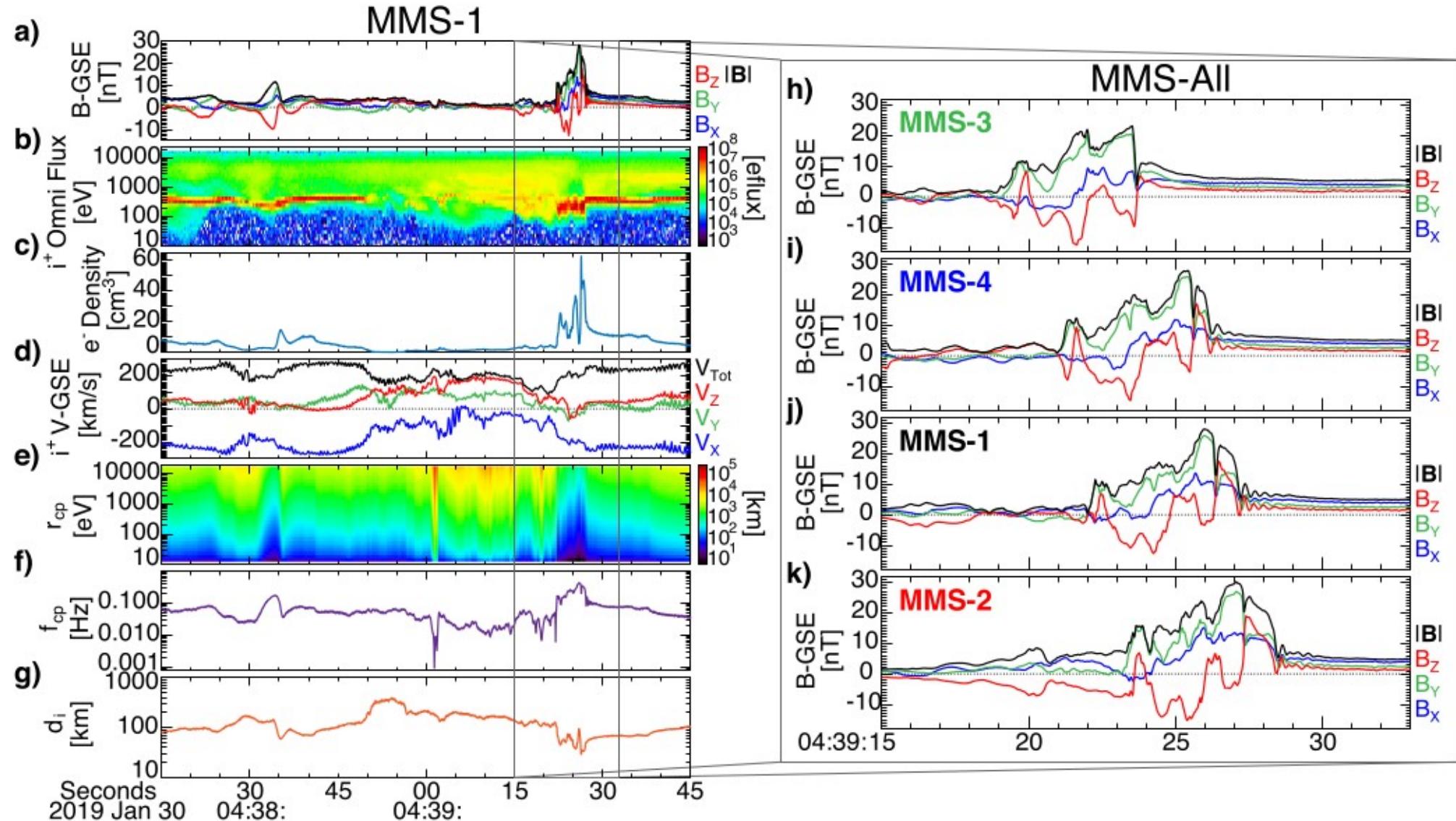
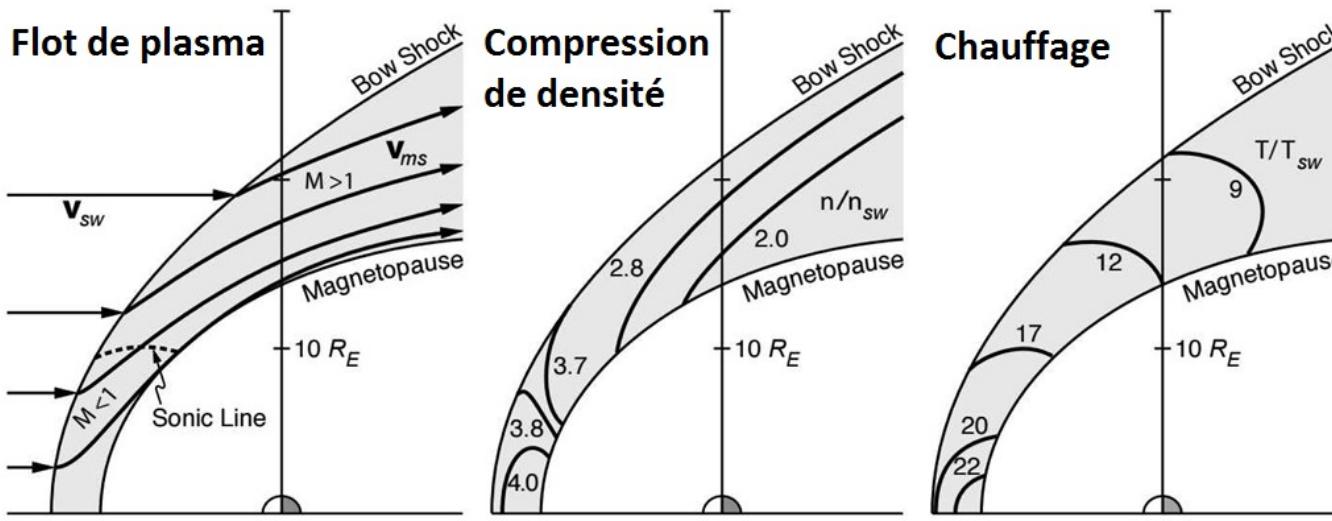


Figure 1. Overview of the event observed by MMS. (a)–(g) Data from the foreshock transient observed by MMS-1 on 2019 January 30, including: (a) magnetic field vector in GSE coordinates (XYZ in blue, green, and red, respectively) and magnitude (black); (b) ion omnidirectional energy-flux (color, units $\text{eV} (\text{cm}^2 \text{s sr eV})^{-1}$); (c) electron density; (d) ion velocity vector in GSE coordinates (XYZ in blue, green, and red, respectively) and magnitude (black); (e) proton gyroradius (color) as a function of energy and time; (f) proton gyrofrequency; (g) ion inertial length. (h)–(k) Magnetic field vectors and magnitudes from all four MMS spacecraft zoomed in on the feature of interest in this study.

La magnétogaine terrestre



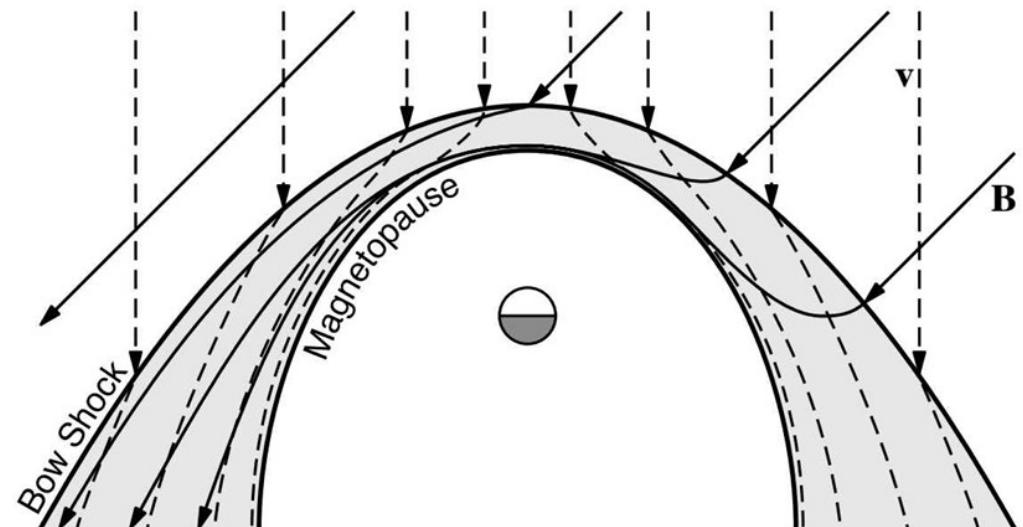
$$R_{bs} = \left(1 + 1.1 \frac{n_{sw}}{n_{bs}} \right) R_{mp}$$

Au point sub-solaire :

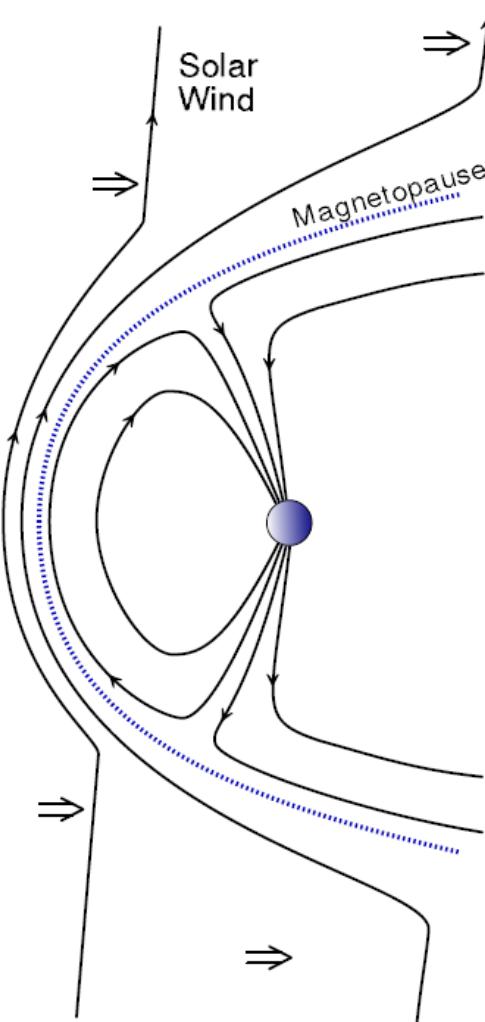
$$n_{bs} \approx 4 n_{sw}$$

$$R_{bs} \approx 1.3 R_{mp}$$

- Forte augmentation de la densité et de la température du plasma dans la magnétogaine
- La pression magnétique ↑ au point sub-solaire
=> formation d'une « depletion layer »
- Raréfaction du plasma en ce point marquée surtout lorsque l'IMF est vers le Nord



2. La magnétopause



- Frontière entre le vent solaire « choqué » et la magnétosphère
- Postulée par Chapman et Ferraro en 1940 et identifiée en 1961 par Explorer 12
- Elle se situe au point d'équilibre des pressions magnétiques ($B^2/2\mu_0$) et cinétiques de la cavité magnétosphérique et du vent solaire :

$$n_{sw}m_i v_{sw}^2 = \frac{KB_E^2}{2\mu_0 R_{mp}^6}$$

Facteur correctif →

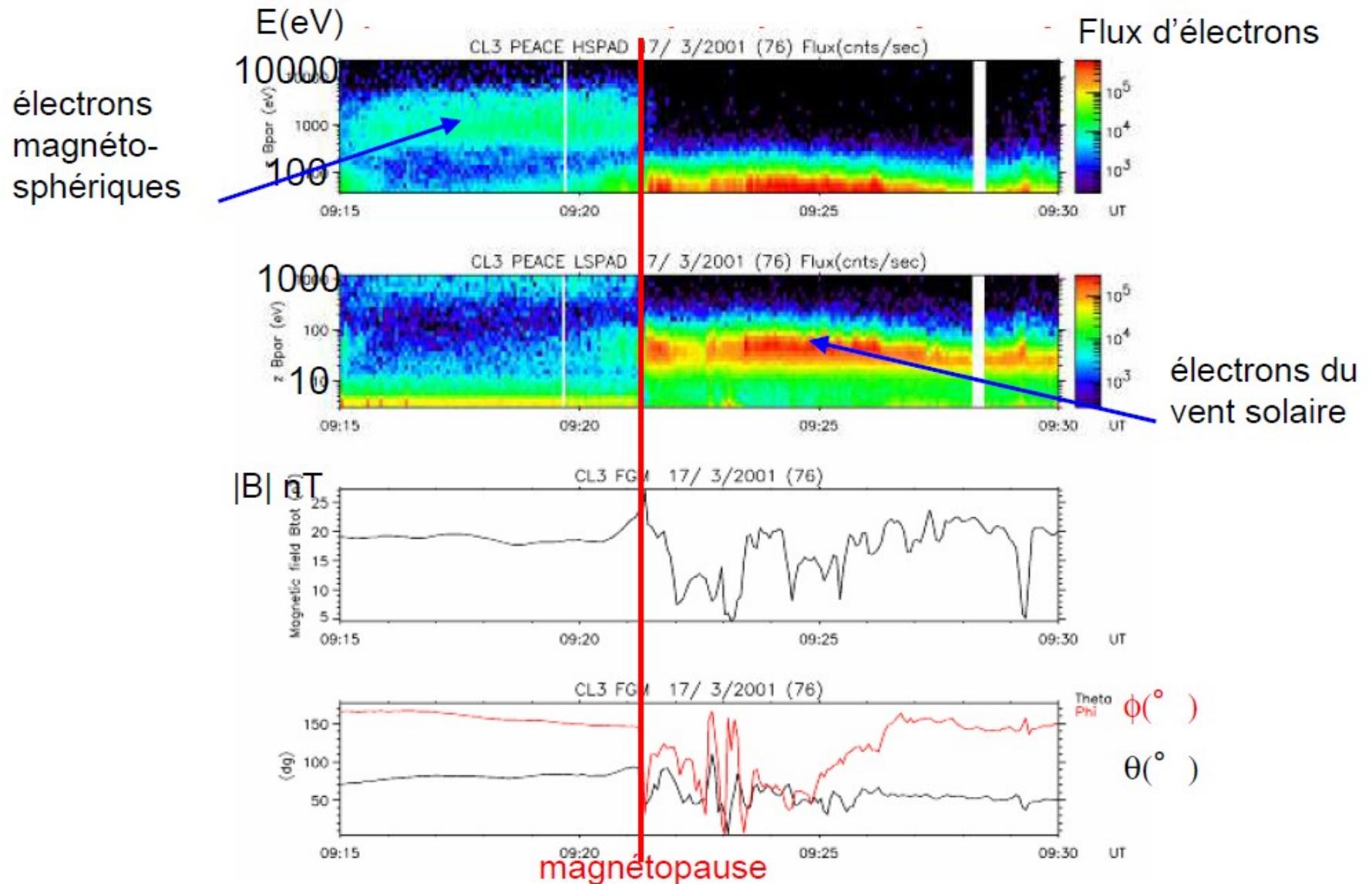
Pression dynamique du vent solaire →

Champ magnétique terrestre B en $1/R^3$ →

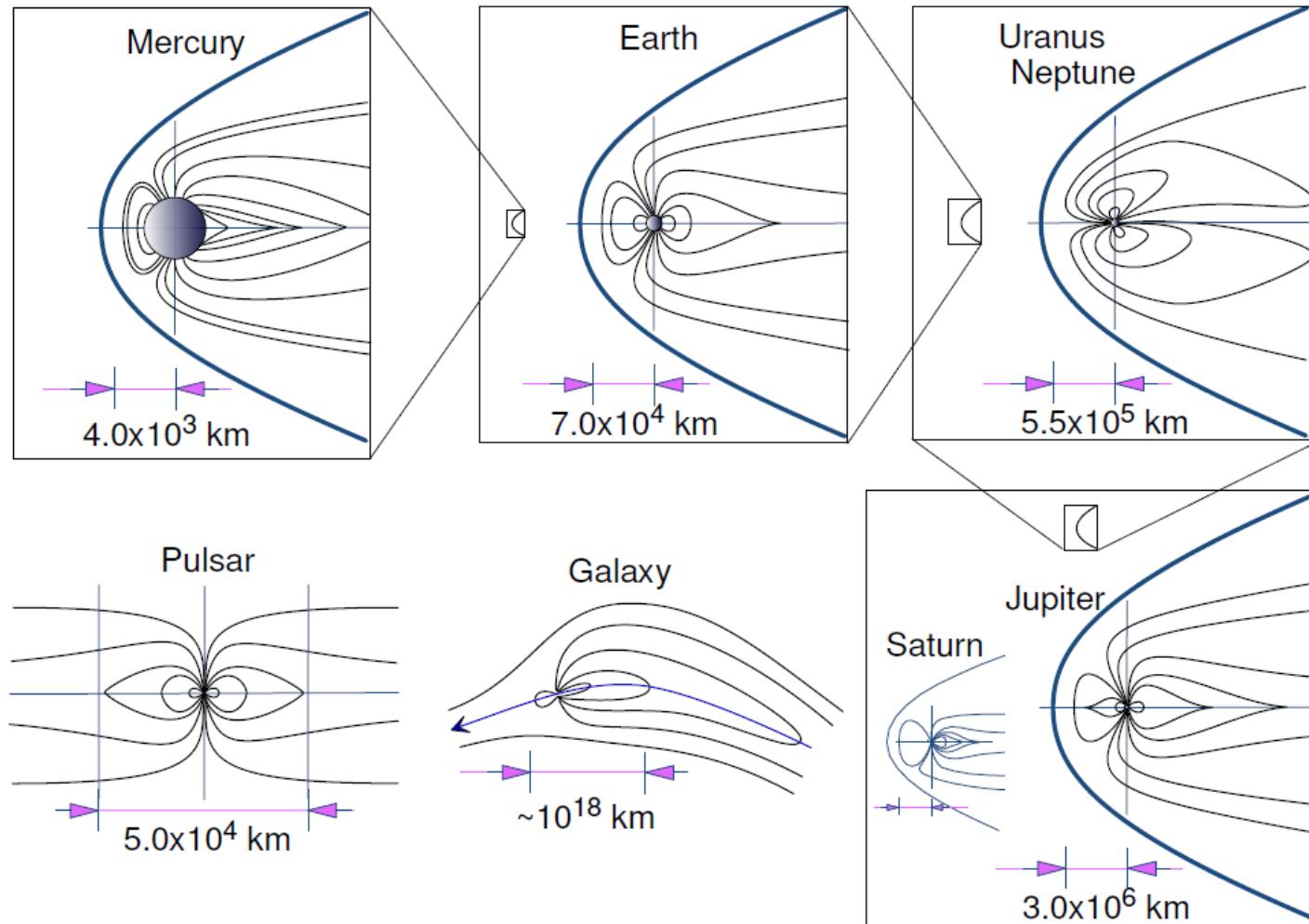
[Schield, JGR, 1969]

Une traversée de magnétopause par Cluster

C'est la frontière entre 2 plasmas de nature différente



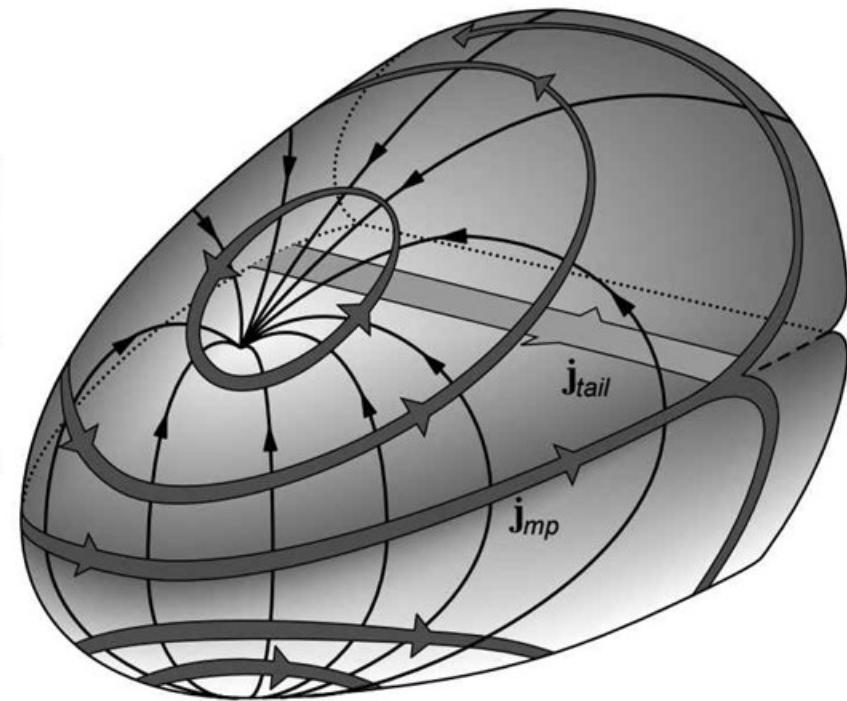
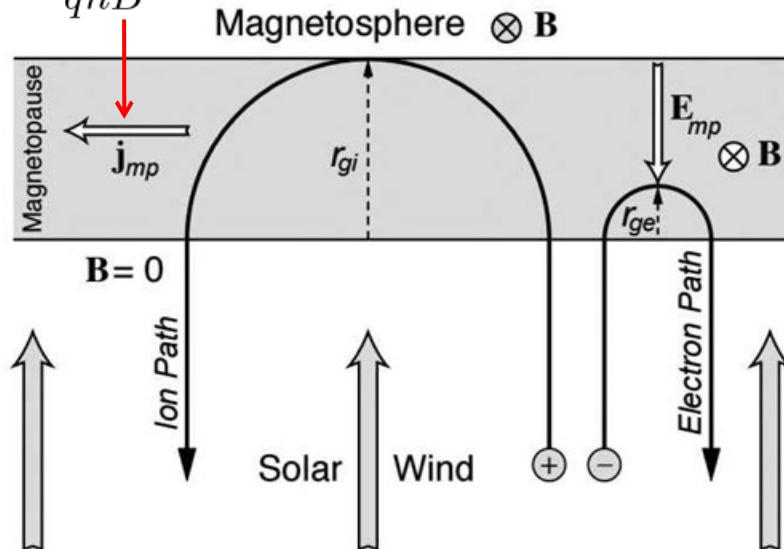
Comparaison avec d'autres planètes



Planet	<i>Mercury</i>	<i>Earth</i>	<i>Jupiter</i>	<i>Saturn</i>	<i>Uranus</i>	<i>Neptune</i>
R_{mp}/R_P	1.4	10	75	20	20	25

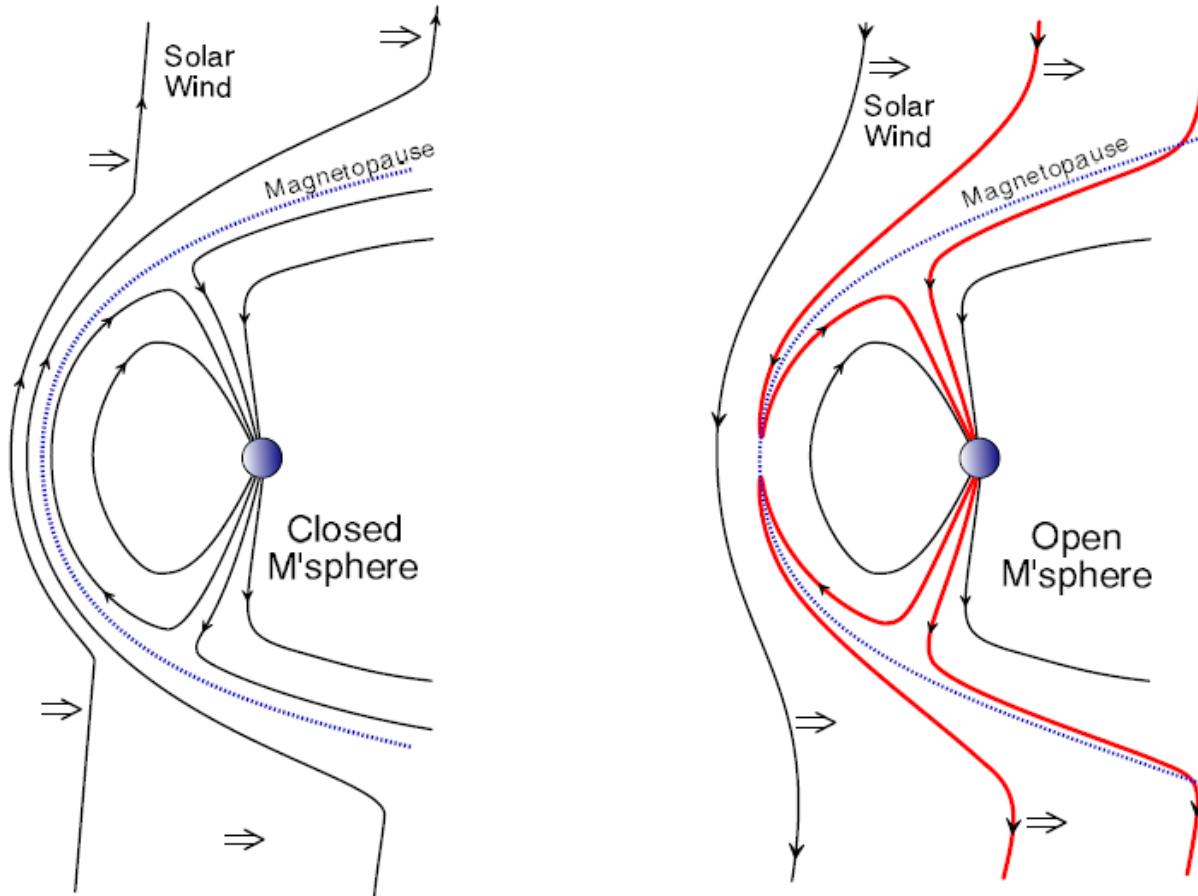
Courants à la magnétopause

$$u_{\perp} = \frac{-\nabla p \times B}{qnB^2}$$



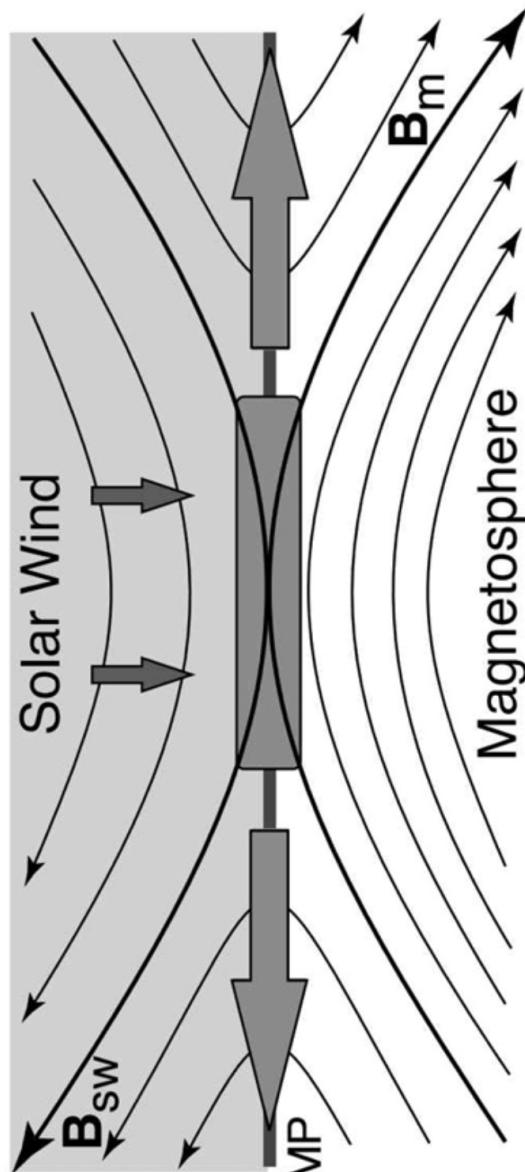
- La magnétopause étant une discontinuité rotationnelle (rotation de B et variation de son intensité), elle forme une couche de courant ($-\nabla p \times B$)
- Le gradient de pression $-\nabla p$ créé une dérive et un courant diamagnétique
- Son épaisseur est de l'ordre du rayon de Larmor des ions ~100-2000 km et elle se déplace à quelques 10's km/s en réponse aux fluctuations du VS

Configurations fermée et ouverte



- Champ magnétique interplanétaire (IMF) vers le Nord: le plasma du VS s'écoule autour de la magnétosphère qui est « fermée »
- IMF vers le Sud: il se reconnecte avec le champ terrestre, de préférence là où les champs sont anti-parallèles, et la magnétosphère est « ouverte »

Reconnexion magnétique (I)



- Changement de topologie du champ \mathbf{B}
- Conversion de l'énergie électromagnétique stockée sous forme de couche de courant en énergie cinétique du flux de plasma entrant
- Comportement MHD non idéal du plasma :

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j} + \frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \frac{1}{ne} \nabla \cdot \mathbf{P}_e + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}$$

Résistivité nulle
en plasma non-collisionnel

Courant de Hall :
observé à la magnétopause

Effets plus délicats à identifier

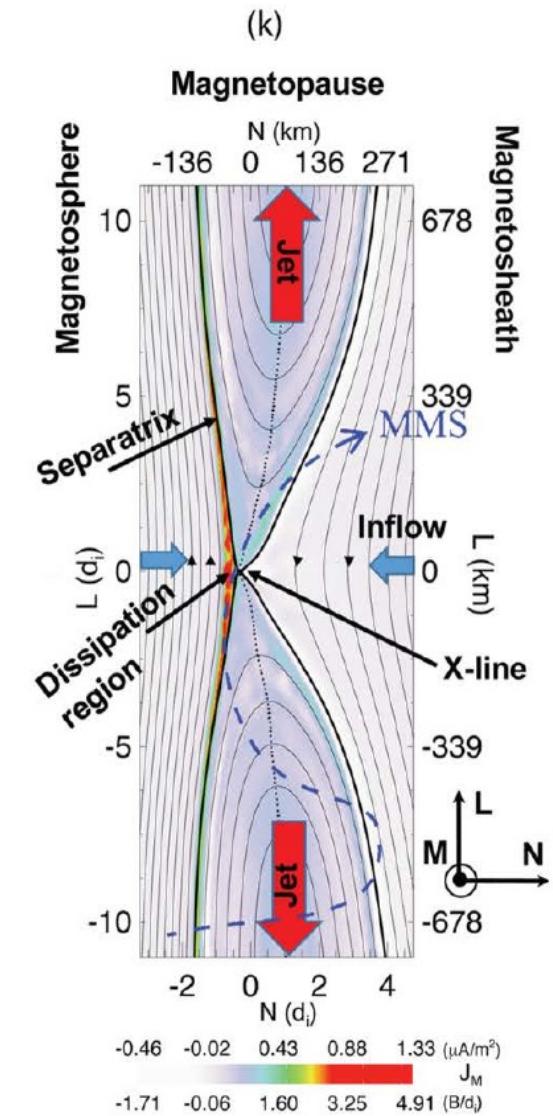
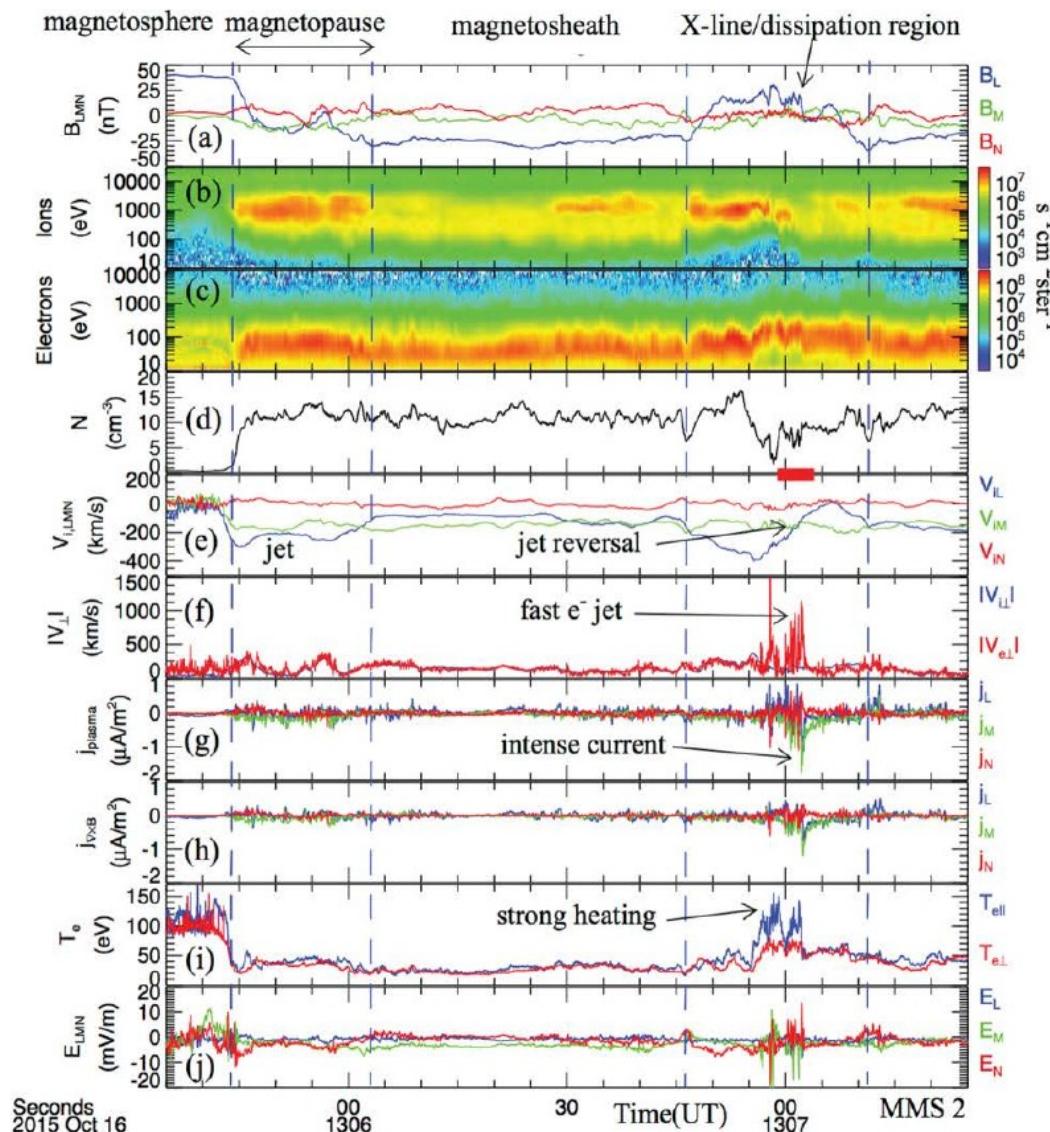
[Vasyliunas,
1975]

- Le taux de reconnexion varie selon l'orientation relative exacte des champs magnétiques
- Formation d'une couche limite de basse latitude dans laquelle les 2 types de plasma coexistent

Reconnexion à la magnétopause par MMS

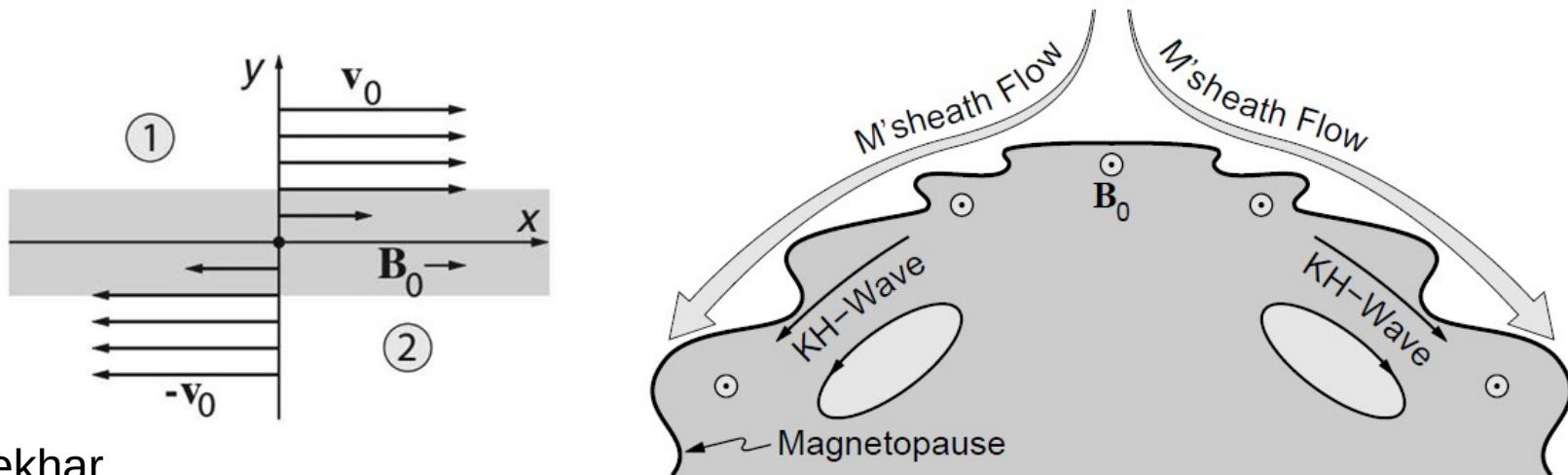
Asymétrique
Ngaine > Nsphere

Sans champ guide
 $B_M \sim 0$ (en dehors
du plan)



[Burch et al., Science, 2016]

Instabilité de Kelvin-Helmholtz

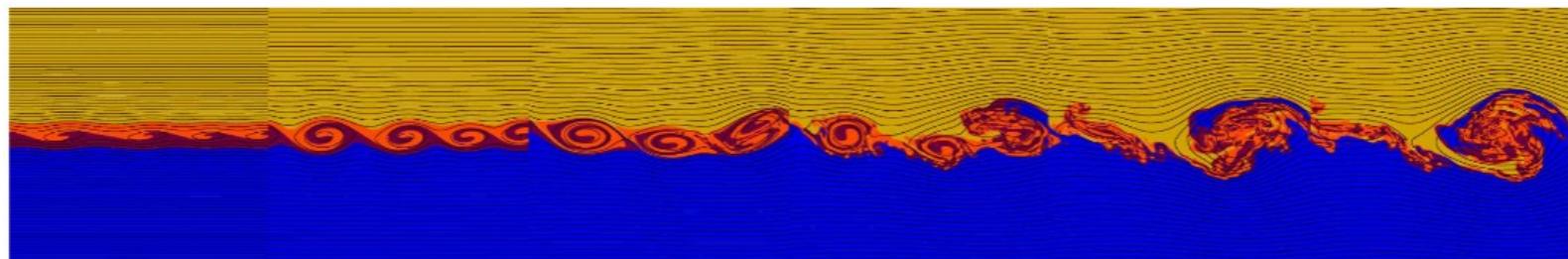


[Chandrasekhar,

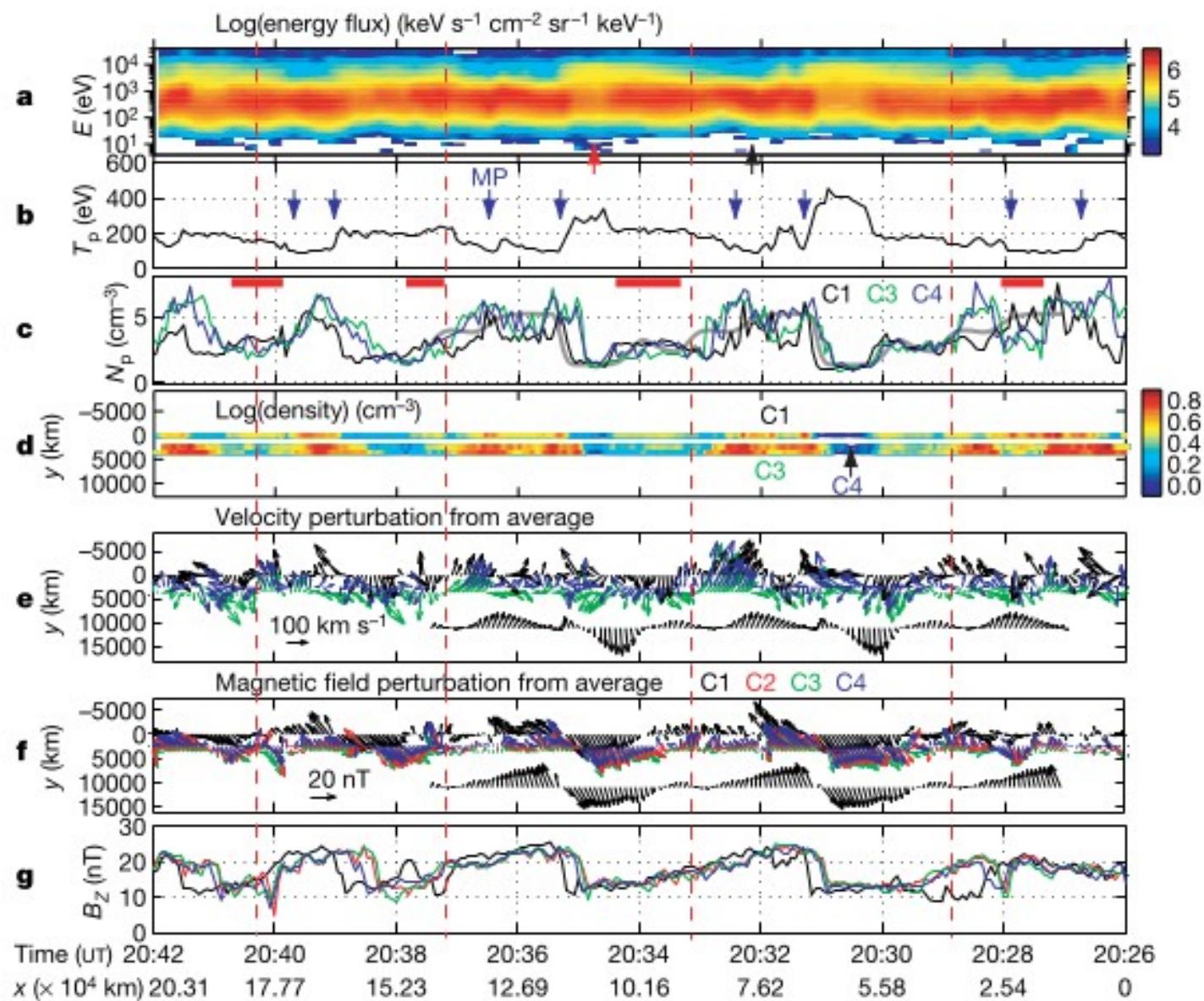
1961]

En IMF Nord, une interaction « visqueuse » se produit lorsque le plasma du vent solaire s'écoule dans la direction opposée à celle du plasma de la magnétosphère

- Cela se produit dans la zone équatoriale du côté « soir », de par l'existence d'un courant se propageant d'est en ouest (le courant annulaire, voir partie 5)
- Des ondes de surface instables créent des tourbillons de grande échelle favorisant la pénétration du plasma dans la magnétosphère tout en induisant la reconnexion

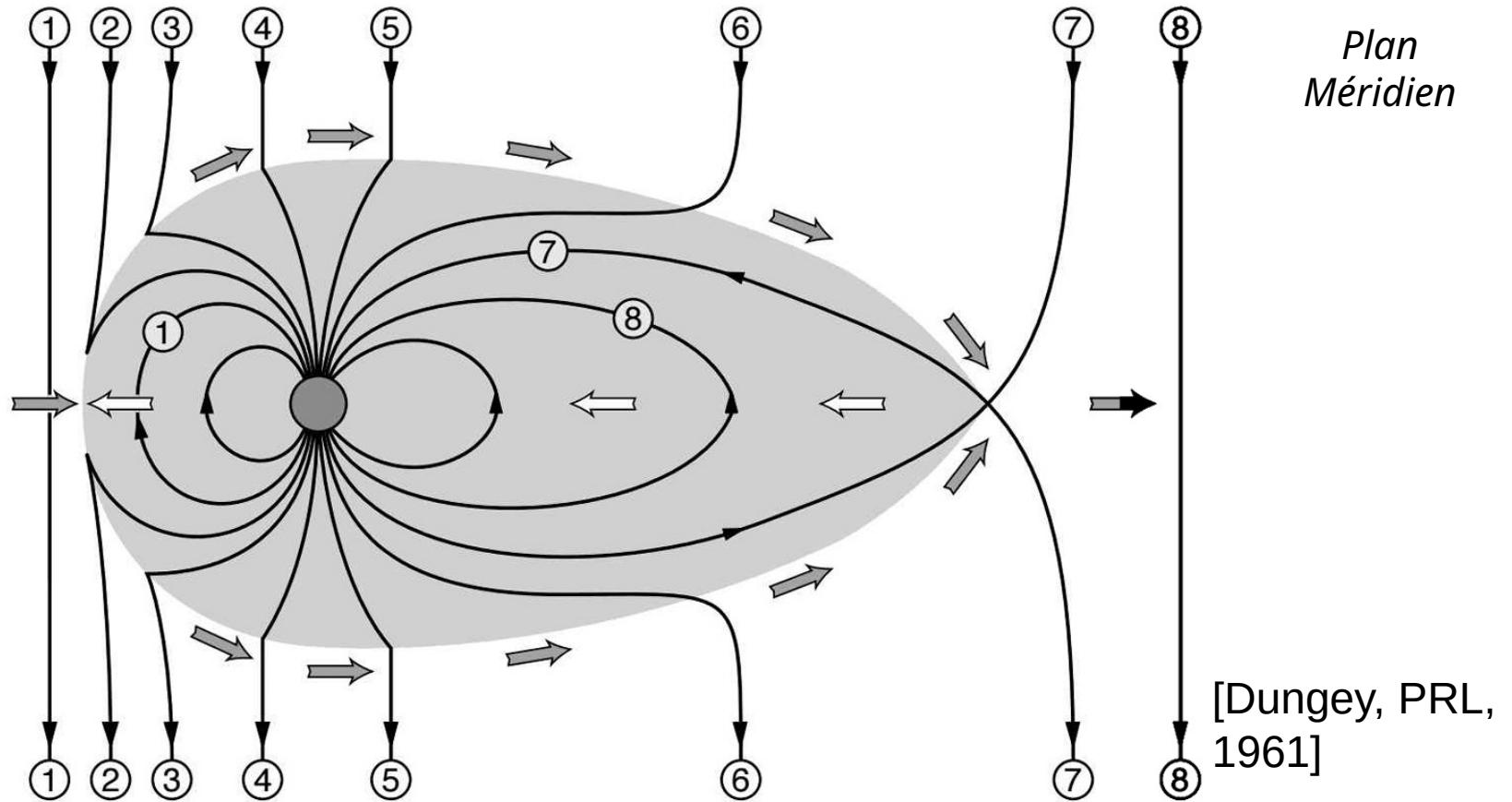


Instabilité Kelvin Helmholtz observée par Cluster



[Hasegawa et al., Nature,
2004]

3. La convection magnétosphérique



- Le vent solaire transporte les lignes de champ reconnectées vers l'arrière
- Une 2nde reconnexion magnétique a lieu dans la queue magnétosphérique
- Les lignes fermées (8) sont dipolarisées et convectées côté jour vers (1)

Champ électrique matin-soir (« dawn-dusk »)

- Depuis la Terre, un observateur voit un champ électrique lié au **flot du vent solaire**

$$\mathbf{E}_c = -\mathbf{v}_c \times \mathbf{B}$$

- Ce champ de grande échelle est dirigé de l'aube vers le crépuscule. Le potentiel associé est une mesure de l'efficacité de la reconnexion

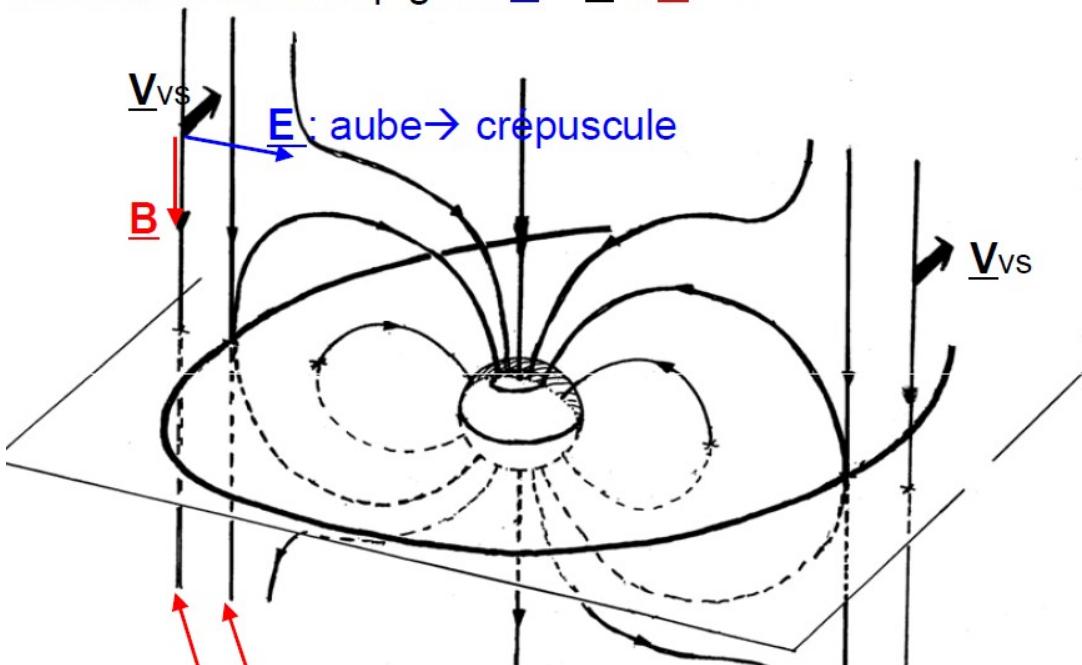
$$\mathbf{E}_c = -\nabla \phi_c$$

- La variation de potentiel totale est de l'ordre de 50 à 100 kV pour une taille matin-soir de magnétosphère de $\sim 30R_E$

$$\phi_c = -E_c L R_E \sin \psi$$

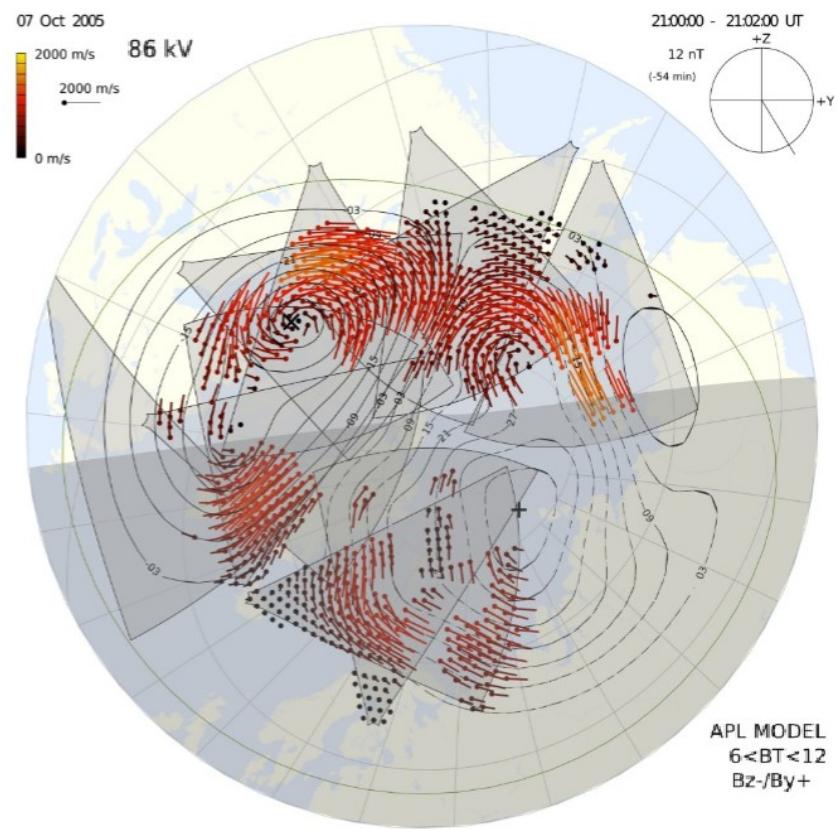
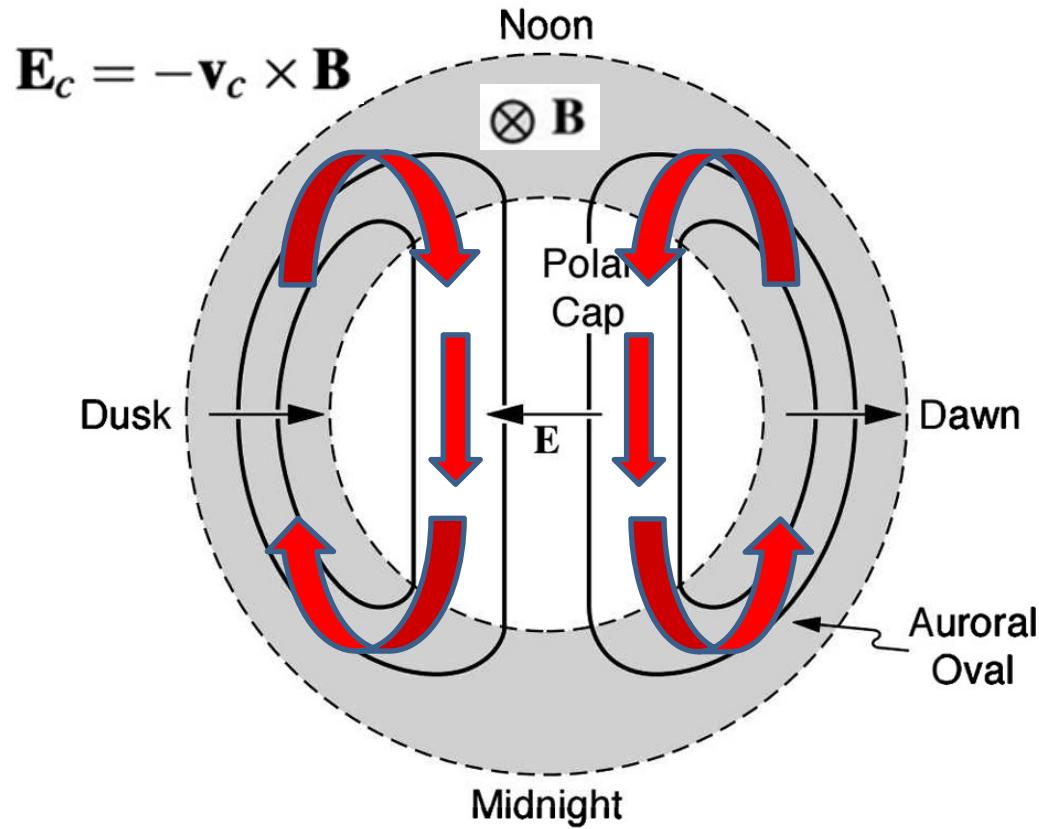
↑
Angle azimuthal

Théorème du champ gelé: $\underline{\mathbf{E}} + \underline{\mathbf{V}} \times \underline{\mathbf{B}} = 0$



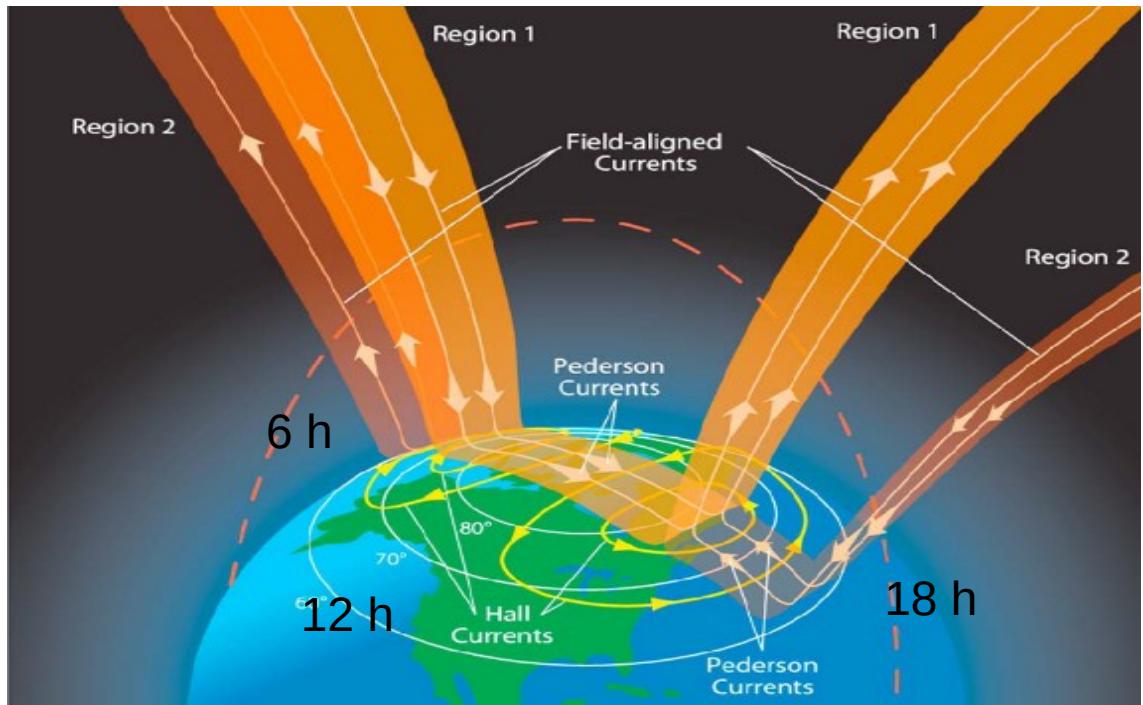
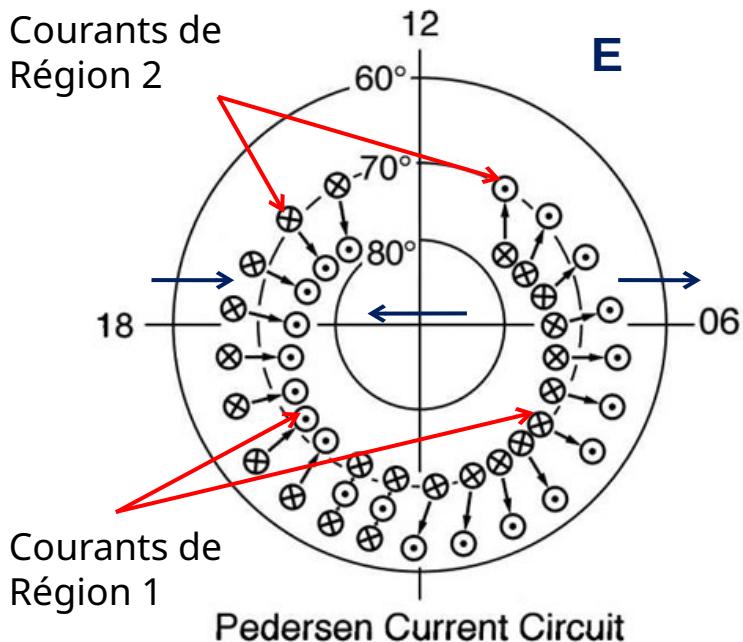
- Plus proche de la Terre, il est réduit par le champ lié à la dérive de gradient/courbure qui polarise le plasma en sens opposé

Cellules de convection ionosphériques



- Projection du champ de convection dans l'ionosphère le long des lignes de champ
 - La rotation du champ de convection suit le mouvement du flot : 2 cellules
 - A basse latitude, champ E orienté vers le Pôle côté soir et vers l'Equateur côté matin
 - La taille de la calotte polaire nous renseigne sur l'étendue radiale de la queue mag.
 - SuperDARN fournit des cartes de la convection et le \mathbb{E}_c à travers la calotte polaire

4. Courants et régions de haute latitude

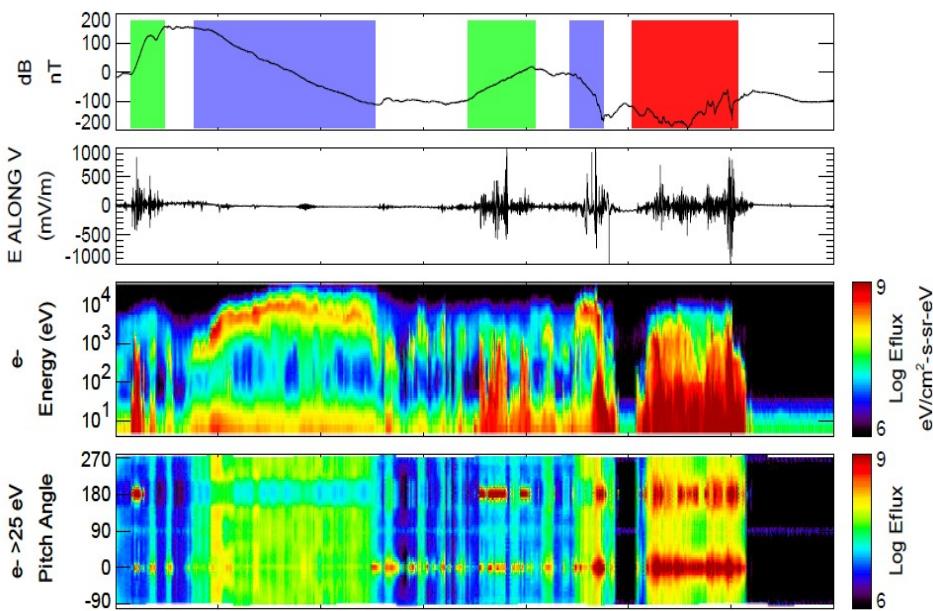


- Le champ électrique de convection induit des courants dans l'ionosphère, courants de Pedersen (le long de **E**) et courants de Hall :

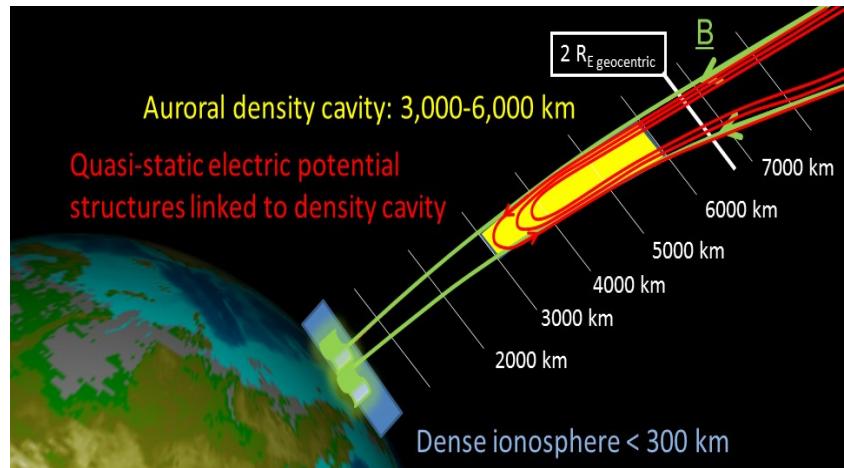
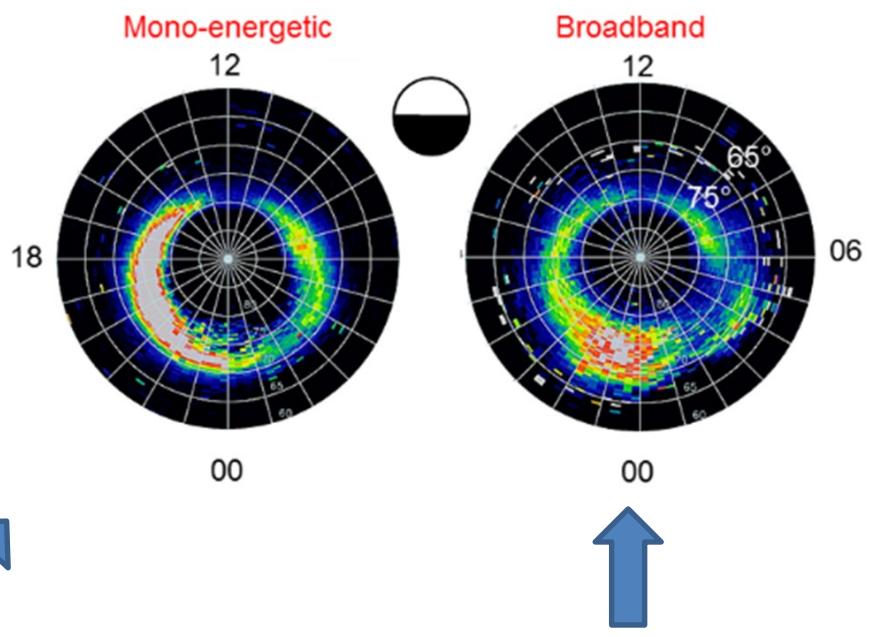
$$\mathbf{i}_{\perp} = \sigma_P \mathbf{E}_{\perp} + \sigma_H \frac{\mathbf{B} \times \mathbf{E}_{\perp}}{B}$$

- Ces courants perp se referment via des courants alignés à **B**, les courants de Birkeland
- Ces courants sont intenses en régions aurorales car la conductivité y est plus forte
=> effet Joule important ~ 1 GW pour 1nT de ΔB mesuré par l'indice AE

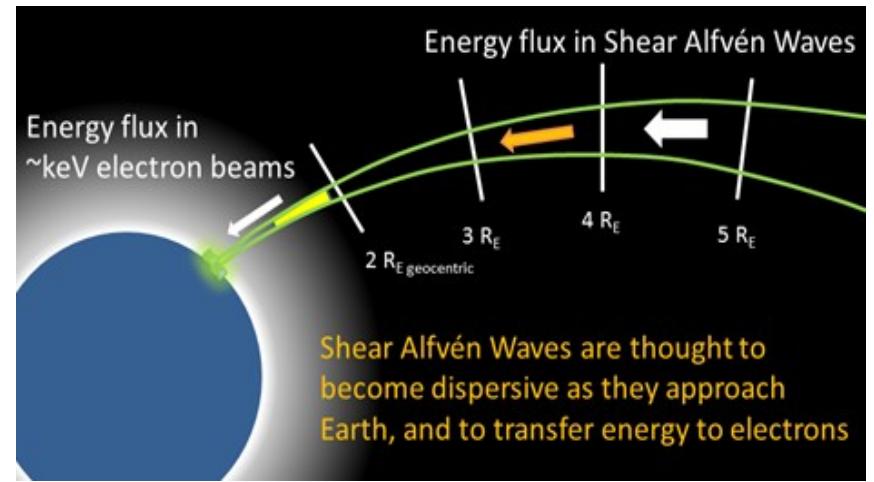
L'accélération aurorale



Distribution bi-modale des précipitations



Accélération par des structures non-linéaires

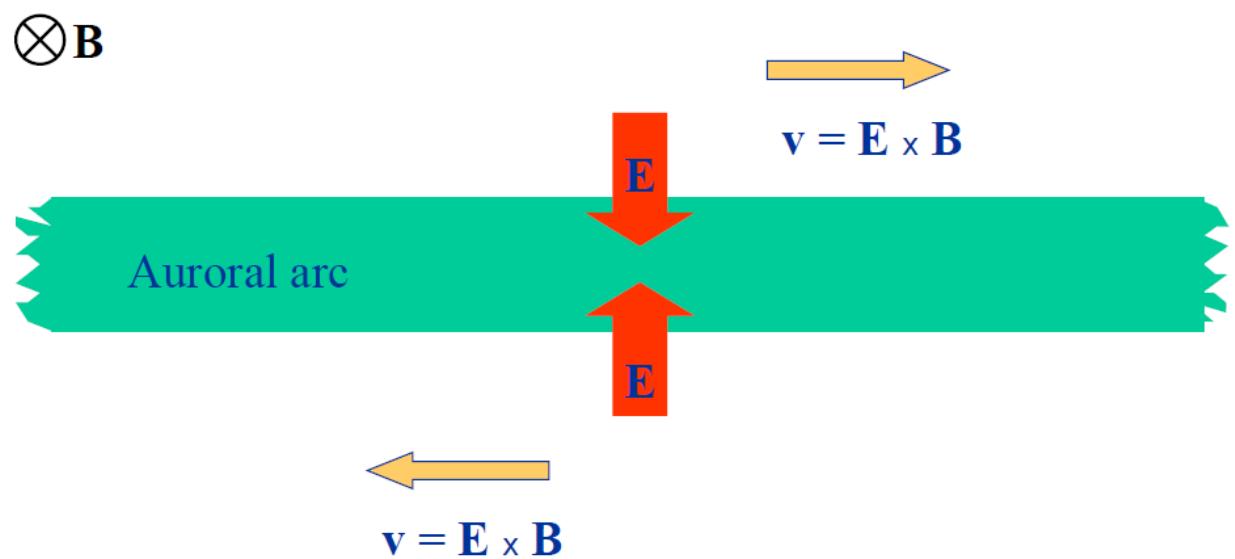


Accélération par ondes d'Alfvén « cinétiques »

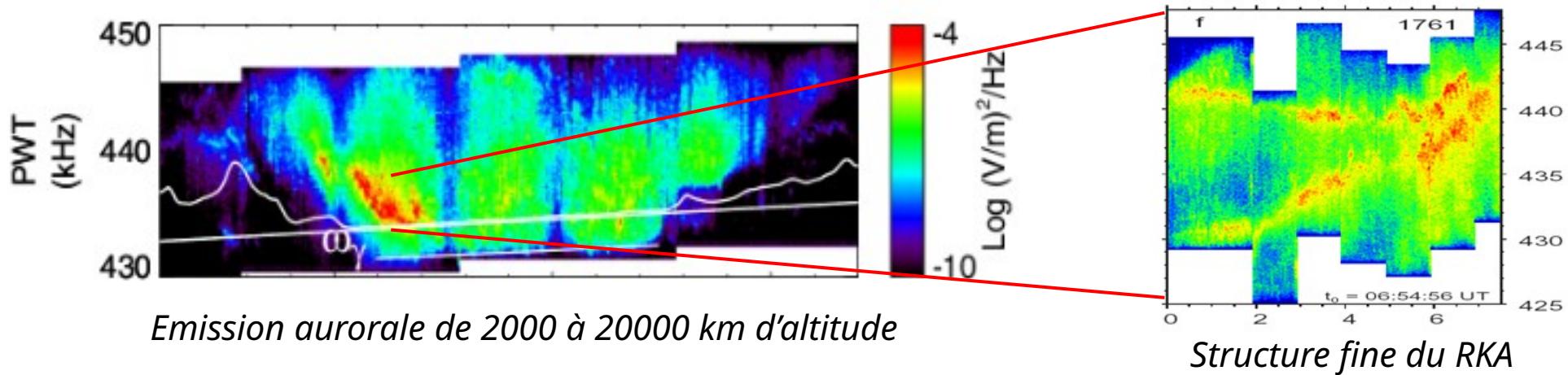
Origine physique des formes aurorales



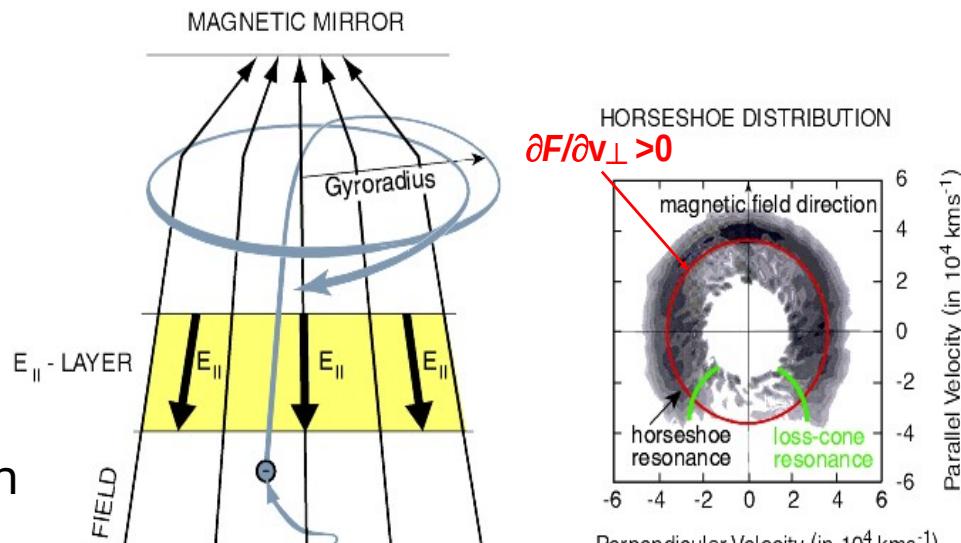
Le cisaillement du flot de plasma de part et d'autre de l'arc auroral induit une instabilité de Kelvin-Helmholtz à l'origine des formes en spirales



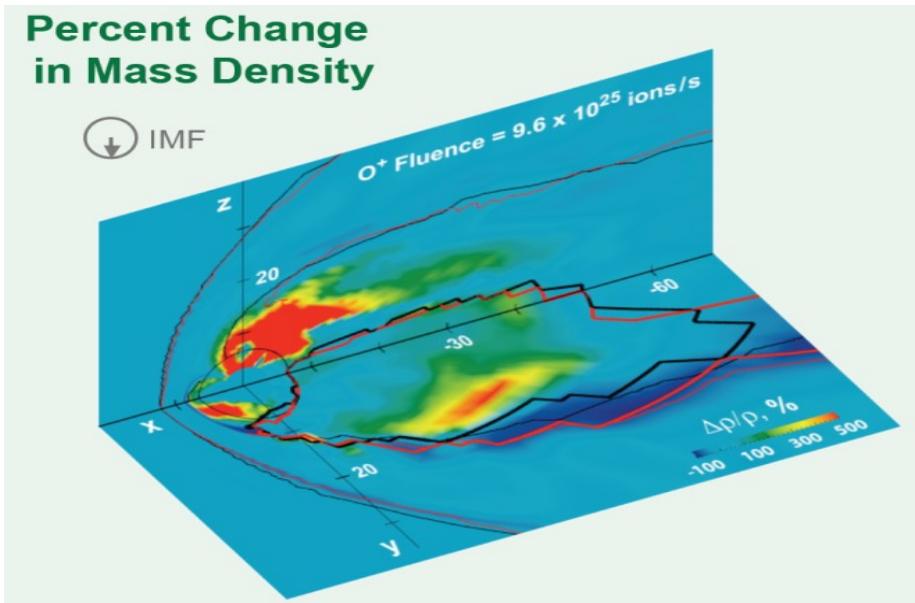
Le rayonnement kilométrique auroral



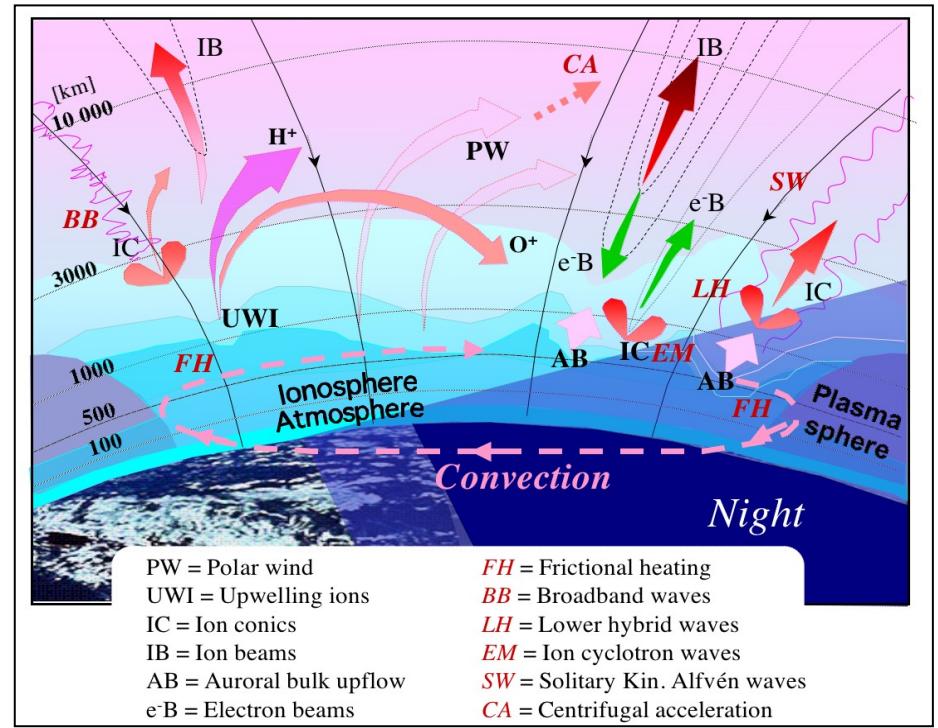
- La Terre est une puissante radio-source
- Le RKA est émis autour de 300 kHz ($\lambda=1$ km)
- Il est émis à la girofréquence relativiste des électrons précipitants, dans le mode X
- Les champs électriques parallèles couplés au champ **B** convergeant permettent son émission
- On ne comprend pas sa structure fine ni comment il peut s'échapper de la cavité aurorale dans laquelle il est créé...



L'échappement ionosphérique

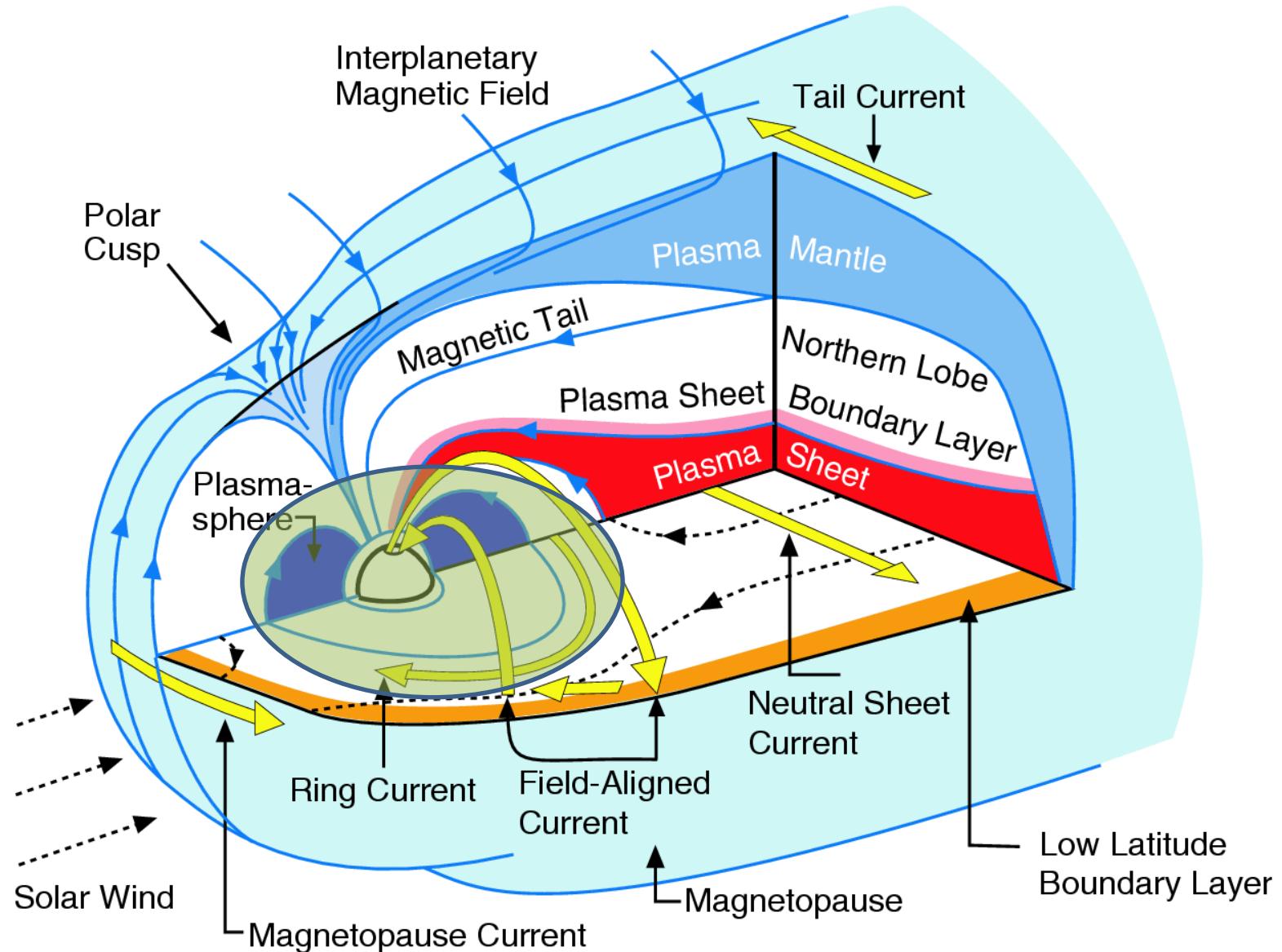


L'ionosphère, source majeure d'ions O^+

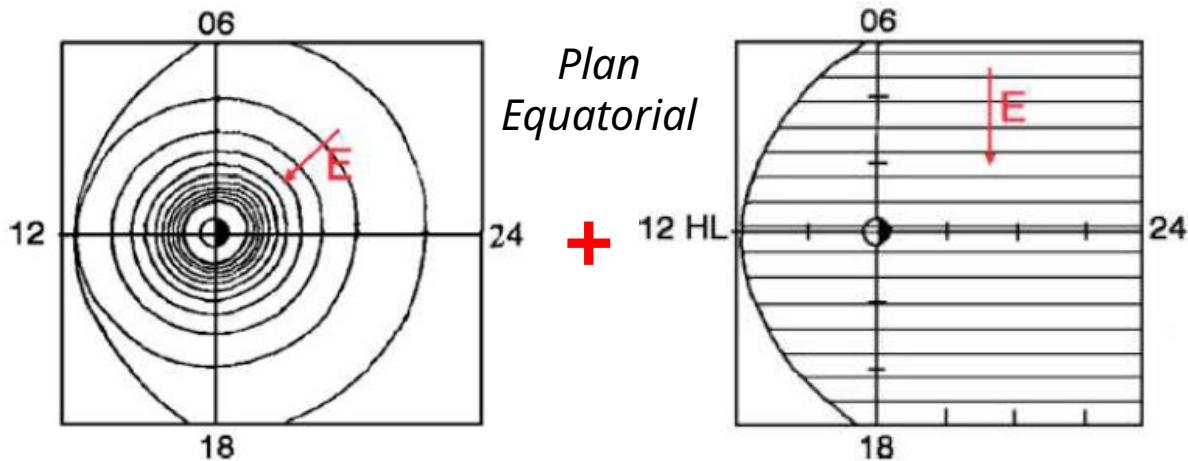


- L'ionosphère est une source majeure d'ions lourds pour la magnétosphère
- Lorsque l'activité magnétosphérique est intense, cet échappement est renforcé
=> un des éléments essentiels du couplage magnétosphère-ionosphère
- A basse altitude a d'abord lieu l'extraction des ions par chauffage Joule ou par diffusion ambipolaire liée à l'augmentation de T_e due aux précipitations
- A haute altitude ont lieu chauffage et accélération de ces ions de multiples façons

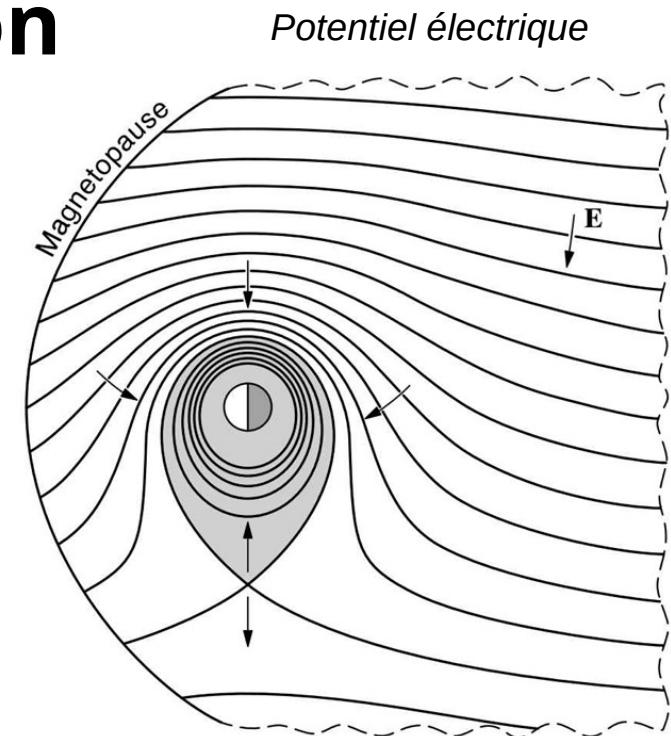
5. La magnétosphère interne



La plasmasphère en corotation



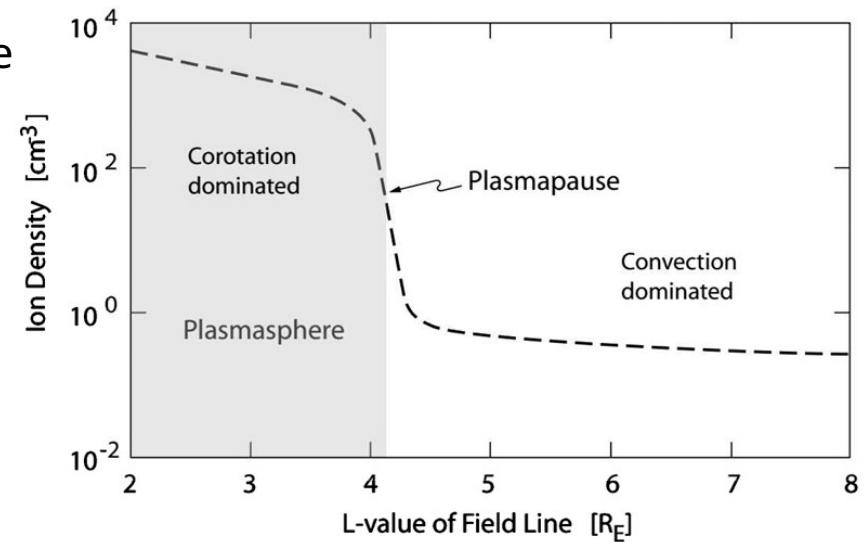
$$\mathbf{E}_{cr} = -(\Omega_E \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$$



- A basse altitude, les collisions ions-neutres entraînent le plasma dans une corotation avec la Terre => champ E
- Dépendance radiale du champ de corotation
- Champ de corotation + champ de convection

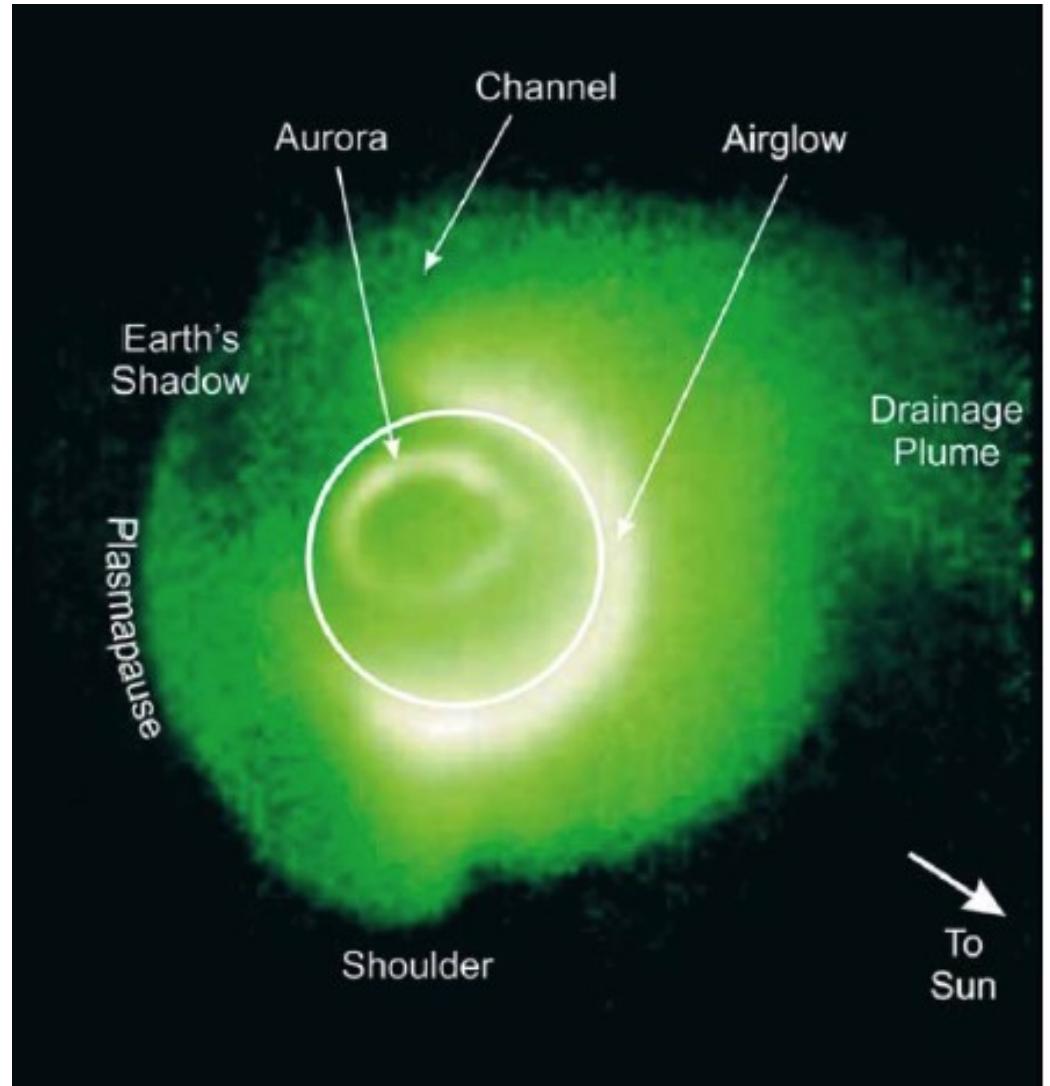
Plasmasphère: région où la corotation domine

- Le point de stagnation dépend de la convection



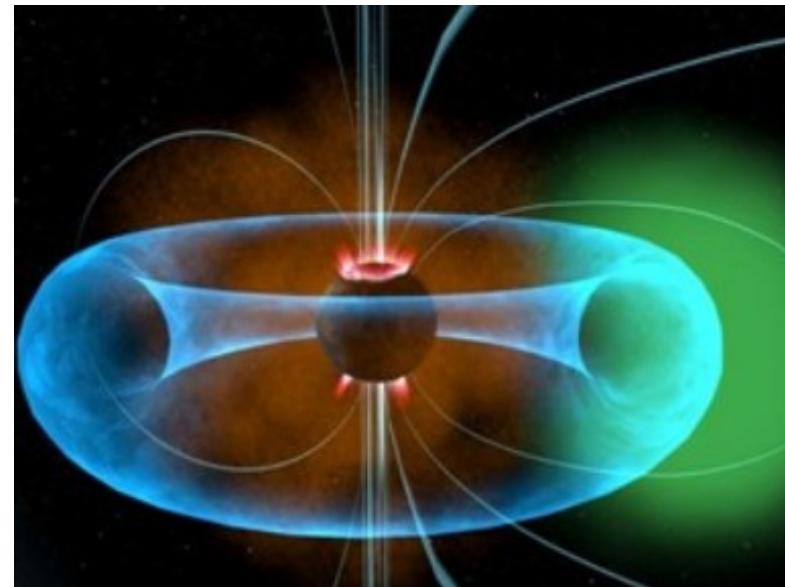
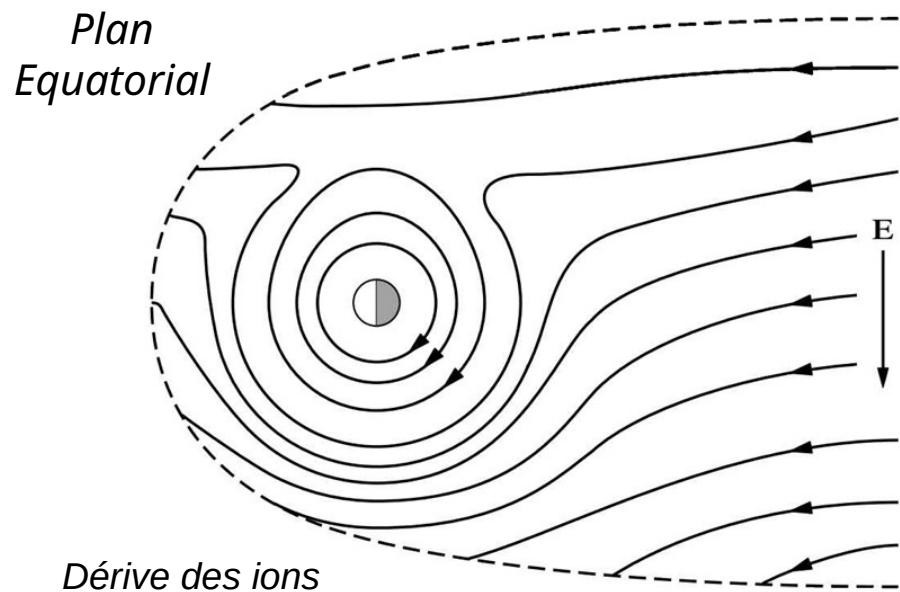
Imagerie de la plasmasphère

- Plasma froid avec une température typique inférieure à 1eV
- Densité élevée de l'ordre de 100's à 1000's particules par cm³
- Source : ionosphère sub-aurorale
- Composition : 77% H+, 22% He+, 3% O+, ...
- Raie He+ à 30.4 nm du Soleil diffusée de façon résonante par la plasmasphère
 - imagerie EUV de la plasmasphère
 - dynamique de la plasmapause



Données du satellite IMAGE, NASA

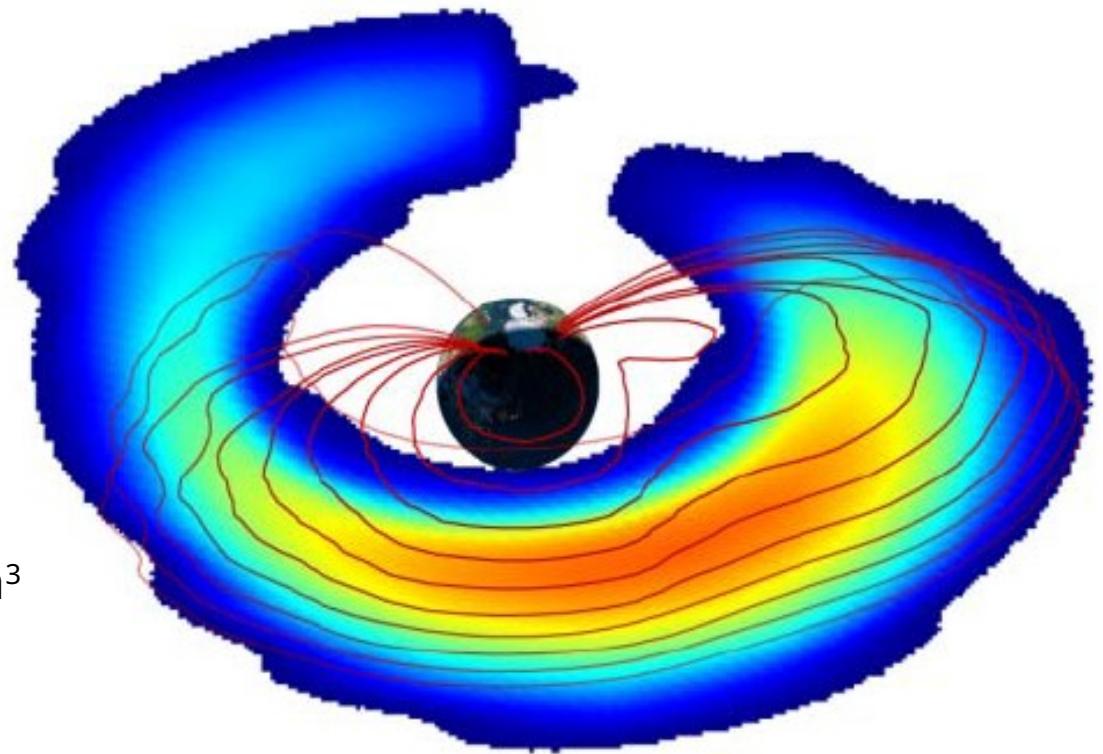
Le courant annulaire



- Circule autour de la Terre, centré sur le plan équatorial, quasi-circulaire, d'est en ouest
- Dérive de gradient/courbure des particules venant de la queue magnétique
- Ions de quelques keV à 200keV (dérive de gradient) $\sim 5 \cdot 10^5$ A en période calme
- Rôle limité des électrons dont le moment magnétique est plus faible
- ΔB associée le long du dipôle terrestre: composante H, mesurée par l'indice Dst, réduite
- Courant annulaire partiel côté soir dû à la convection

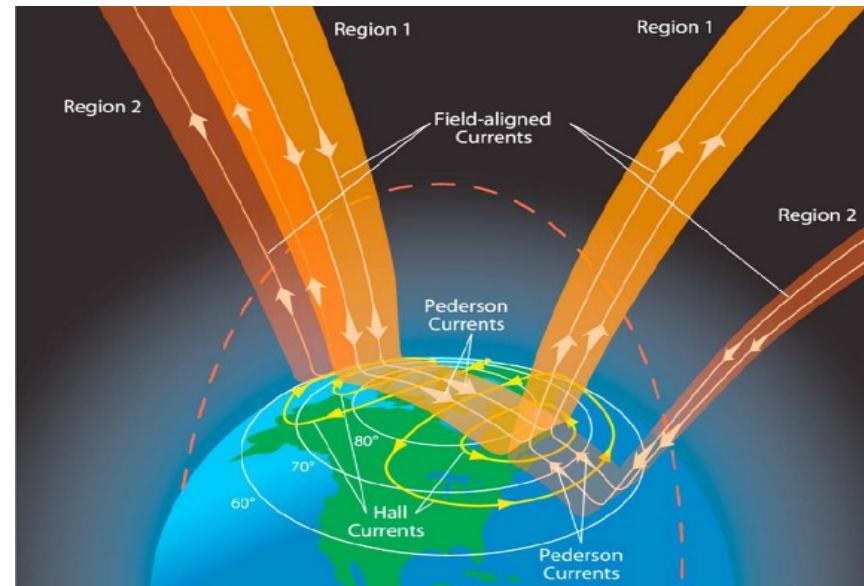
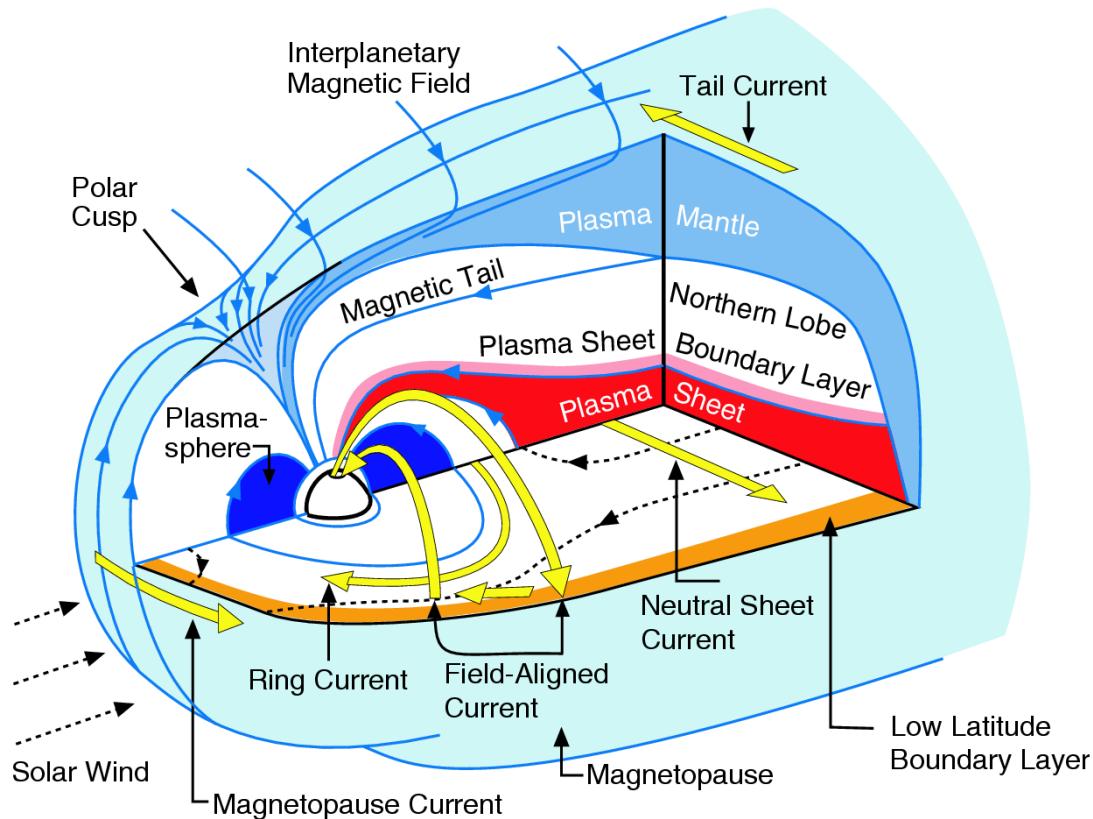
Imagerie du courant annulaire

- Les ions énergétiques (H^+ et O^+ de 10 keV à 300 keV) du courant annulaire subissent des collisions avec les neutres de l'exosphère terrestre (la géocouronne)
- échange de charge et création d'atomes neutres énergétiques détectés par des instruments de mesure dédiés
- Densité en période calme de 1 part/cm³ et de 10's part/cm³ en période active
- Reste la difficulté de suivre l'évolution dynamique du courant annulaire durant les périodes d'orages magnétiques



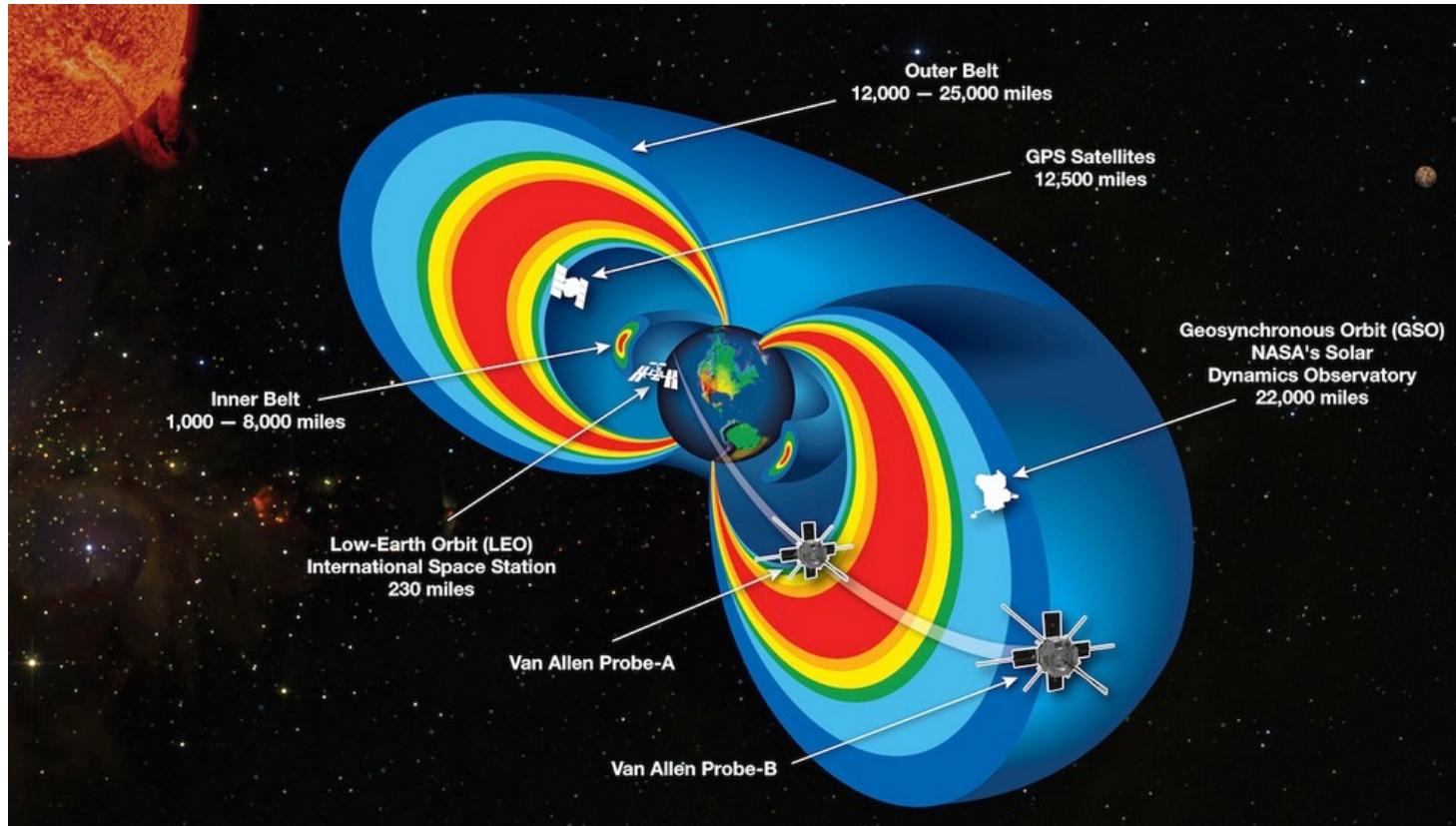
*Reconstruction de la pression cinétique
à partir des données IMAGE/HENA*

Systèmes de courants magnétosphériques



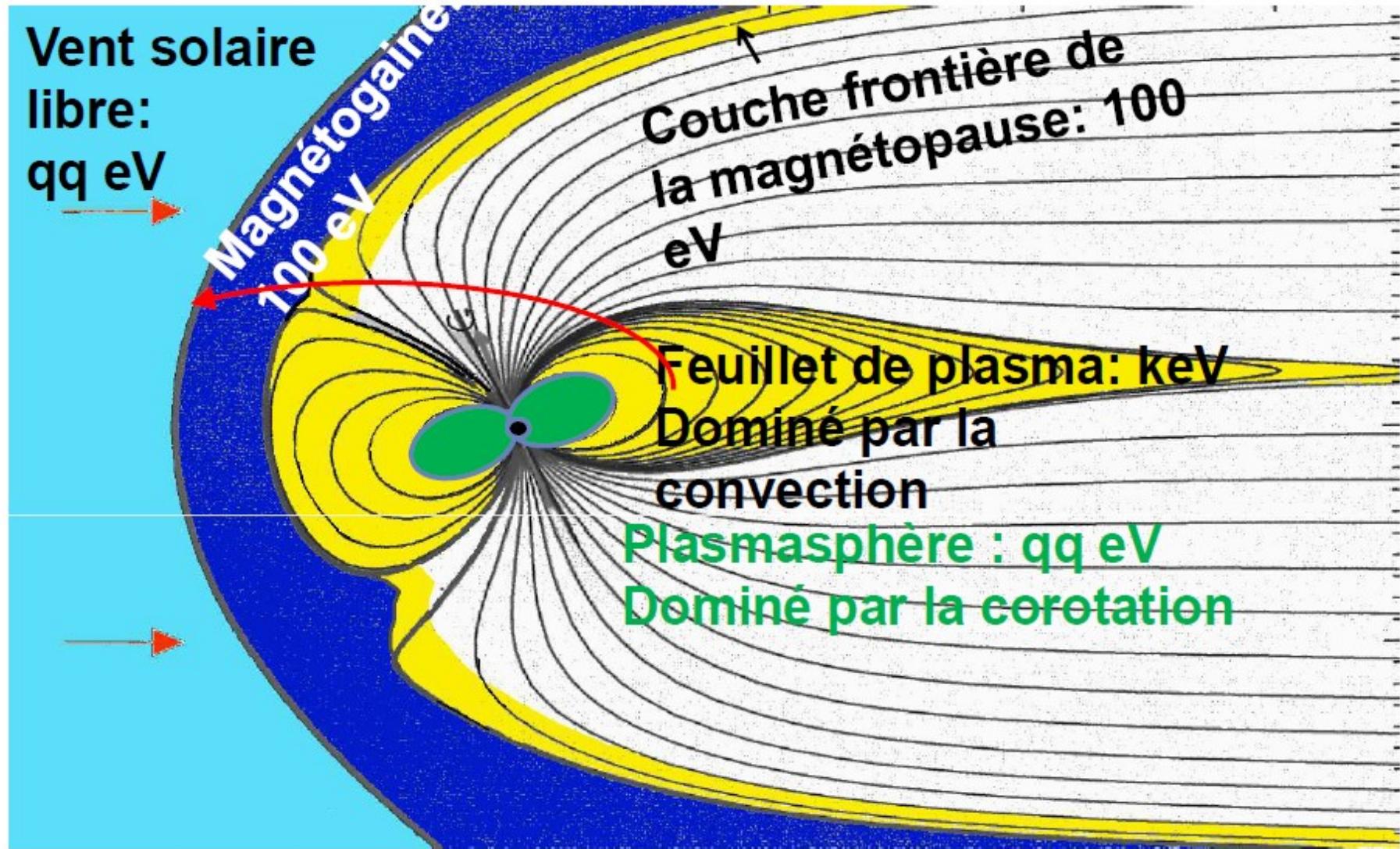
- En région 1, les courants alignés de Birkeland sont connectés à la LLBL
- En région 2, les courants alignés sont connectés au courant annulaire
- Les courants de Hall se referment via des courants alignés connectés notamment au courant annulaire « partiel »

Les ceintures de radiation



- Particules piégées dans le champ dipolaire, densité $\ll 1 \text{ cm}^3$, découvertes dès 1958
- Ceinture extérieure très étendue, de $3 \text{ à } 9 R_E$, électrons énergétiques jusqu'à 10 MeV
- Ceinture interne de $\sim 1000\text{km}$ à $2 R_E$, principalement ions $> 10 \text{ MeV}$ (rayons cosmiques piégés) et à très basse altitude ions jusqu'à $\sim 300 \text{ MeV}$ (ionisation par les rayons cosmiques des ions O+/N+...). Aussi des électrons de plus basse énergie.

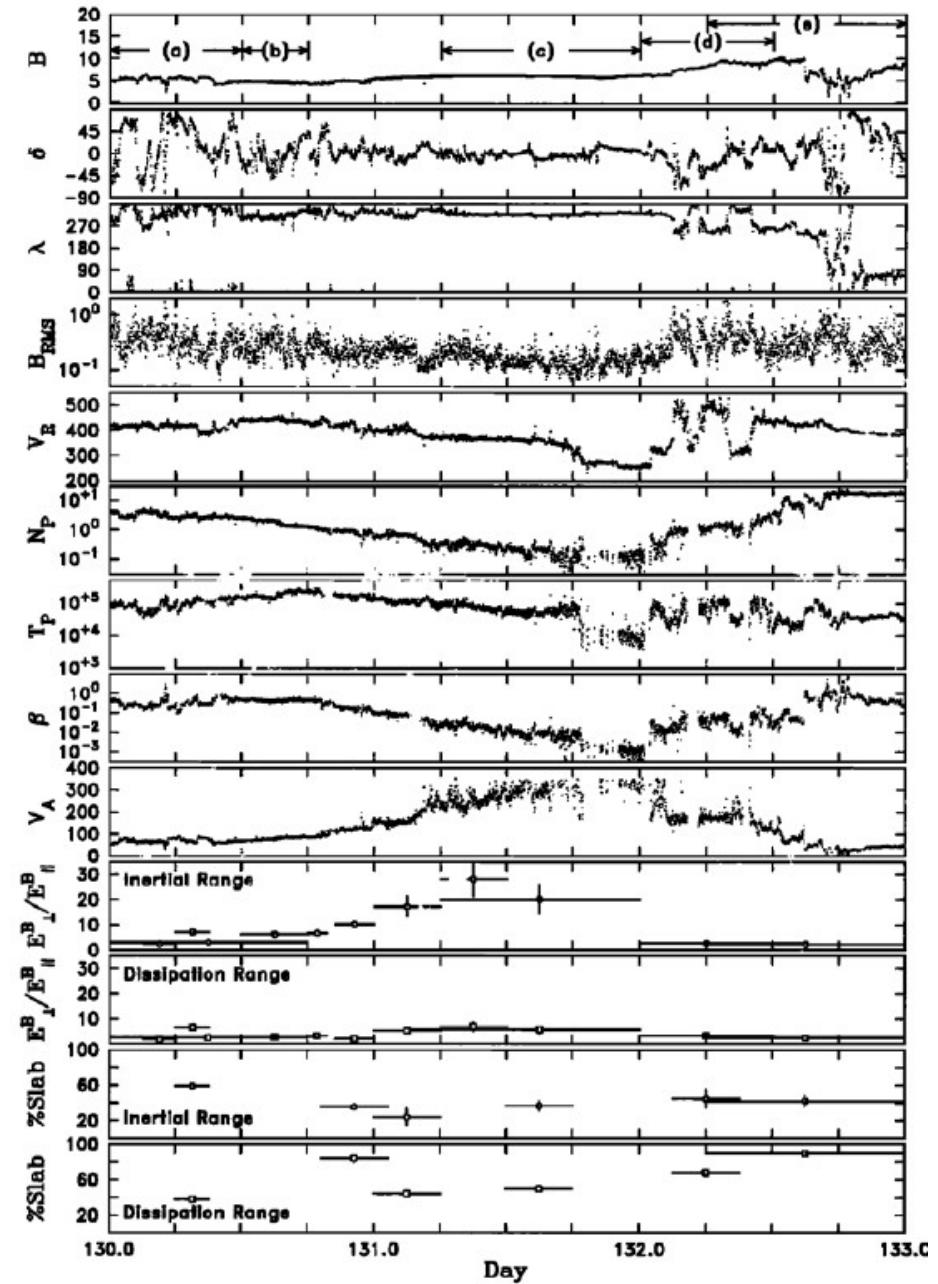
Quelles énergies dans la magnétosphère ?



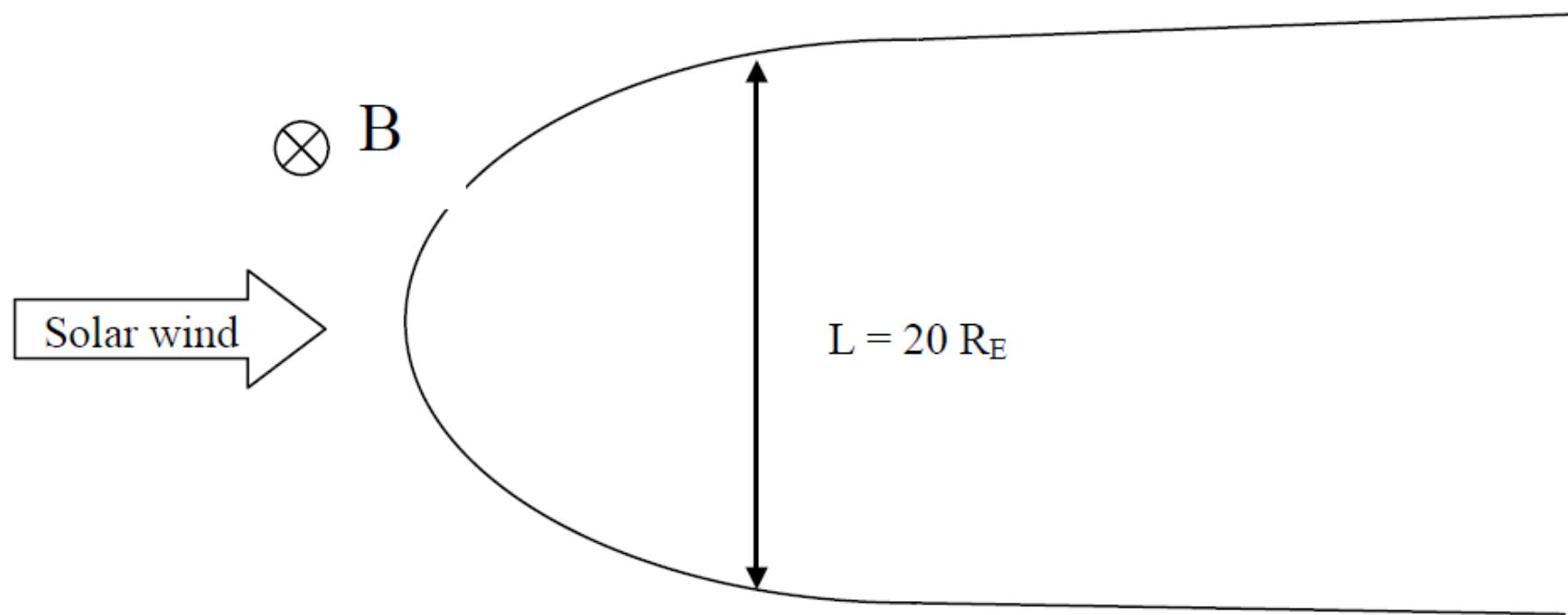
Travaux Pratiques 2

Structure magnétosphérique

De combien varie la distance de la magnétopause à la Terre lors de cet évènement exceptionnel de mai 1999 ?

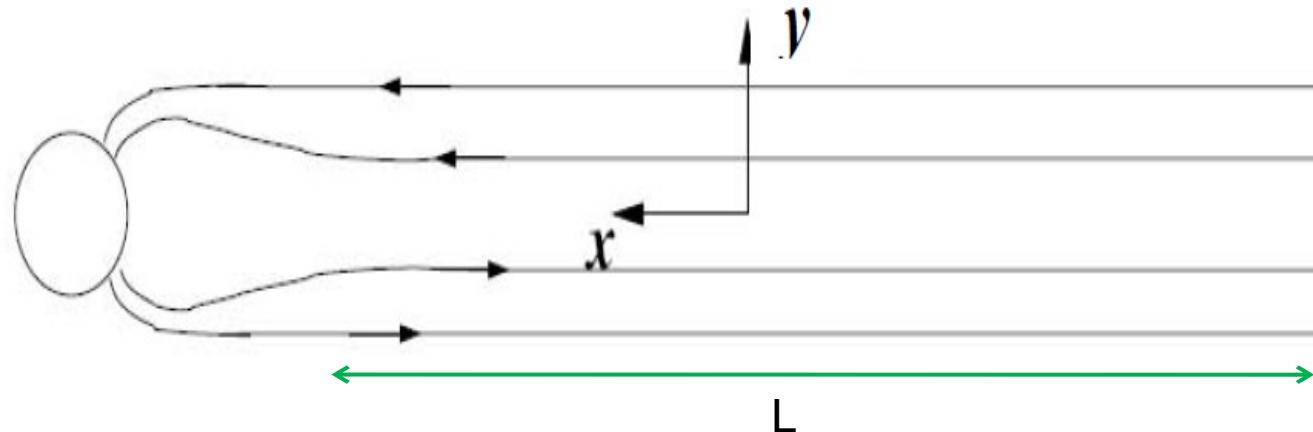


Quel est le saut de potentiel électrique Est-Ouest induit par un vent solaire de 350 km/s et un champ Bz de -7nT ?



Vue de dessus de la magnétosphère, dans le plan équatorial

Quel courant traverse la queue magnétosphérique ?



Modèle de champ magnétique

a : épaisseur de la couche de courant

$$\mathbf{B} = \begin{cases} -B_0 \hat{\mathbf{x}} & , \quad y < -a \\ B_0 \hat{\mathbf{x}} \frac{3a^2y - y^3}{2a^3} & , \quad -a \leq y \leq a \\ B_0 \hat{\mathbf{x}} & , \quad y > a \end{cases}$$

$$B_0 = 10 \text{ nT}, a = 2000 \text{ km}$$

L : longueur de la queue magnétique

L = 80 Rayons terrestres

La dynamique magnétosphérique



Laboratoire de Physique des Plasmas

IMAO 2022 (17-28/Oct.) – Abidjan, Côte d'Ivoire

Olivier Le Contel (compléments)

Cours préparé par M. Berthomier (IMAO 2019)

Laboratoire de Physique des Plasmas

CNRS, École Polytechnique et Sorbonne Université, Paris

Courriel: olivier.lecontel@lpp.polytechnique.fr



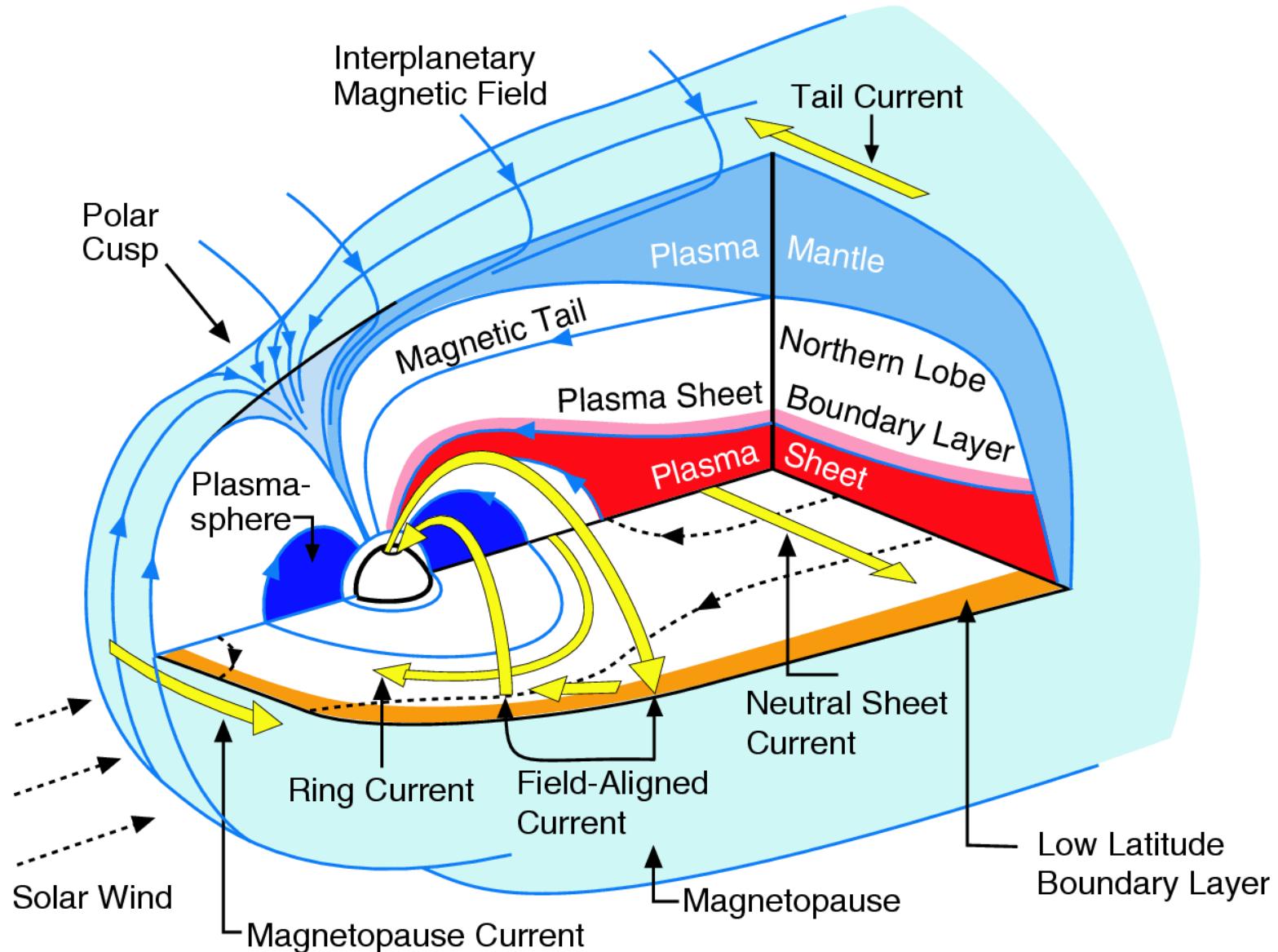
Objectif et plan du cours



L'objectif de ce cours est de présenter les différents modes de fonctionnement dynamiques de la magnétosphère terrestre afin de savoir les identifier dans un ensemble de données.

1. Les sous-orages magnétosphériques
2. Les orages magnétiques

Structure magnétosphérique



1. Les sous-orages magnétosphériques

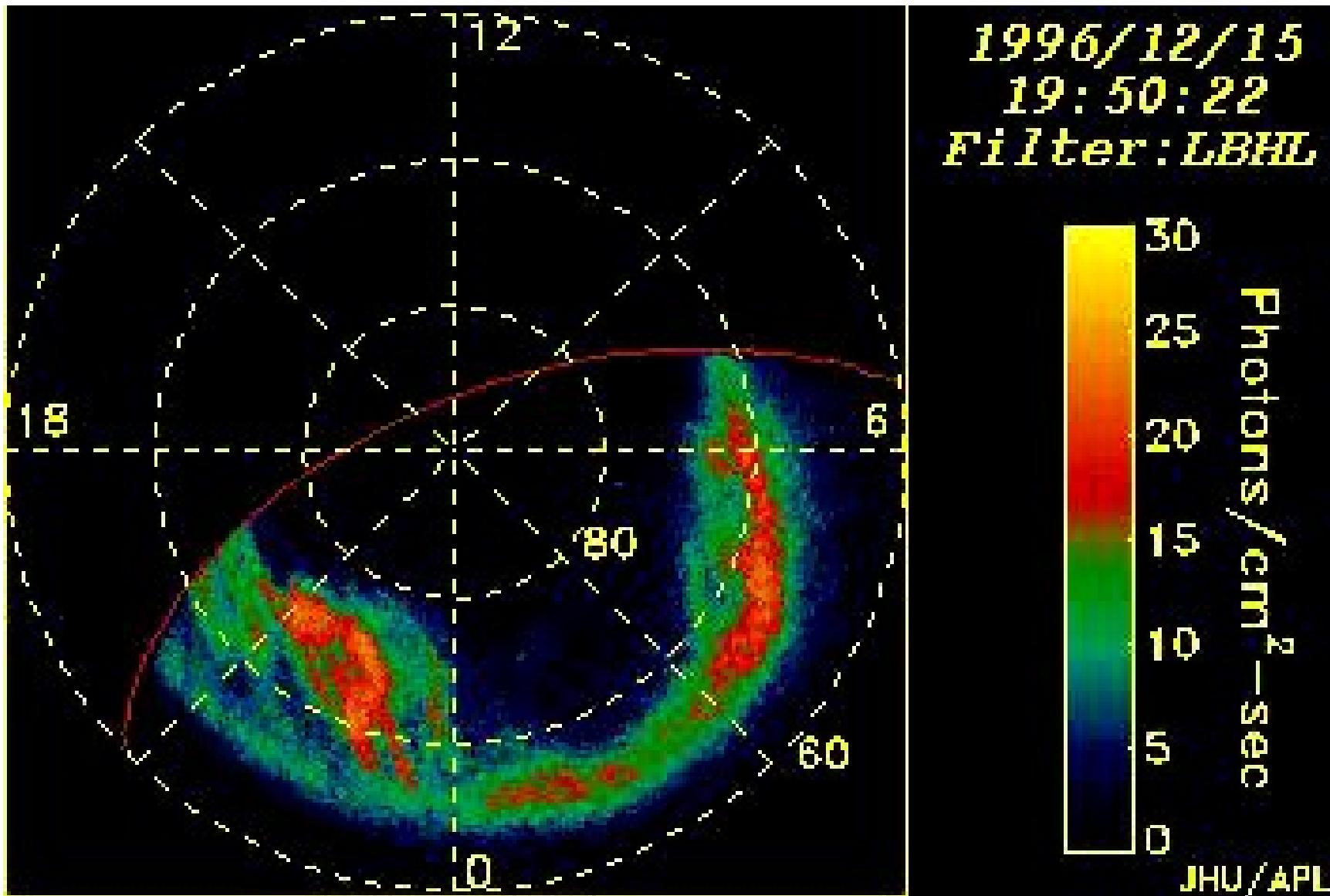
Définition conceptuelle :

Peut être considéré comme un mode global de transfert de l'énergie depuis le vent solaire (et finalement le Soleil) vers les hautes couches de l'atmosphère terrestre en région aurorale et vers la région du courant annulaire, la dynamique de ce transfert étant contrôlée par des processus de physique des plasmas à l'échelle cinétique.

Définition observationnelle :

Période de renforcement considérable des émissions aurorales dans l'ionosphère associée à des signatures magnétiques distinctives au sol, à un changement de topologie du champ magnétique et à la formation de jets de plasmas dans la queue magnétosphérique.

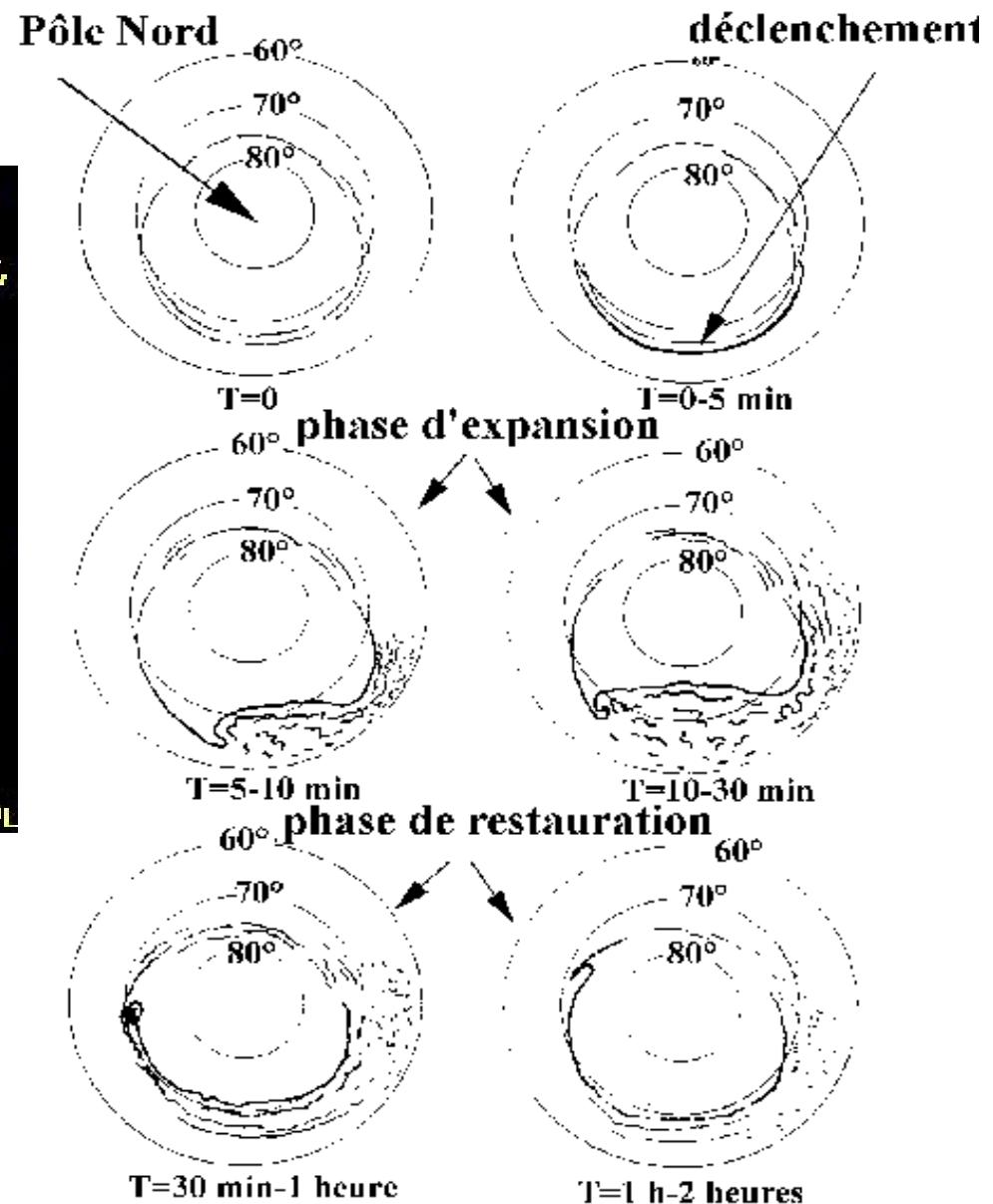
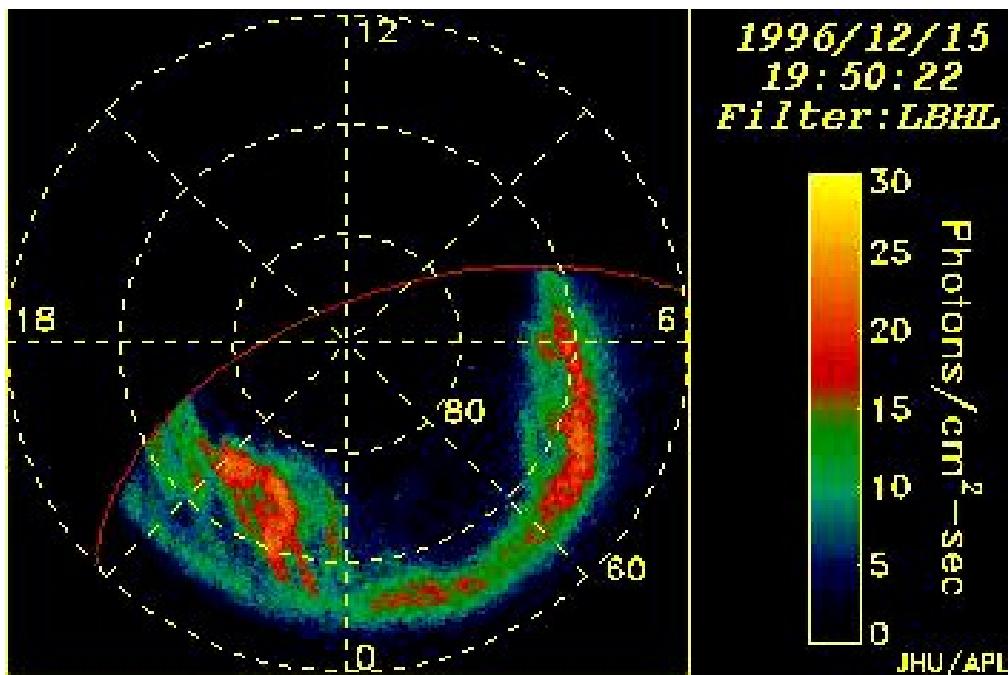
Le sous-orage auroral



Caméra UV du satellite POLAR, G. Parks, UC Berkeley

Les différentes phases d'un sous-orage

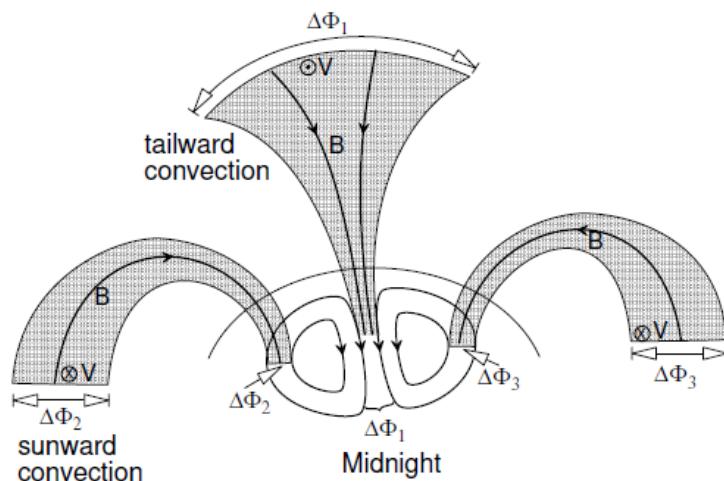
Akasofu, 1964



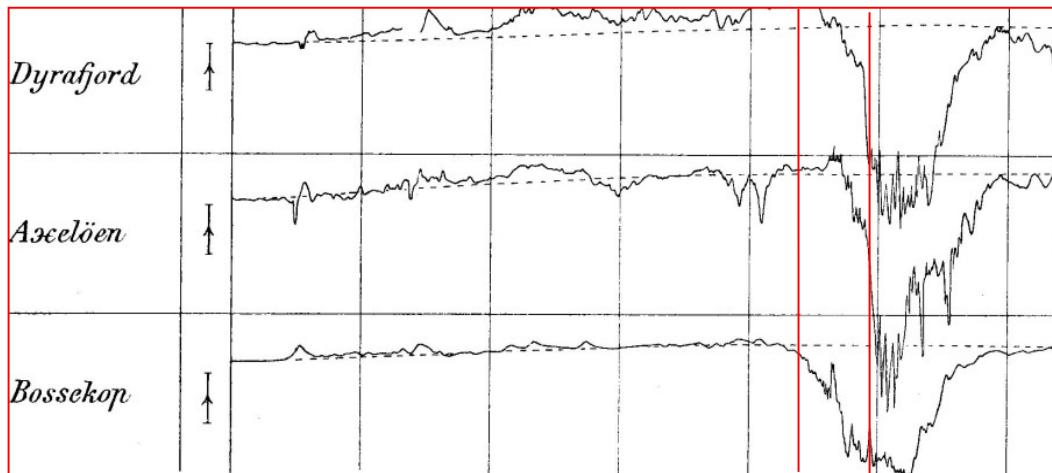
Caméra UV du satellite POLAR
G. Parks, UCB

La phase de croissance (30-60 minutes)

- Le cycle du sous-orage démarre avec une rotation de l'IMF vers le Sud
- La reconnexion se produit alors à la magnétopause côté jour avec une accumulation de flux magnétique dans la régions des lobes
- SuperDARN observe un élargissement de la calotte polaire et une augmentation du potentiel électrique qui la traverse
- Les satellites mesurent une forte augmentation du champ B dans les lobes et la couche de courant s'étire dans la queue magnétosphérique



Le déclenchement

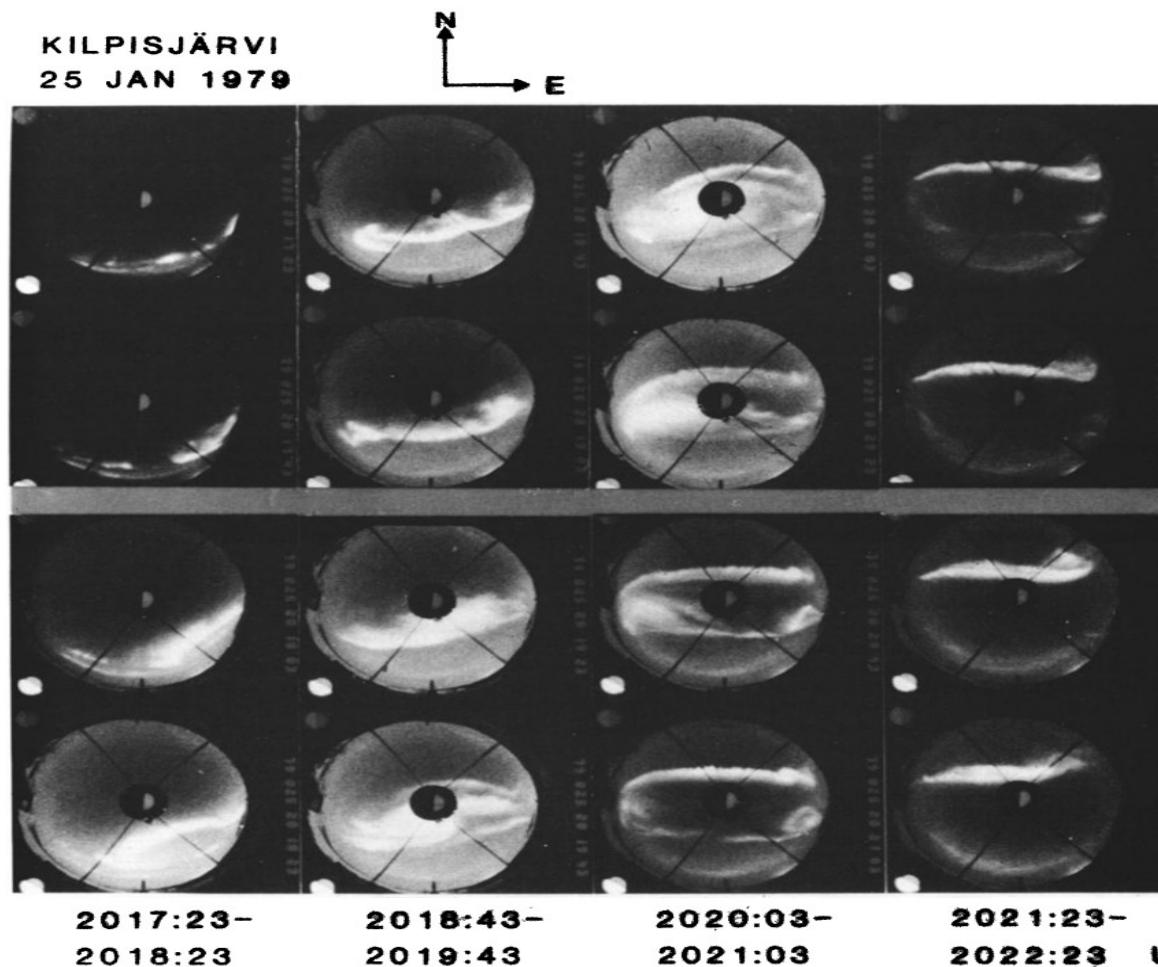


Perturbation magnétique H observée par 3 observatoires magnétiques différents

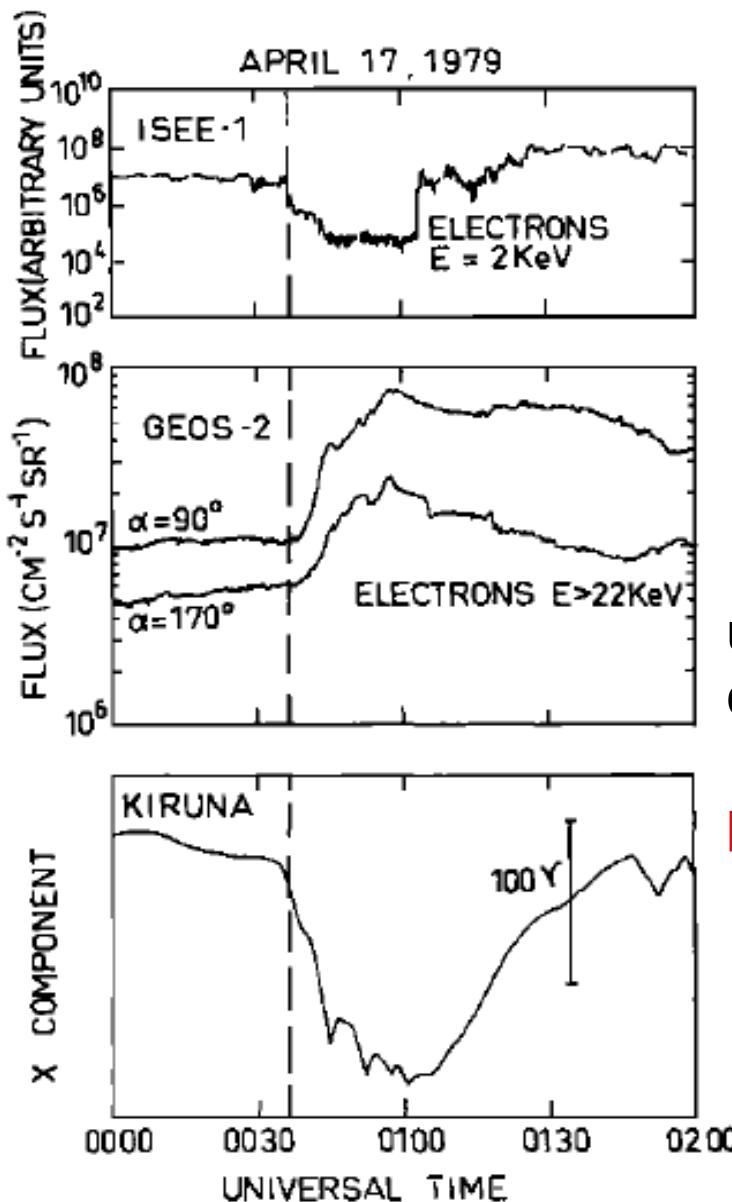
- A la fin de la phase de croissance, on observe à moins de $20 R_E$ un amincissement dramatique de la couche de courant, qui peut se réduire à 1000 km voire à 500 km d'épaisseur, soit 10% de sa valeur nominale
- La distance séparant l'arc discret situé le plus vers l'équateur et la région des aurores diffuses se réduit dans la région « minuit » de l'ovale auroral
- Le déclenchement des sous-orages est un phénomène explosif :
- l'arc discret situé le plus vers l'équateur s'intensifie de manière considérable
- « A peu près » lors du déclenchement, augmentation brutale de l'indice AE

La phase d'expansion (30-60 minutes)

- L'arc auroral qui s'est « allumé » dérive vers le Nord et vers l'Ouest = « westward traveling surge »
- Augmentation du courant de Hall dans l'ionosphère (électrojet auroral) et des courants de Birkeland => couplage spécifique Magnétosphère-Ionosphère



Injection de particules énergétiques

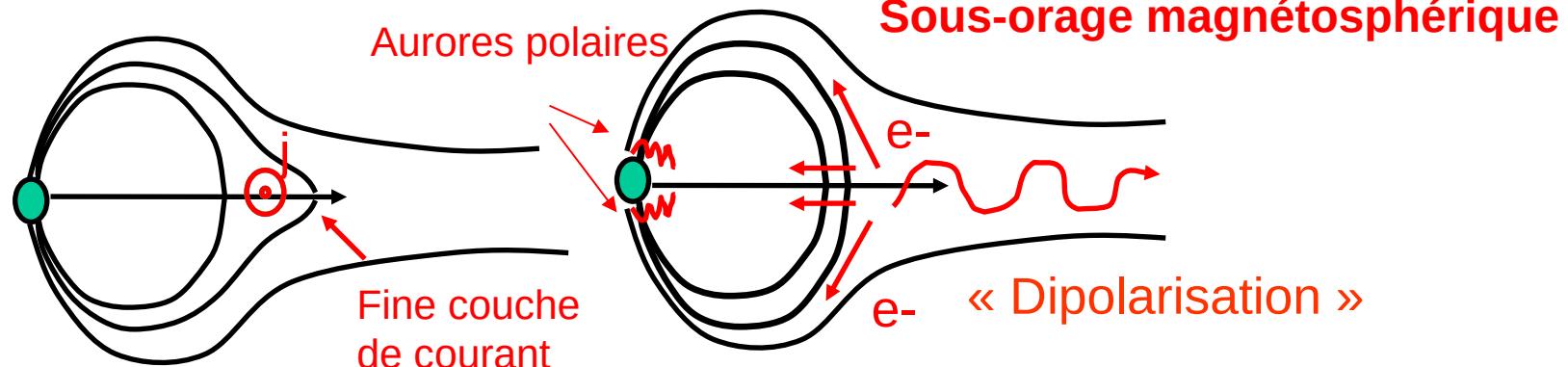


Amincissement de la couche de courant, injections et dipolarisations peuvent être interprétées comme les effets de la même cause:

une **réduction brutale de courant** entre l'orbite de GEOS-2 et celle d'ISEE-1 vers $10 R_T$
ou bien
la reconnexion du champ magnétique vers $20 R_T$

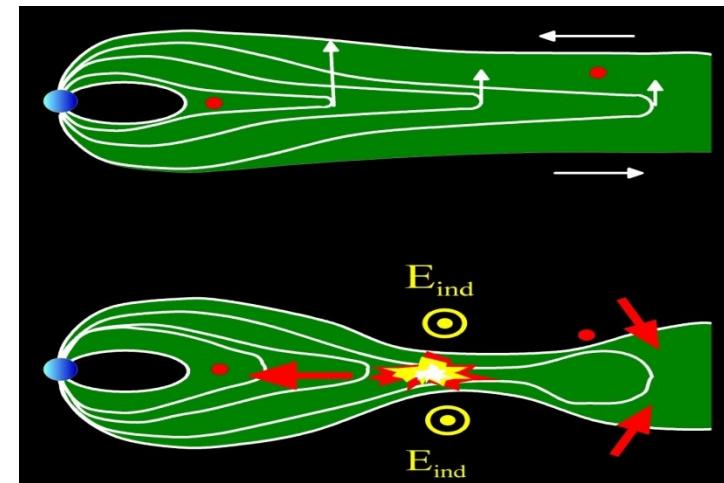
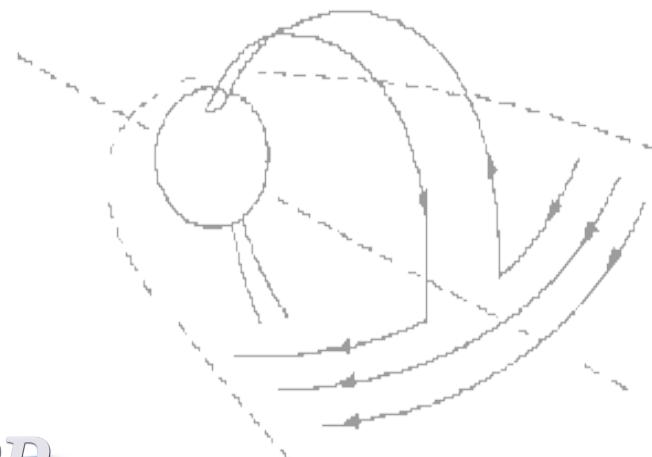
- Deux catégories de modèles pour expliquer
 - les sous-orages magnétosphériques (I)

Interruption
du courant $X \sim 7-15$ Rt



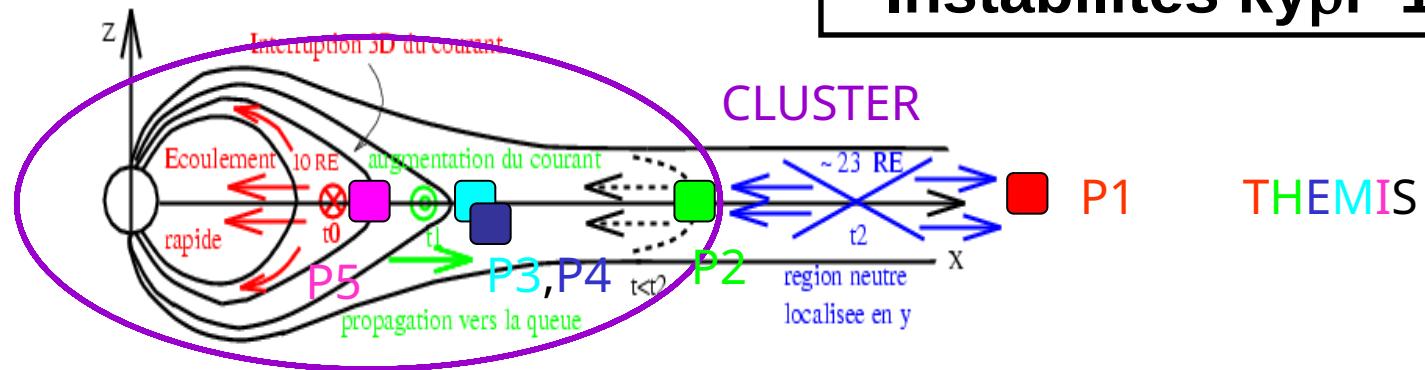
- Fermeture des courants
- dans l'ionosphère

Reconnexion dans la queue $X \sim 23$ Rt



- Deux catégories de modèles pour expliquer
 - les sous-orages magnétosphériques (II)

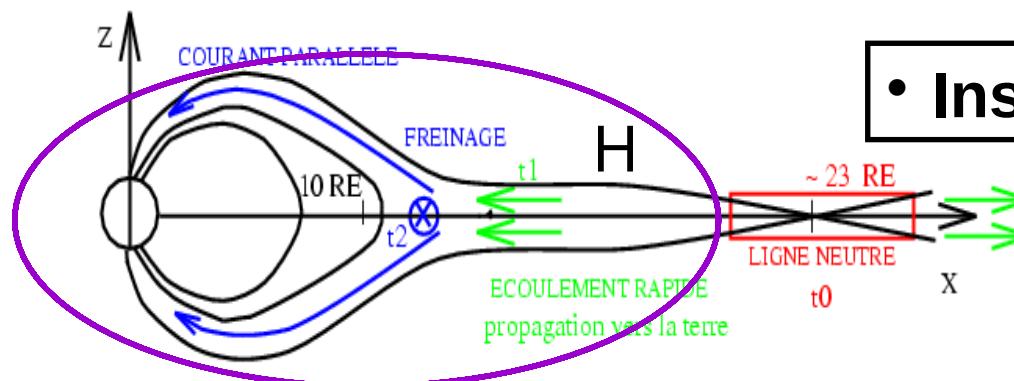
○ Déclenchement entre 7 et 15 R_T



- Instabilités $k_y \pi \sim 1$

Erickson et al. (2000), Kan et al. (1993), Lui et al. (1991),
Roux et al. (1991) , Lui et al., (2008), Liu et al., (2012) ...

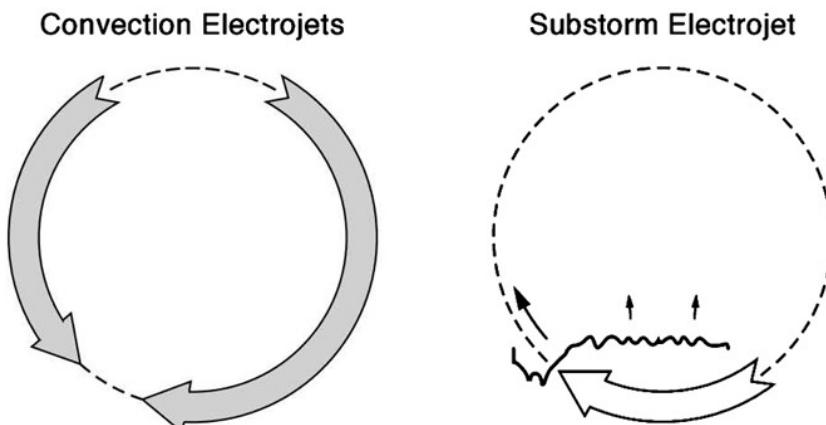
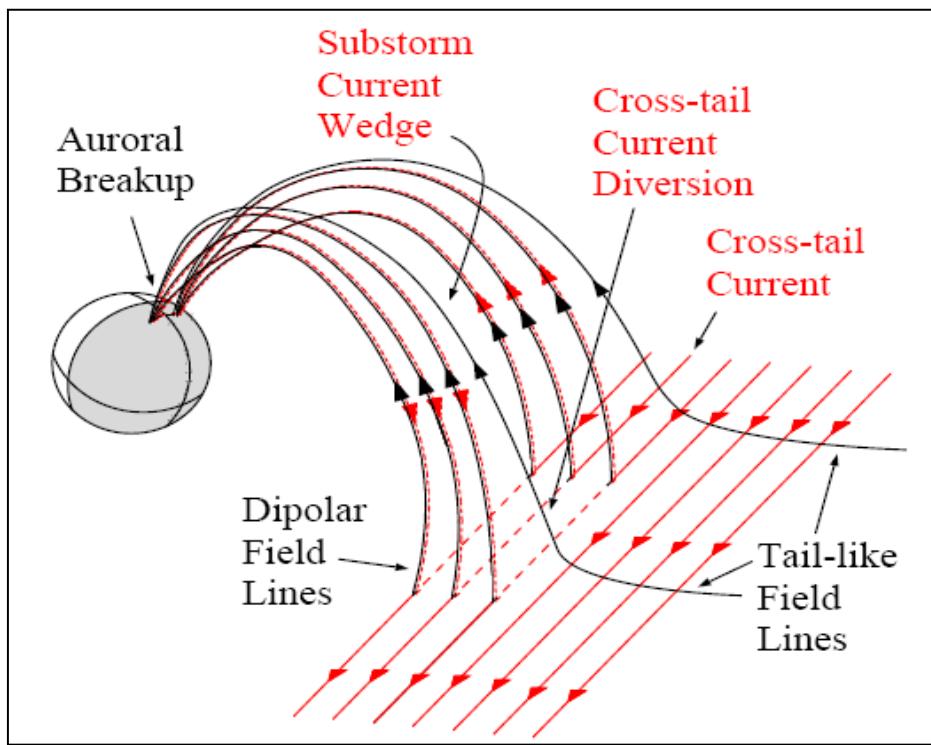
○ Déclenchement entre 20 et 30 R_T



- Instabilités $k_x H < 1$

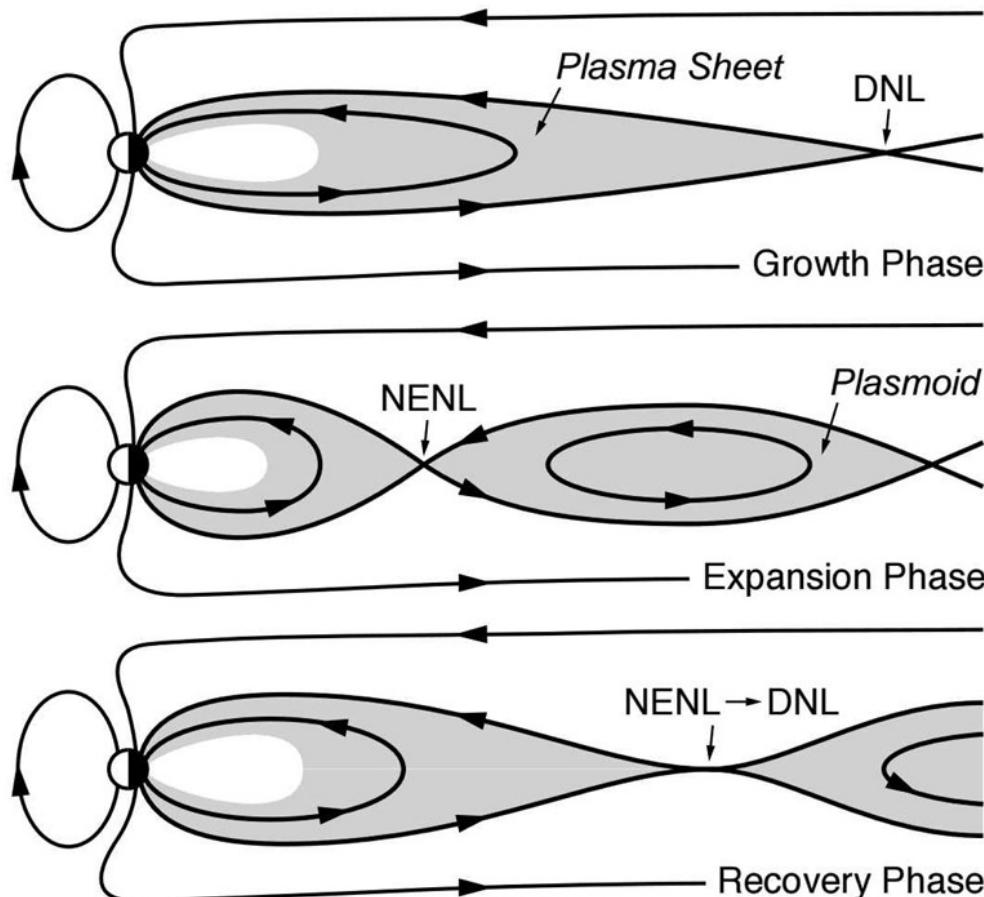
Baker et al. (1996), Birn et al. (1999), Nagai et al. (2000),
Sergeev et al. (1995), Shiokawa et al. (1998) , Angelopoulos et al., (2008),
Sitnov and Schindler, (2010° ...

L'instabilité de la couche de courant vers $10 R_T$



- Tout se passe comme si il y avait une forte réduction du courant matin-soir de la queue magnétique
- On peut connecter les observations dans l'ionosphère à celles réalisées dans la magnétosphère en supposant que le courant est partiellement détourné vers l'ionosphère via des courants alignés intenses et localisés
- Ces courants parallèles sont observés dans les régions aurorales où ils entraînent l'accélération des électrons créant les aurores les plus intenses. La grande variété des formes aurorales est liée à la filamentation du courant

Le modèle de la ligne neutre proche



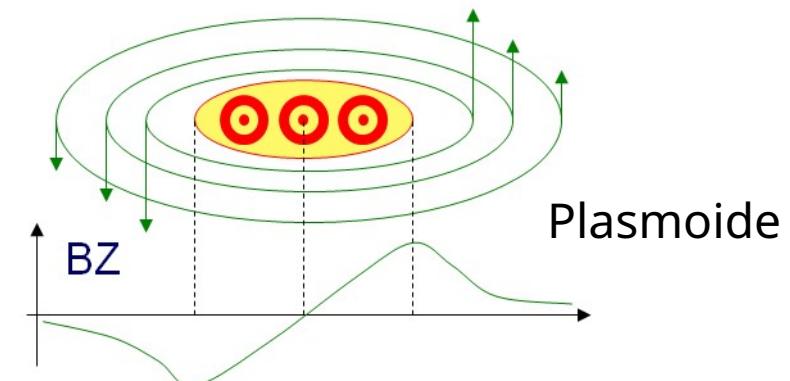
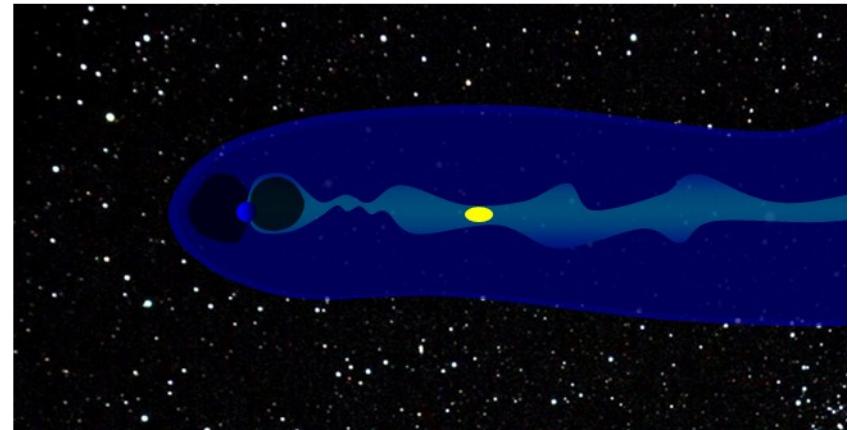
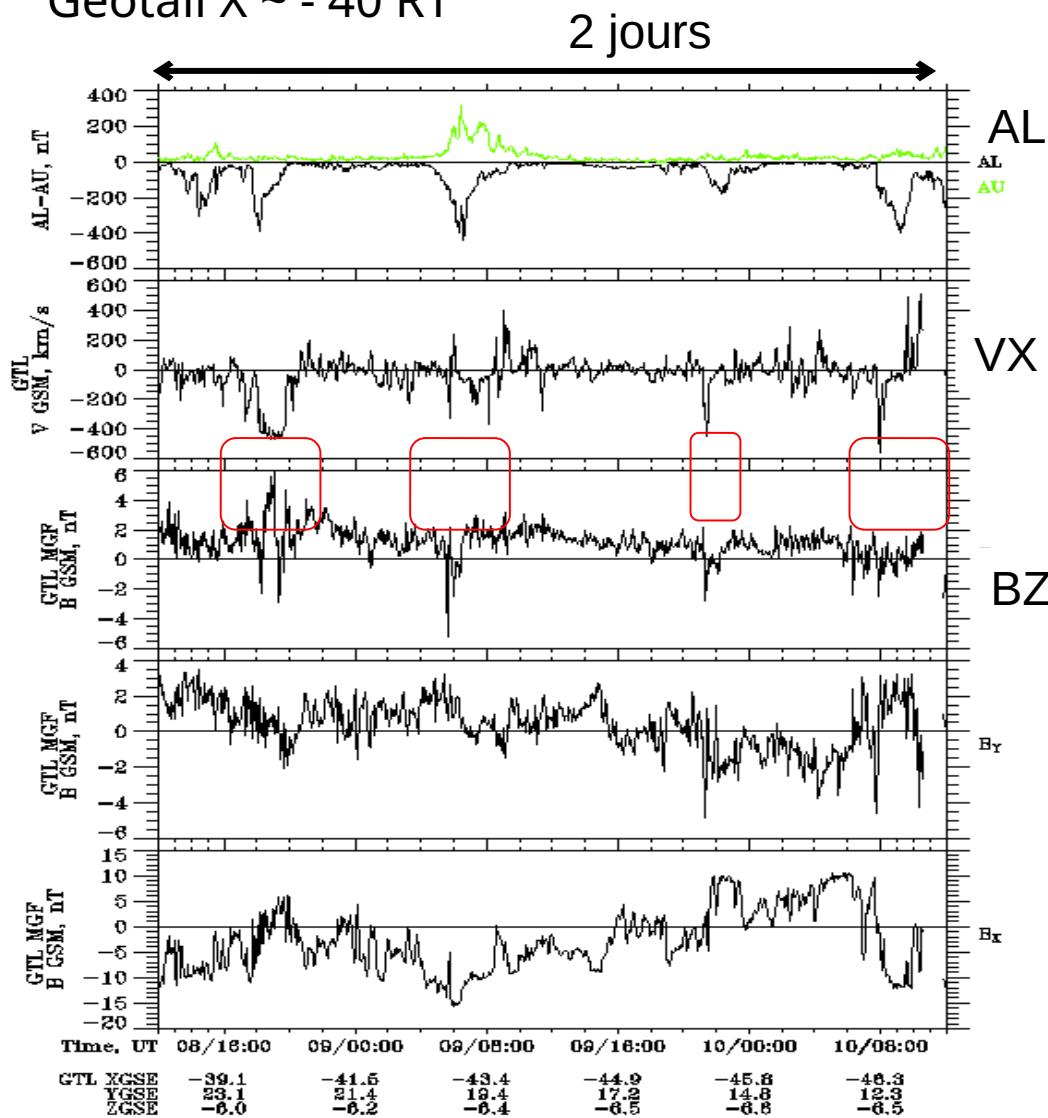
NENL: Near Earth Neutral Line

DNL: Distant Neutral Line

- Site de reconnexion dans la queue lointaine existant entre 100 et 200 R_T
- Suite à un retournement de IMF B_z , site de reconnexion proche de la Terre (NENL) et propagation d'un front de dipolarisation vers la Terre
- Les particules sont injectées vers la Terre et accélérées par le mécanisme bétatron
- Des flots rapides sont émis durant la phase d'expansion et la NENL devient DNL
- Un plasmoïde est éjecté durant la restauration de l'état d'équilibre initial
- La couche de plasma s'épaissit et revient à son état d'équilibre initial

Une observation clé: l'éjection de plasmoides

Geotail X ~ - 40 RT



Comment expliquer ces plasmoides ?

La mission THEMIS

IDPU: Instrument Data Processor Unit

SPB : Spin Plane Booms (4x)

AXB : Axial Booms (2x)

SST : Solid State Telescope (2x)

ESA : Electrostatic Analyzer

FGM : Fluxgate Magnetometer

SCM : Search Coil Magnetometer

+ THEMIS GBO

