

Master de Planétologie : UE 12

Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr

Plan

- 1. Le vent solaire (bref rappel)**
- 2. Structure et dimensions des magnétosphères**
- 3. Structure et dynamique de l'ionosphère (bref rappels)**
- 4. Circulation du plasma magnétosphérique**
- 5. Sources et puits du plasma magnétosphérique, transport, accélération**
- 6. Electrodynamique du système ionosphère-magnétosphère-vent solaire**
- 7. Electrodynamique d'un système magnétosphère-satellite**
- 8. Physique et émissions électromagnétiques aurorales**
- 9. Le cas des exoplanètes**

Références

Ouvrages généraux

- Encrenaz, T., J. -P. Bibring, M. Blanc, A. Barucci, F. Roques & P. Zarka, *Le système solaire (3^{ème} édition)*, Savoirs Actuels, EDP-Sciences / CNRS-Éditions, Paris, **2003**.
→ notamment chapitres 5, 8, 10. Introduction aux ionosphères et magnétosphères.
- Kivelson, M. G. & C. T. Russell, eds., *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, **1995**.
→ Historique, Soleil, Vent Solaire, Ionosphères, Magnétosphères, etc.
- Kelley, M. C., *The Earth's Ionosphere*, Academic Press, **1989**.
→ notamment chapitres 1, 2, 6. Ionosphère et magnétosphère terrestre.
- Celnikier, L. M., *Basics of Cosmic Structures*, Frontières, Gif-sur-Yvette, **1989**.
→ notamment chapitres 2, 12.
- Lilensten, J. & P.-L. Blelly, *Du Soleil à la Terre*, EDP Sciences, **2000**.
→ Ionosphère et magnétosphère terrestre.

Ouvrages plus spécifiques

→ cf. chapitres « plasmas » & « magnetospheres »

- Dessler, A. J., ed., *Physics of the Jovian Magnetosphere*, Cambridge University Press, New York, **1983**.
- Gehrels, T. & M. S. Matthews, eds., *Saturn*, University of Arizona Press, Tucson, **1984**.
- Bergstralh, J. T. *et al.* eds., *Uranus*, University of Arizona Press, Tucson, **1991**.
- Cruikshank, D. & M. S. Matthews, eds., *Neptune and Triton*, University of Arizona Press, Tucson, **1995**.
→ post-Voyager
- Bagenal, F. *et al.* eds., *Jupiter : The Planet, Satellites, and Magnetosphere*, Cambridge Univ. Press, **2004**.
→ post-Galileo
- Blanc, M., *Magnetospheric and plasma science with Cassini-Huygens*, in The Cassini-Huygens mission Vol. 1, Space Sci. Rev., 104, pp. 253-346, **2002**.
- Dougherty, M. *et al.* eds., *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer Verlag, Dordrecht, sous presse, **2009**.
→ pre- & post-Cassini,
- Encrenaz, T. *et al.* eds., *The Outer Planets and their moons*, Space Sci. Rev., 116, 1-2, ISSI series, Bern, Suisse, Springer, **2005**.
→ post Galileo/Cassini
- Zarka, P., *Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions*, Planet. Space Sci., 55, 598-617, **2007**.
→ exoplanètes
(+ Ecoles de Goutelas 2005: <http://astro.u-strasbg.fr/goutelas/g2005> , Les Houches 2008, <http://www-Laog.Obs.Ujf-Grenoble.Fr/heberges/Houches08/>)

Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr

1. Le vent solaire (bref rappel)

1.1 Structure générale

1.2 Le vent solaire à l'orbite de la Terre

1.3 Le vent solaire aux autres distances planétaires

1. Le vent solaire (bref rappel)

Gel B/plasma

*Loi d'Ampère
+ Stokes*

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{B} = \mu_o \mathbf{j} + 1/c^2 \partial \mathbf{E} / \partial t \\ \Rightarrow \int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= \mu_o \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s} \end{aligned} \quad [1]$$

Loi d'Ohm

$$\mathbf{j} \approx \sigma \mathbf{E}' = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad [2]$$

← dans le repère du plasma

*Absence de monopole
(charge) magnétique
→ conservation du flux*

$$\begin{aligned} \text{div } \mathbf{B} &= \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \phi_{S \text{ fermée}} &= \int_{S \text{ fermée}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \end{aligned} \quad [3]$$

Loi de Faraday (induction)

$$\text{rot } \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \quad [4]$$

On élimine $\mathbf{j}$ entre [1] et [2], et on multiplie par $\nabla \times$

$$\Rightarrow (1/\mu_o \sigma) \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \times \mathbf{E} + \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})$$

on utilise l'identité $\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{A})$, [3] et [4]

$$\Rightarrow -\eta \nabla^2 \mathbf{B} = -\partial \mathbf{B} / \partial t - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{V})$$

avec $\eta = (1/\mu_o \sigma) = \text{diffusivité magnétique}$, d'où

$$\Rightarrow \boxed{\partial \mathbf{B} / \partial t = \eta \nabla^2 \mathbf{B} - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{V})}$$

Le 1^{er} terme de droite = diffusion, le 2^{ème} = convection de $\mathbf{B}$ par le plasma (à $\mathbf{V}$)

On montre que comme σ est très grand dans un plasma sans collision (donc η très petit), et $\nabla \sim 1/L$,

$$\eta \nabla^2 \mathbf{B} \ll \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad \text{d'où} \quad \partial \mathbf{B} / \partial t \approx - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{V})$$

et finalement

$$\mathbf{E} = - \mathbf{V} \times \mathbf{B}$$

*Ce résultat exprime que la seule variation de $\mathbf{B}$ est sa convection par/avec le plasma
→ le plasma et le champ magnétique sont gelés ensemble, et les seuls champs électriques apparaissant dans le milieu sont liés à la convection $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ du plasma.*

Pour un plasma au repos ($\mathbf{V}=0$), le champ $\mathbf{E}$ est nul, et il y a donc quasi-neutralité.

En conséquence du gel, les lignes de $\mathbf{B}$ sont aussi équipotentielles électriques ($\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$).

Notes :

- on démontre que pour un plasma complètement ionisé, $\sigma \sim 10^{-2} T^{3/2}$

($\sim 10^5 \text{ (ohm.m)}^{-1}$ pour $T \sim 10^5 \text{ K}$)

- le temps caractéristique de diffusion de $\mathbf{B}$ / plasma (hors convection) se déduit de :

$$\eta \nabla^2 \mathbf{B} = \partial \mathbf{B} / \partial t \rightarrow \eta B / L^2 \sim B / \tau \rightarrow \tau \sim \mu_0 \sigma L^2$$

(e.g. pour la couronne solaire, $T \sim 10^6 \text{ K} \rightarrow \sigma \sim 10^7$, & $L \sim 10^9 \text{ m} \rightarrow \tau \sim 4 \times 10^{11} \text{ ans}$!)

1.1 Structure générale

Gel $\rightarrow$ le plasma et B se déplacent ensemble ; les mouvements sont dominés par la composante qui possède la plus forte densité d'énergie.

β du plasma $= NkT / (B^2/2\mu_0)$ définit la domination champ / plasma gelés.

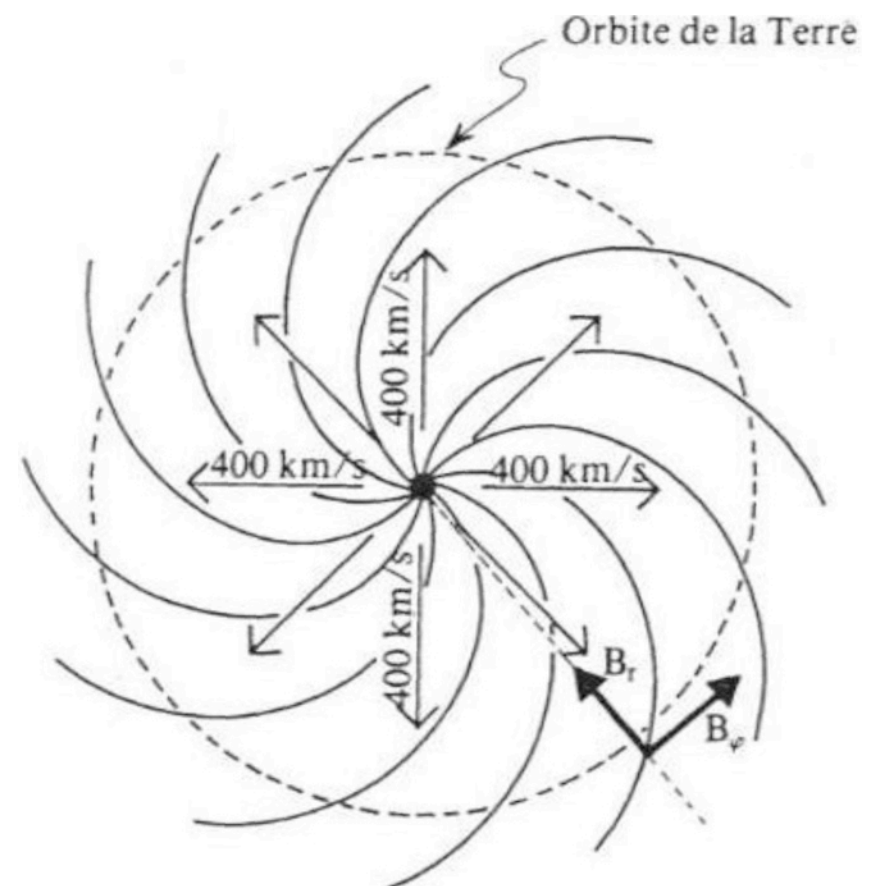
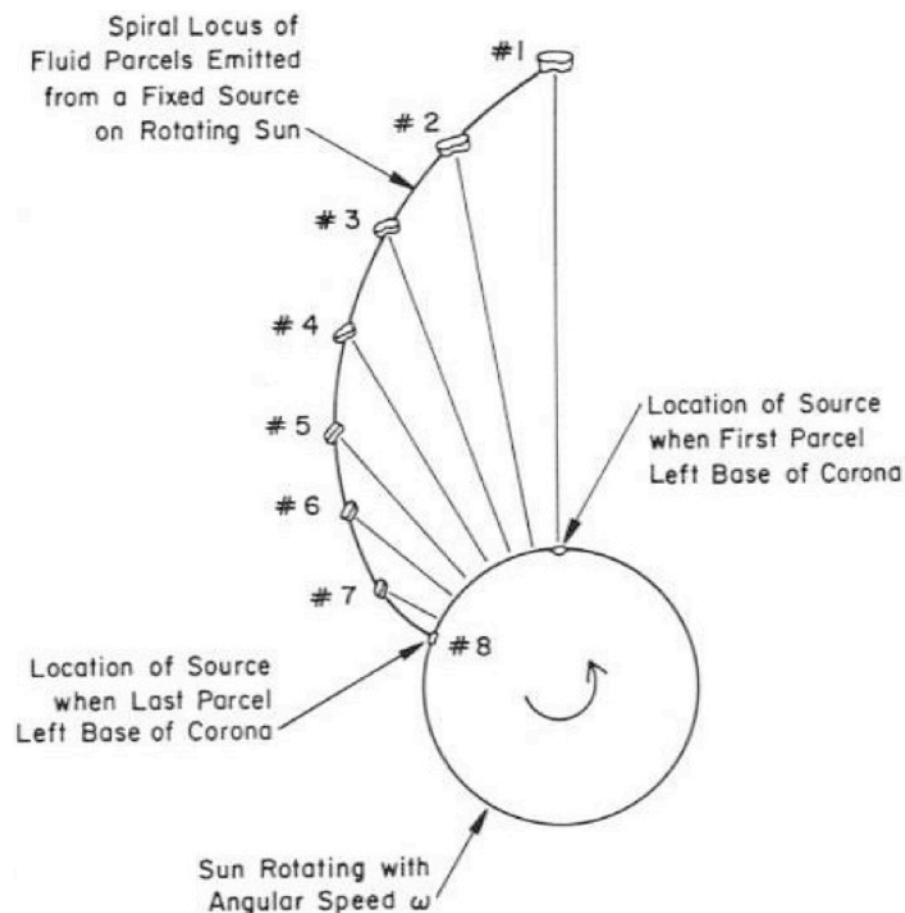
Dans la couronne solaire :

$$B^2/2\mu_0 \sim 10^{-11} \text{ Pa}$$

$$2NkT = 3 \times 10^{-11} \text{ Pa}$$

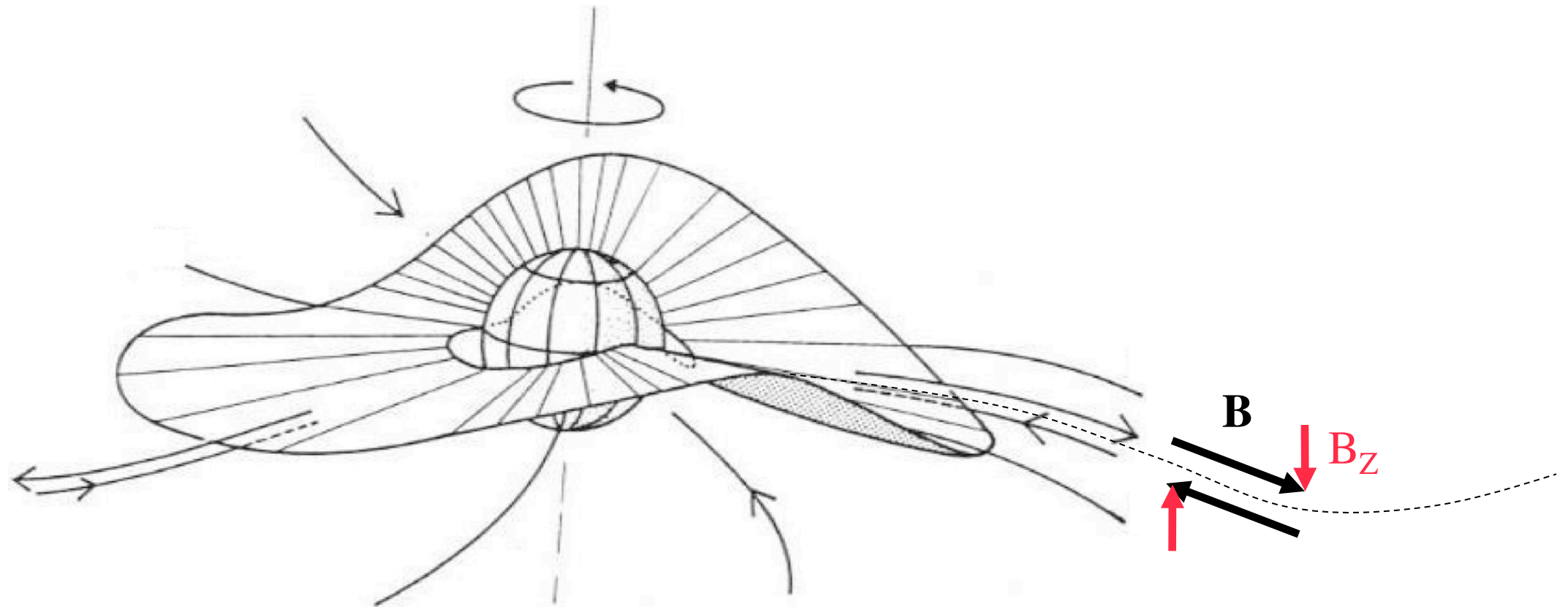
$$NmV^2/2 \sim 10^{-9} \text{ Pa}$$

- $\rightarrow$ le plasma entraîne B solaire, dont les pieds restent ancrés dans la photosphère
- $\rightarrow$ expansion + rotation solaire ($P_{\text{sid}} = 25$ jours à l'équateur ; $P_{\text{synodique/Terre}} \sim 27$ jours)
- $\rightarrow$ spirale d'archimède de pas 6 UA ($= 400 \text{ km/s} \times 25$ jours).



+ angle de plusieurs ° (jusqu'à 30°, variable avec le cycle solaire) entre axe de rotation ($\perp$ écliptique) et axe magnétique solaires

→ structure 3D en « jupe de ballerine », une planète baignant alternativement dans des secteurs de VS de polarité $B_z > 0$ ou < 0 .



+ jets rapides ($V \geq 600$ km/s, provenant des trous coronaux équatoriaux), interagissant avec le VS lent pour donner des zones de compression évoluant en chocs (CIR),

+ éjections de masse coronale (CME) évoluant aussi en chocs.

1.2 Le vent solaire à l'orbite de la Terre

Paramètres typiques (*avec variations d'un facteur ~2 possibles*)

$$V = 400 \text{ km/s}$$

$$T = 2 \times 10^5 \text{ K}$$

$$N = 5(-10) \text{ cm}^{-3} \text{ (} f_{pe} = 20-30 \text{ kHz)}$$

$$B = 4 \text{ nT} \quad (B_R \sim B_\phi \sim 3 \text{ nT} ; \text{ spirale d'archimède à } 45^\circ)$$

$$V_S = (\gamma P / \rho)^{1/2} = (\gamma k T / m)^{1/2} \sim 50-60 \text{ km/s}$$

$$V_A = B / (\rho \mu_o)^{1/2} \sim 40 \text{ km/s}$$

$$(\gamma = 5/3)$$

pour m et ρ : 95% H, 4% He, 1% ions lourds $\rightarrow m \sim 1.1 m_p$)

1.3 Le vent solaire aux autres distances planétaires

$$V \sim R^{-2/7}, T \sim R^{-2/7} \quad [R \text{ en UA}]$$

($\rightarrow$ facteur $\sim 1/2$ entre 1 et 10 UA)

$$N \sim R^{-2} \quad (\text{conservation de la masse})$$

$$B_R \sim R^{-2} \quad (\text{conservation du flux magnétique})$$

$$B_\varphi \sim R^{-1} \quad (B_R/B_\varphi = V/\Omega R)$$

$$\rightarrow B \sim R^{-1}$$

(à l'orbite de Jupiter, B est à 11° de B_φ : à Saturne, 6°)

$$V_S \sim R^{-1/7} \quad (\sim c^{te}) \quad (\rightarrow \text{facteur } 0.7 \text{ entre } 1 \text{ et } 10 \text{ UA})$$

Exercice 1: montrer que $V_A \sim V_{A0} (1/2 + 1/(2R^2))^{1/2}$

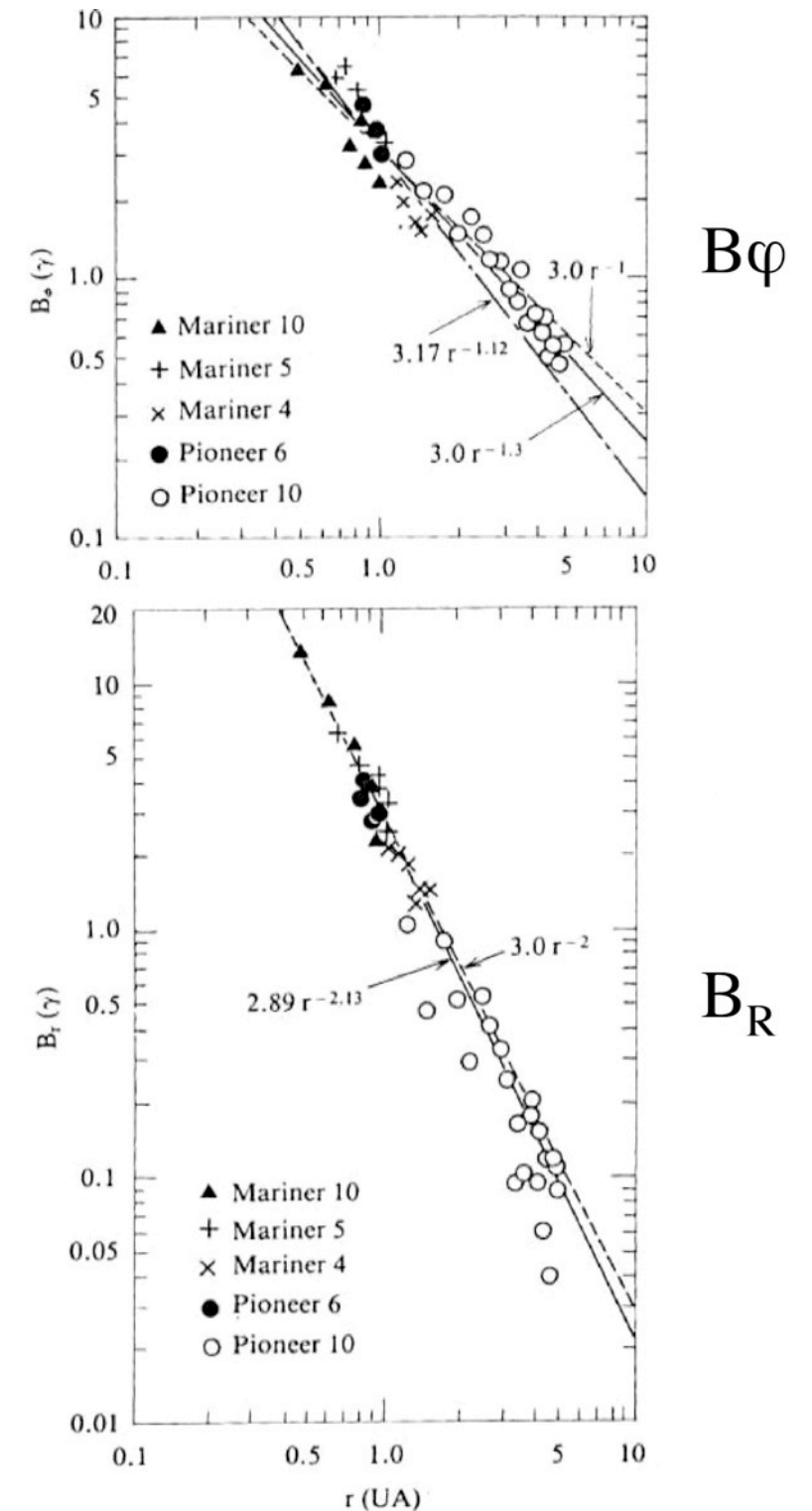
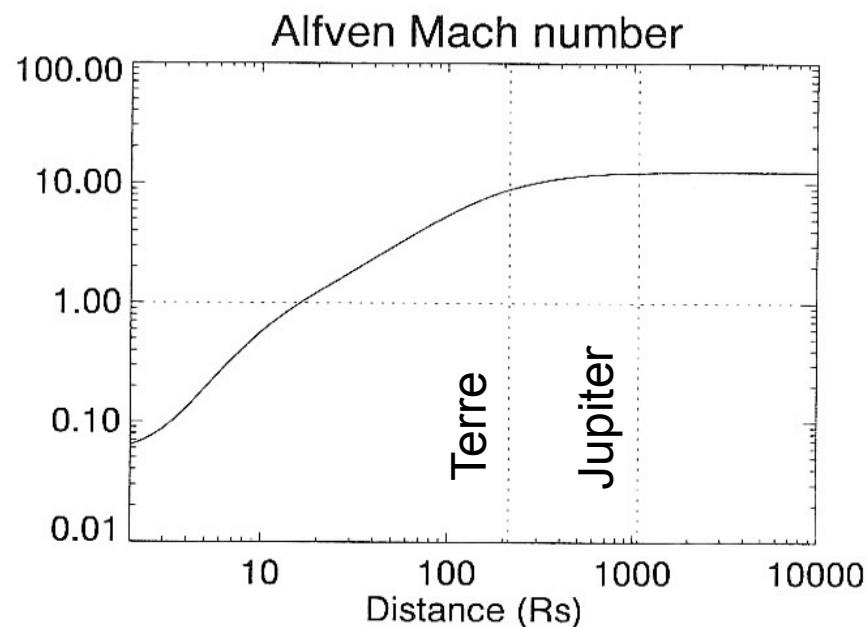
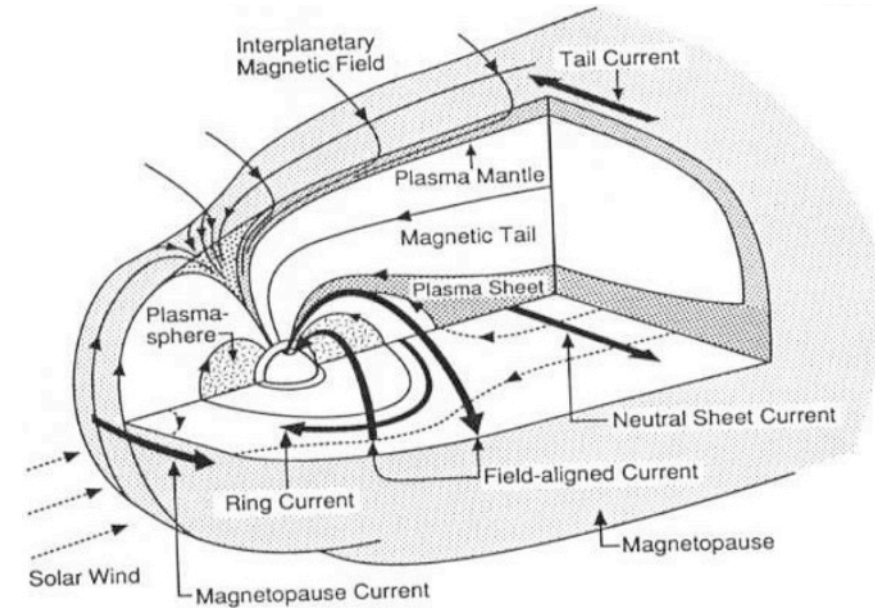


FIG. 5-5 – Les sondes interplanétaires ont déjà permis d'explorer la variation radiale du champ magnétique interplanétaire de 0.4 à 19 UA. La superposition des mesures faites par les sondes Mariner et Pioneer montre que les variations en r^{-2} de la composante radiale B_r , et en r^{-1} de la composante azimutale B_φ , prédites par le modèle simple de la spirale de Parker, sont en assez bon accord avec la moyenne des observations. Les deux composantes sont égales et de l'ordre de 3 nT au niveau de la Terre. (D'après K. W. Behannon, « Heliocentric Distance Dependence of the IMF », *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 16, 1978.)

Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr



2. Structure et dimensions des magnétosphères

2.1 Interaction vent solaire – obstacle

2.2 Champ magnétique planétaire

2.3 Dimension (subsolaire) de la Magnétopause

2.4 Choc

2.5 Forme de la Magnétopause

2.1 Interaction vent solaire – obstacle

→ dépend de la présence ou non

- d'un champ magnétique intrinsèque à grande échelle
- d'une enveloppe gazeuse ionisée (ionosphère, coma)
- ou éventuellement de la conductivité du corps central

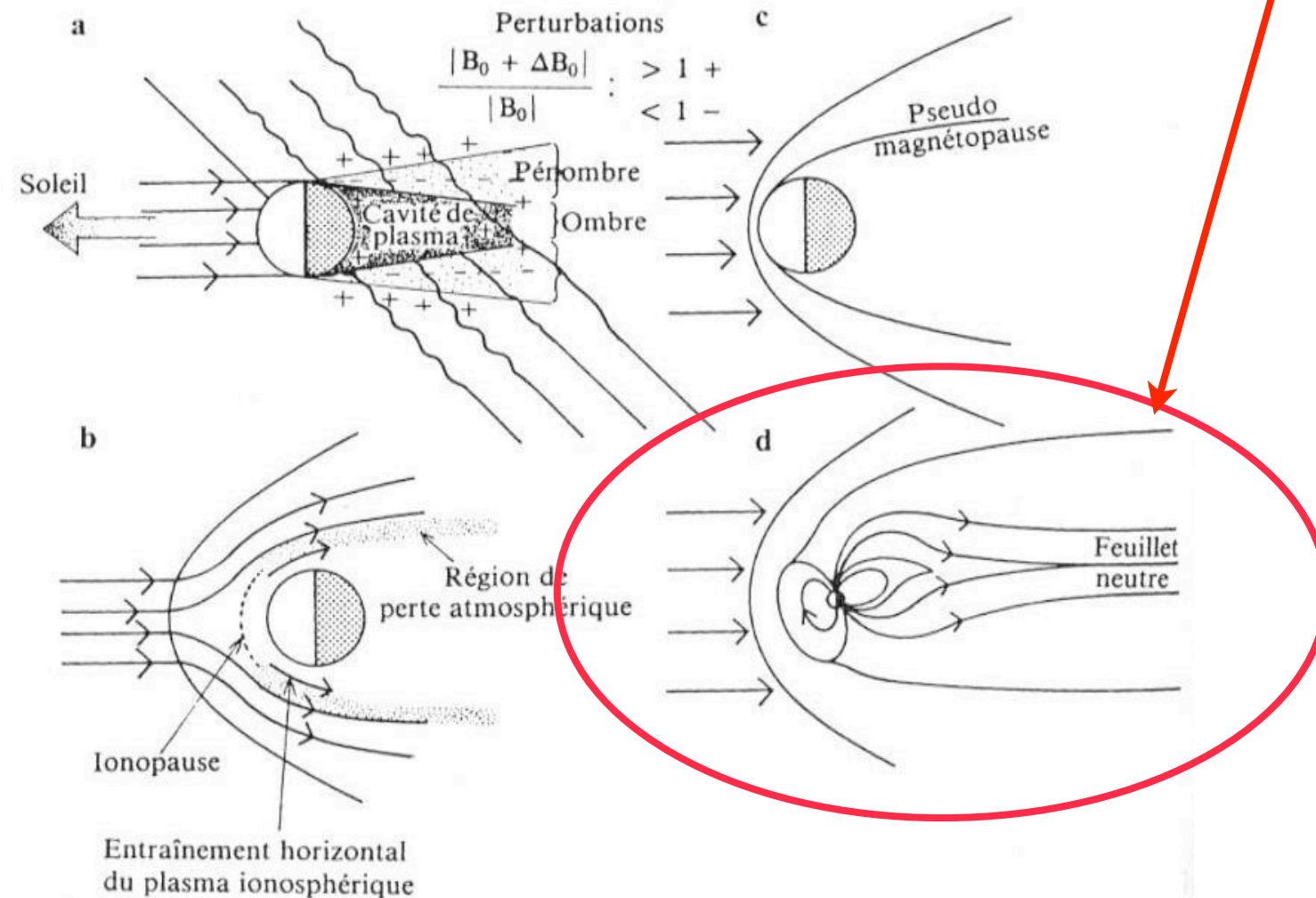


FIG. 5-25 – Les quatre principaux cas de figure de l'interaction entre le vent solaire et un corps planétaire. (D'après R. P. Lepping, « Magnetic Configurations of Planetary Obstacles », *Étude comparative des systèmes magnétosphériques*, Cepadues, 1986.)

Nous étudions le 1^{er} cas (2^{ème} → cf. cours *Fontaine & Chassefière* ; pas d'exemple du 3^{ème} cas dans le système solaire, sauf peut-être Europe & Callisto si océan conducteur – voir plus loin interaction magnétosphère-satellite - mais interaction $\neq$ avec le VS)

Quand **B** planétaire est intense $\rightarrow$ cavité dans le vent solaire = magnétosphère

(terme créé par Thomas Gold en 1959 pour Jupiter)

limitée par une frontière = magnétopause, observée dans les années 1960 (sondes spatiales) $\rightarrow$ frontière abrupte de B terrestre = limite de son extension / sa zone d'influence dans l'espace.

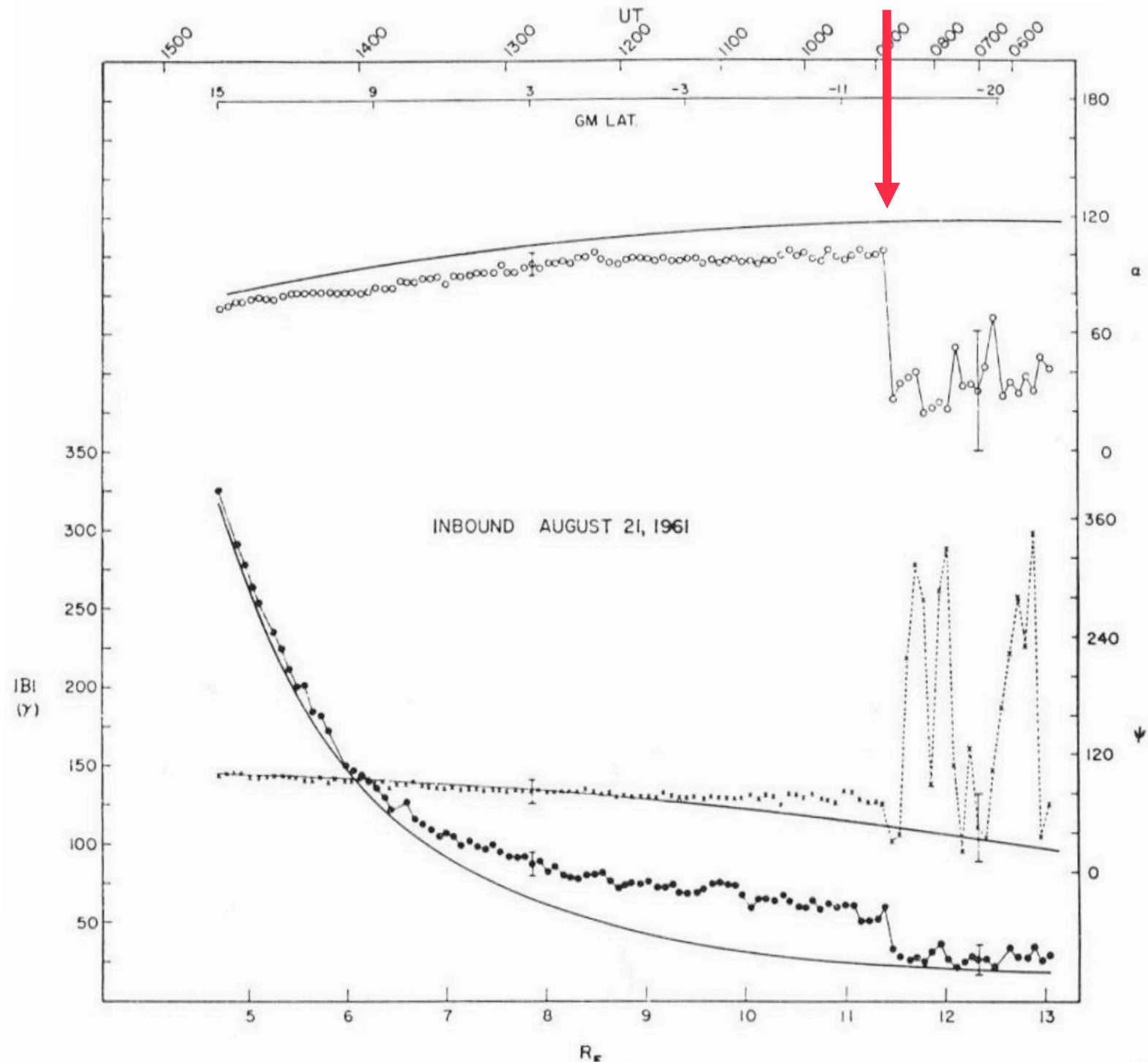
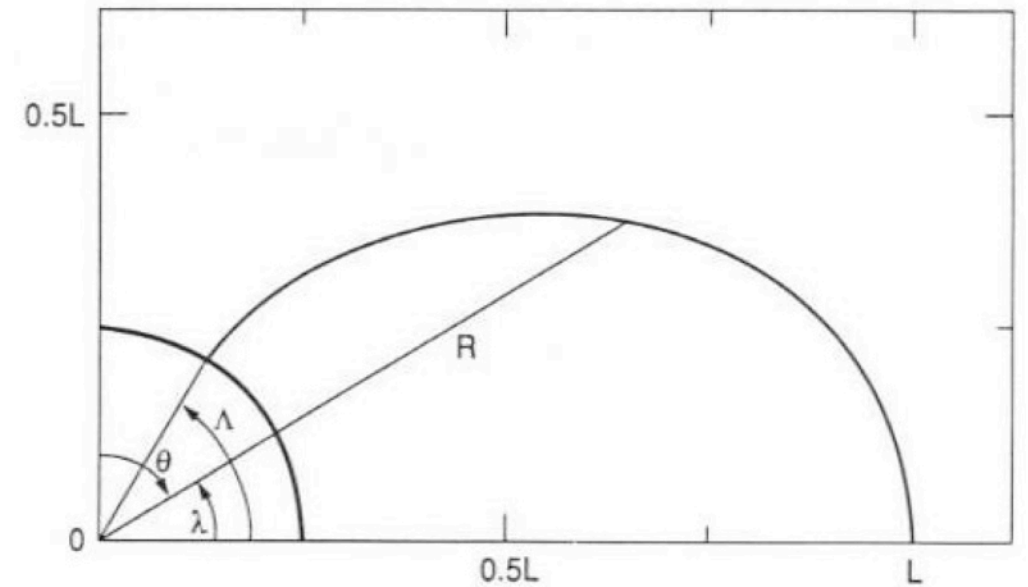


FIG. 1.12. Measurements of magnetic-field strength in the outer magnetosphere and through the magnetopause by the *Explorer 12* spacecraft. Two angles and the field magnitude are shown. Smooth lines are dipole values. (From Cahill and Patel, 1967.)

2.2 Champ magnétique planétaire

Approximation dipolaire :

($X = |\mathbf{X}|$, $r = \text{distance au centre}$, $\theta = \text{colatitude depuis le pôle } N = \pi/2 - \text{latitude}$.)



- Représentation via un potentiel scalaire (car $\text{rot } \mathbf{B} = 0$ hors source du champ, i.e. > surface planétaire) :

$$\mathbf{B} = -\text{grad}\psi = -\nabla\psi \quad \text{avec} \quad \psi = \mathbf{M} \cdot \mathbf{r} / r^3 = M \cos\theta / r^2$$

- Représentation vectorielle : $\mathbf{B}$:
- $$\begin{aligned} B_r &= -\partial\psi/\partial r = 2 M \cos\theta / r^3 \\ B_\theta &= -1/r \partial\psi/\partial\theta = M \sin\theta / r^3 \\ B_\varphi &= 0 \end{aligned}$$

→ module $\mathbf{B} = M/r^3 (1+3\cos^2\theta)^{1/2}$

$B_e = M/R_p^3$ l'intensité du champ à l'équateur à la surface de la planète

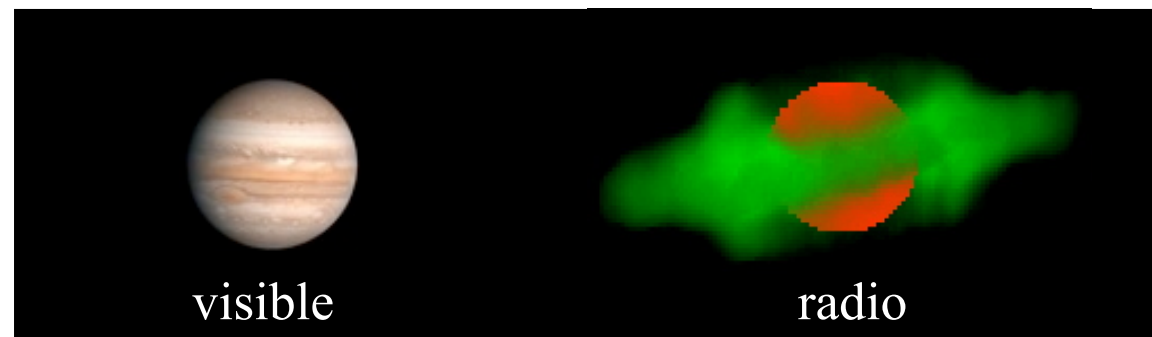
→ $\mathbf{B} = B_e/L^3 (1+3\cos^2\theta)^{1/2}$ avec $r = L R_p$

Exercice 2: Montrer que l'équation d'une ligne de force magnétique est : $r = L \sin^2\theta$
avec $L = \text{distance de l'apex de la ligne de champ (à l'équateur)}$

Cas général :

Le champ magnétique des planètes géantes a été identifié/mesuré par les sondes Pioneer, Mariner Voyager + pour Jupiter mesures radio & IR depuis la Terre :

- *Découverte du rayonnement radio décamétrique (DAM, à $f=22.2$ MHz) en 1955, polarisation circulaire/elliptique $\rightarrow$ émission cyclotron à $f=f_{ce}=eB/2\pi m_e$.*
- *Rayonnement radio décimétrique en 1958, polarisation linéaire $\rightarrow$ émission synchrotron à $f=n \times f_{ce}$.*



$\rightarrow \exists \mathbf{B}$, incliné de $\sim 10^\circ/\Omega$
électrons de plusieurs MeV
($\sim$ ceintures de Van Allen terrestres
découvertes également en 1958)

$\rightarrow f_{\max}(\text{DAM})=40$ MHz

$\rightarrow B_{\max}(\text{surface})=14$ G.

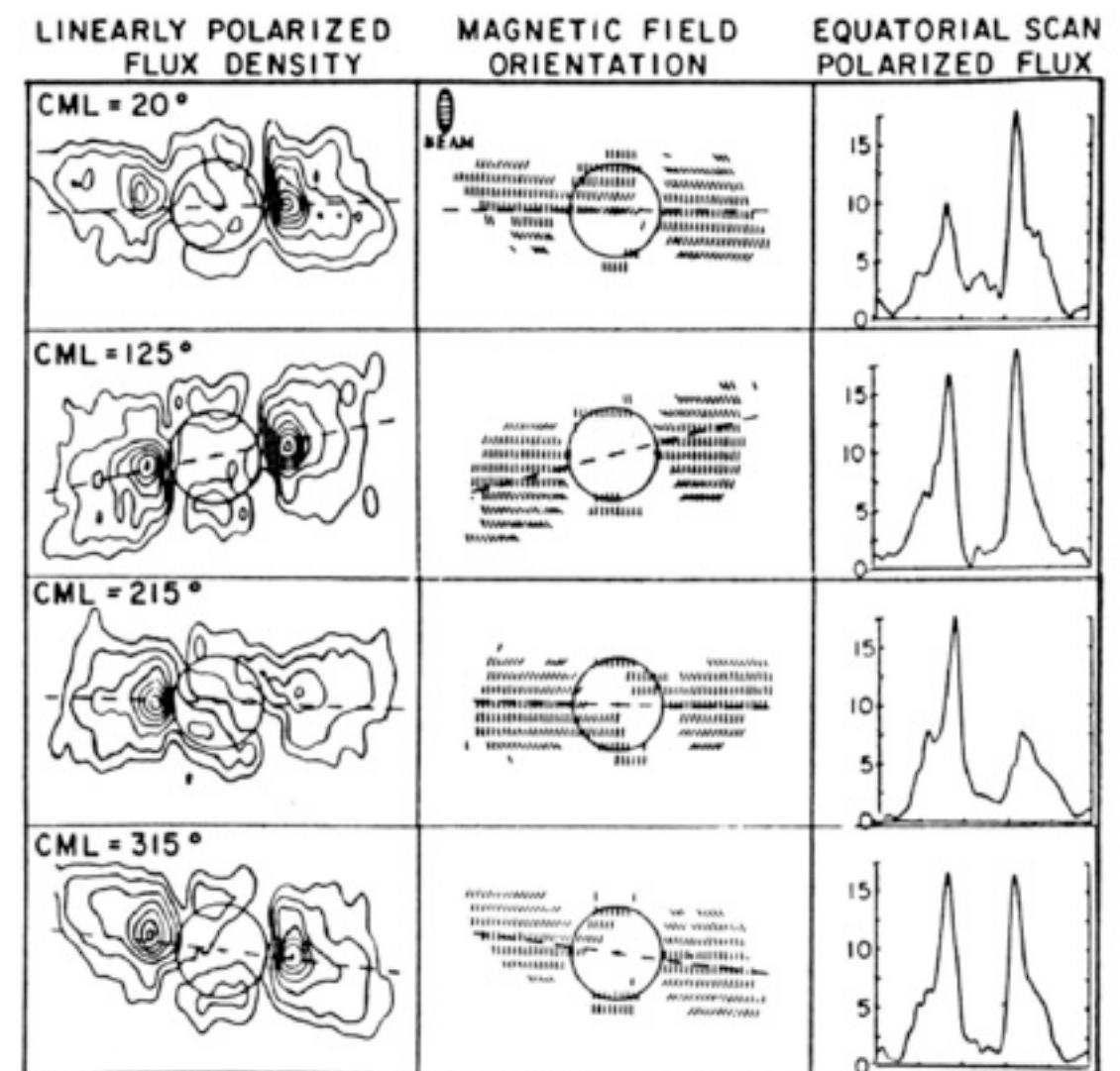


Fig. 7.9. Maps of the linearly polarized flux density at 6 cm wavelength (left-hand panels), magnetic field orientation (center panels) and polarized flux density scans (in Jy) across the magnetic equator. The value of the CML is given in the upper left-hand corner of the first panel for each of the four rows of maps. The projected average magnetic field directions are drawn perpendicular to the measured orientation of the linearly polarized component of the radio emission. Adapted from de Pater [1981].

La description d'un champ magnétique planétaire se fonde sur l'expression du champ comme gradient d'un potentiel scalaire: $\mathbf{B} = -\nabla\psi$

que l'on développe en harmoniques sphériques :

$$\psi = R_P \sum_{n=1 \rightarrow \infty} (R_P/r)^{n+1} S_i^n + (r/R_P)^n S_e^n$$

somme des contributions des courants internes (S_i^n) et des sources externes (S_e^n : courants de magnétopause, disque de courant équatorial magnétosphérique...), avec

$$S_i^n = \sum_{m=0 \rightarrow n} P_n^m(\cos\theta) [g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi]$$

et

$$S_e^n = \sum_{m=0 \rightarrow n} P_n^m(\cos\theta) [G_n^m \cos m\phi + H_n^m \sin m\phi]$$

(r =rayon vecteur, R_P =rayon planétaire moyen, θ, ϕ =coordonnées polaires)

$P_n^m(\cos\theta)$ = fonctions orthogonales de Legendre,

$g_n^m, h_n^m, G_n^m, H_n^m$ = coefficients de Schmidt internes et externes.

Représentation valide dans la région comprise entre les sources internes et externes, supposée ne pas contenir de courants. Les courants « incontournables » (le disque de courant équatorial de Jupiter & Saturne) sont décrits par surcroît par un modèle explicite (et non un potentiel externe).

Le degré $n=1$ correspond au **dipôle**, $n=2$ au **quadripôle**, $n=3$ à l'**octopôle**, ...

Modélisation = détermination des coefficients g, h, G, H , par ajustement des mesures sur la trajectoire de la sonde par des magnétomètres vectoriels embarqués

→ solution non unique + erreurs.

Champ terrestre connu jusqu'au degré $n=14$ (soit $n(n+2)=224$ coefficients).

Coefficients de Schmidt internes (jusqu'au degré $n=3$) des champs magnétiques planétaires (en Gauss), et paramètres du modèle dipolaire incliné et excentré équivalent (*adapté de Ness, 1992*).

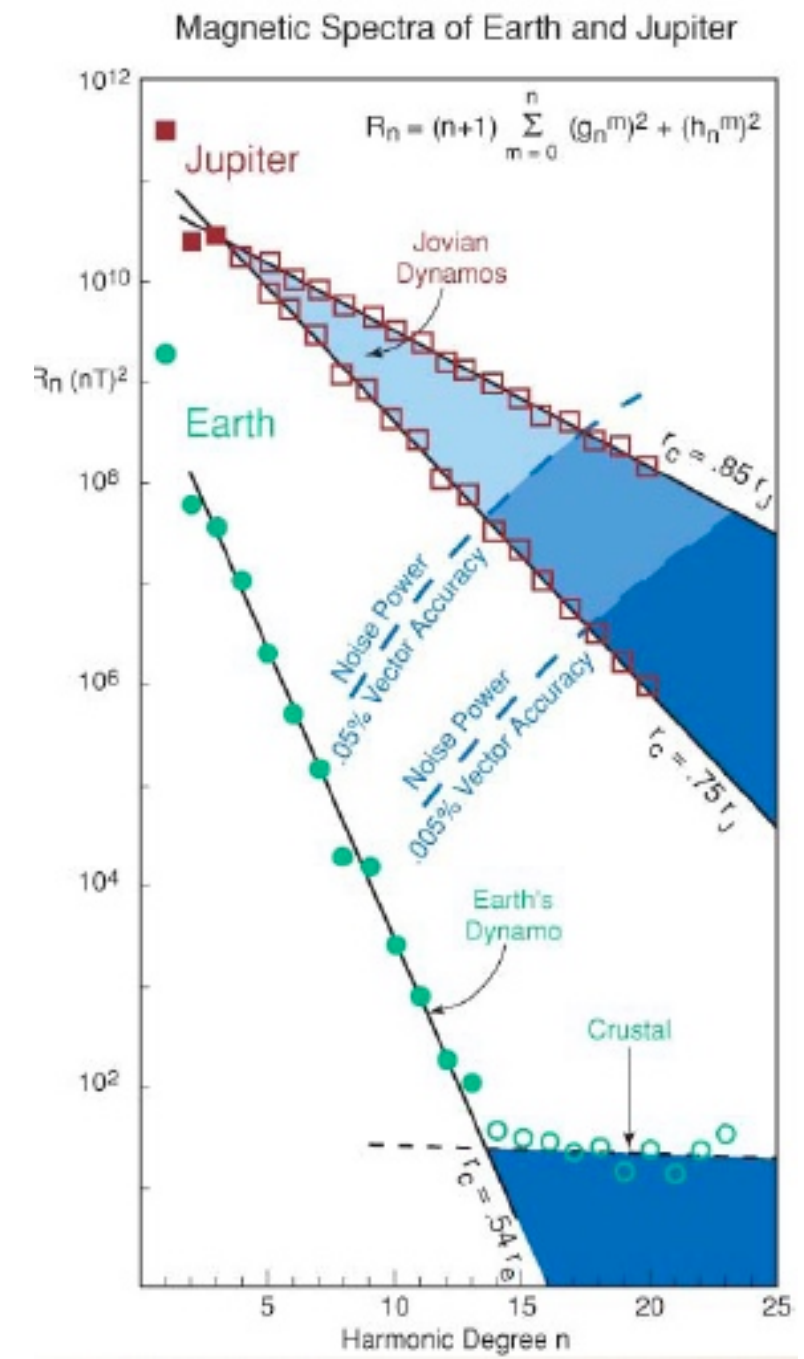
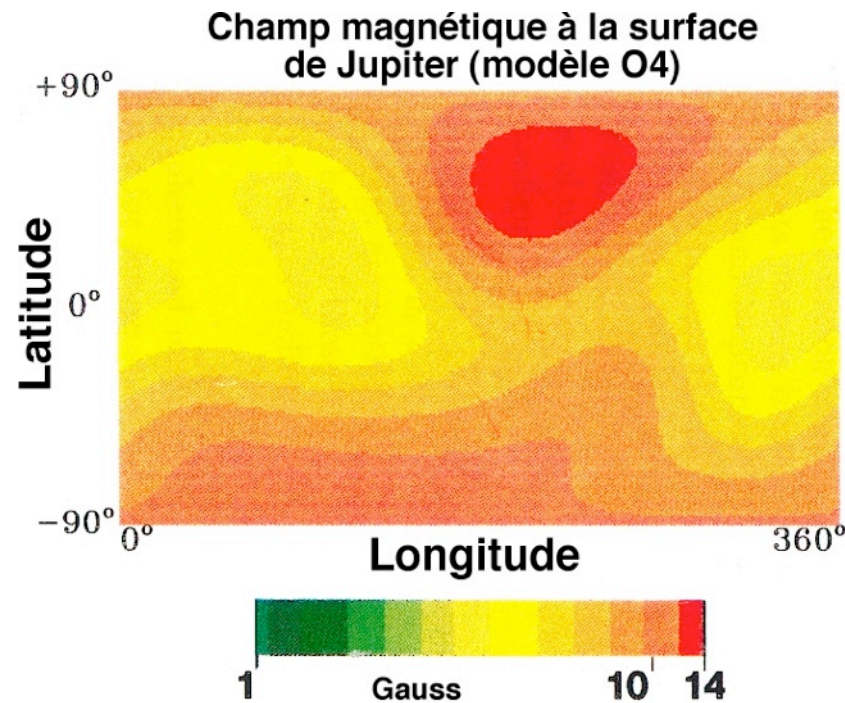
Planète	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R_p (km)	6378	71372	60330	25600	24765
Modèle	IGRF 2000	O6	Z3	Q3	O8
g_1^0	-0.29615	+4.24202	+0.21535	+0.11893	+0.09732
g_1^1	-0.01728	-0.65929	0	+0.11579	+0.03220
h_1^1	+0.05186	+0.24116	0	-0.15685	-0.09889
g_2^0	-0.02267	-0.02181	+0.01642	-0.06030	+0.07448
g_2^1	+0.03072	-0.71106	0	-0.12587	+0.00664
h_2^1	-0.02478	-0.40304	0	+0.06116	+0.11230
g_2^2	+0.01672	+0.48714	0	+0.00196	+0.04499
h_2^2	-0.00458	+0.07179	0	+0.04759	-0.00070
g_3^0	+0.01341	+0.07565	+0.02743	0	-0.06592
g_3^1	-0.02290	-0.15493	0	0	+0.04098
h_3^1	-0.00227	-0.38824	0	0	-0.03669
g_3^2	+0.01253	+0.19775	0	0	-0.03581
h_3^2	+0.00296	+0.34243	0	0	+0.01791
g_3^3	+0.00715	-0.17958	0	0	+0.00484
h_3^3	-0.00492	-0.22439	0	0	-0.00770
M^t dipolaire ($G.R_p^3$)	0.305	4.26	0.215	0.228	0.142
Inclinaison (B / Ω)	+11°	-9.6°	-0°	-58.6°	-46.9°
Offset centre dipôle / centre planète (R_p)	0.08	0.07	0.04	0.31	0.55

Jupiter

Mesures magnétiques in-situ (Pioneer & Voyager) + télédétection (IR, radio) → modèles D4, O4, O6, VIP4.

Pas de variation séculaire détectée entre 1973 (Pioneer) et 2001 (Galileo).

	O ₄	O ₆	VIP 4
g_1^0	4,218	4,242	4,205
g_1^1	-0,664	-0,659	-0,659
h_1^1	0,264	0,241	0,250
g_2^0	-0,203	-0,022	-0,051
g_2^1	-0,735	-0,711	-0,619
g_2^2	0,513	0,487	0,497
h_2^1	-0,469	-0,403	-0,361
h_2^2	0,088	0,072	0,053
g_3^0	-0,233	0,075	-0,016
g_3^1	-0,076	-0,155	-0,520
g_3^2	0,168	0,198	0,244
g_3^3	-0,231	-0,180	-0,176
h_3^1	-0,580	-0,388	-0,088
h_3^2	0,487	0,342	0,408
h_3^3	-0,294	-0,224	-0,316
g_4^0			-0,168
g_4^1			0,222
g_4^2			-0,061
g_4^3			-0,202
g_4^4			0,066
h_4^1			0,076
h_4^2			0,404
h_4^3			-0,166
h_4^4			0,039



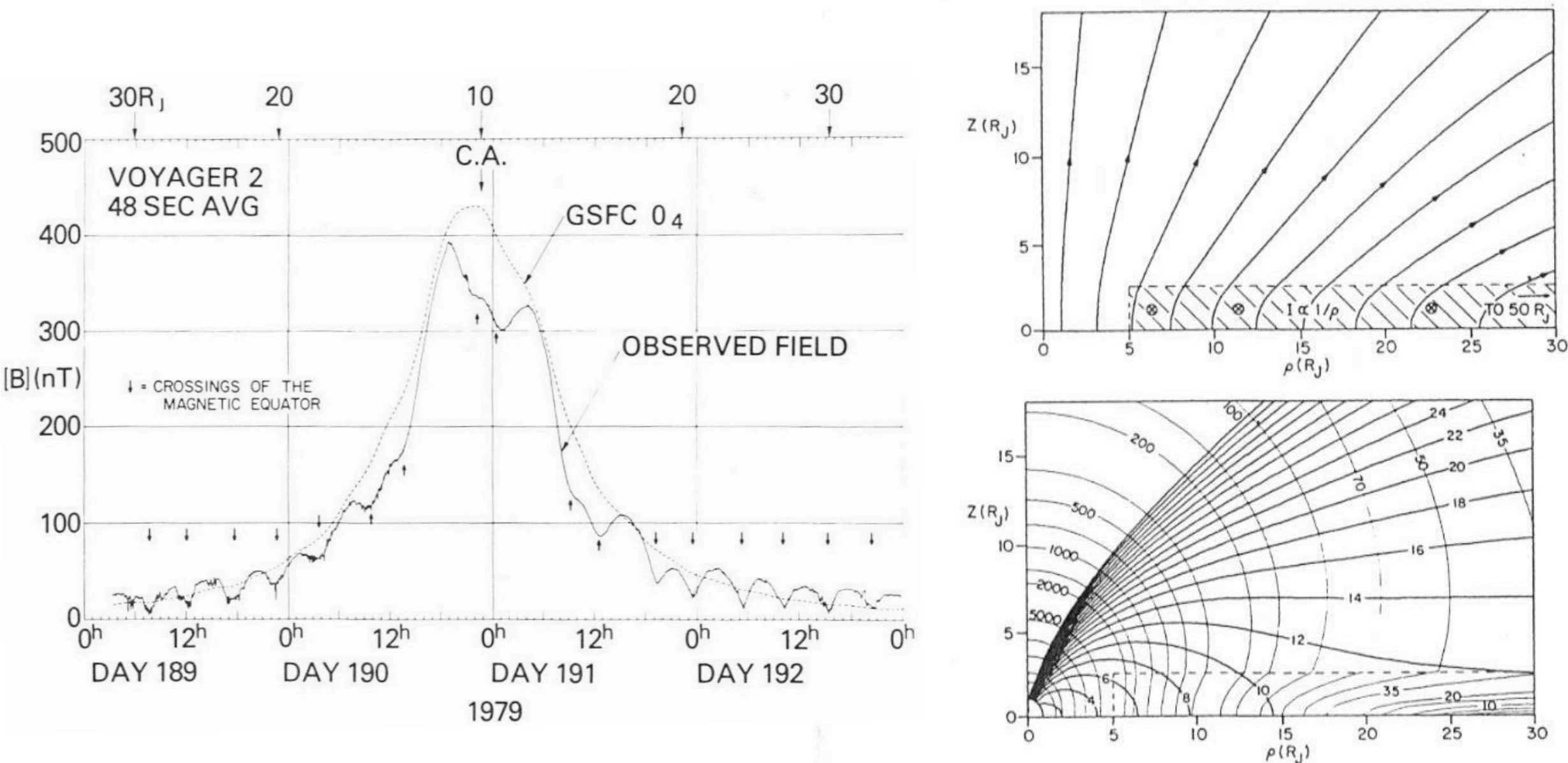
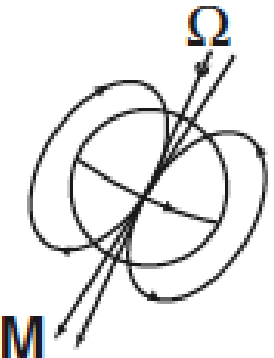
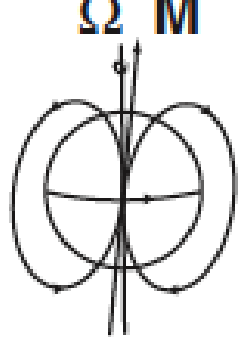
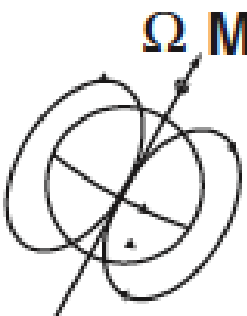
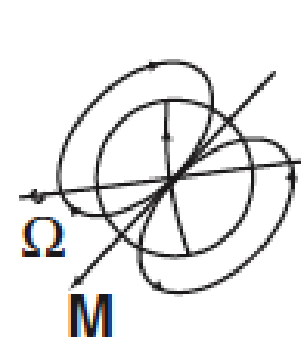
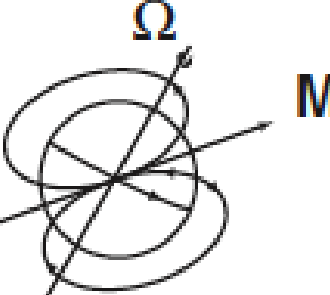


FIG. 8-26 – Disque de courant équatorial de la magnétosphère jovienne, déduit des mesures de *Pioneer 10* et *Voyager 1*. En haut : représentation dans un plan méridien des lignes de champ associées au disque seul. En bas : représentation dans un plan méridien des lignes de champ magnétosphérique (champ interne + disque – traits gras), et des isocontours du champ magnétique (en nanoteslas – trait minces). Les valeurs sur les lignes de champ représentent l'apex (en R_J) qu'aurait la ligne de champ en l'absence du disque. Ce dernier étire radialement les lignes de champ vers l'extérieur. (D'après M.H. Acuña *et al.*, in *Physics of the Jovian Magnetosphere*, A. J. Dessler Ed., Cambridge University Press, p. 1, 1983.)

+ Disque de courant (300 MA dans $[5-50]R_J \times 5 R_J$, dans l'équateur centrifuge entre l'équateur rotationnel et l'équateur magnétique, à 3.2° ($1/3$ du tilt) de ce dernier

Exercice 3: démontrez-le !

	EARTH	JUPITER	SATURN	URANUS	NEPTUNE
					
Obliquity	23.5°	3.1°	26.7°	97.9°	29.6°
Dipole Tilt	+10.8°	-9.6°	-0.0°	-59°	-47°

Saturne

Mesures Pioneer 11, Voyager 1-2, Cassini...

→ modèles axisymétriques + anneau de courant équatorial $\sim 10 \text{ MA}$ dans $[8-16]R_S \times 5 R_S$.

Uranus

Dipôle incliné (59°) et axe de rotation « couché ».

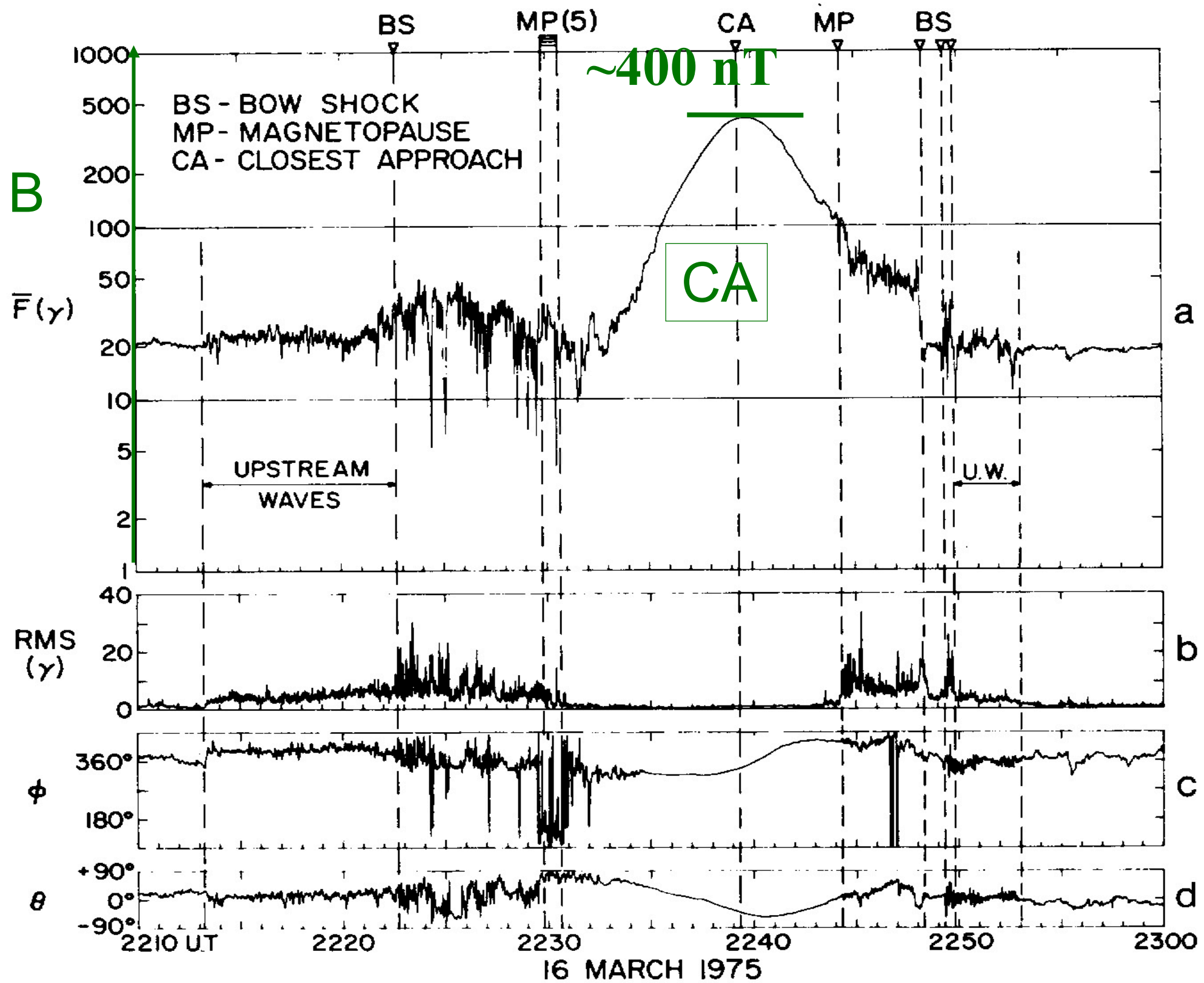
Neptune

Dipôle et axe de rotation inclinés

→ le dipôle pointe vers le Soleil 1 fois/rotation.

Mercure

Uniques mesures = Mariner 10 (1974-75) : faible B dipolaire, tilt $\sim 10^\circ$.



Origine des champs magnétiques planétaires ?

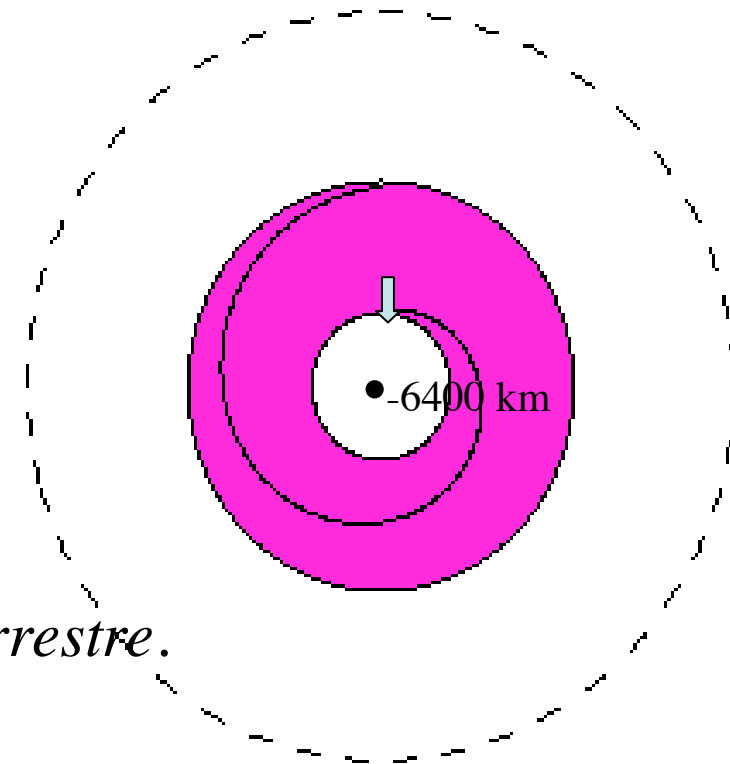
Terre

Noyau externe entre -5150 et -2900 km, Fe-Ni liquide
+ O, S, Si, C..., $T=4800-3100$ K. Métal liquide très conducteur,
~plasma, grande mobilité des électrons.

Cristallisation du Fe à -5150 km sur le noyau interne solide : ↓
enrichissement en éléments légers du noyau externe
profond & cristallisation exothermique

→ convection verticale, + rotation

→ mouvements spiraux de matière conductrice → $\mathbf{J} \rightarrow \mathbf{B}$ dipolaire terrestre.



Turbulence + aimantation des couches superficielles → anomalies.

La spirale de plasma, instable, peut se dérouler en se retournant

→ inversion de $\mathbf{B}$ terrestre (25 fois dans les derniers 4.5×10^6 ans, sans régularité apparente).

L'axe magnétique ne dépend pas directement de l'axe de rotation planétaire, mais de celui de la spirale de plasma.

Théorie « dynamo » : une fois en place, $\mathbf{B}$ est entretenu par son action sur le conducteur du noyau → origine ?

Jupiter

Dynamo dans le cœur fluide conducteur = H métallique ? (courants, mouvements convectifs idem) ;+ dans les couches plus extérieures, non métalliques mais possédant une certaine conductivité ?

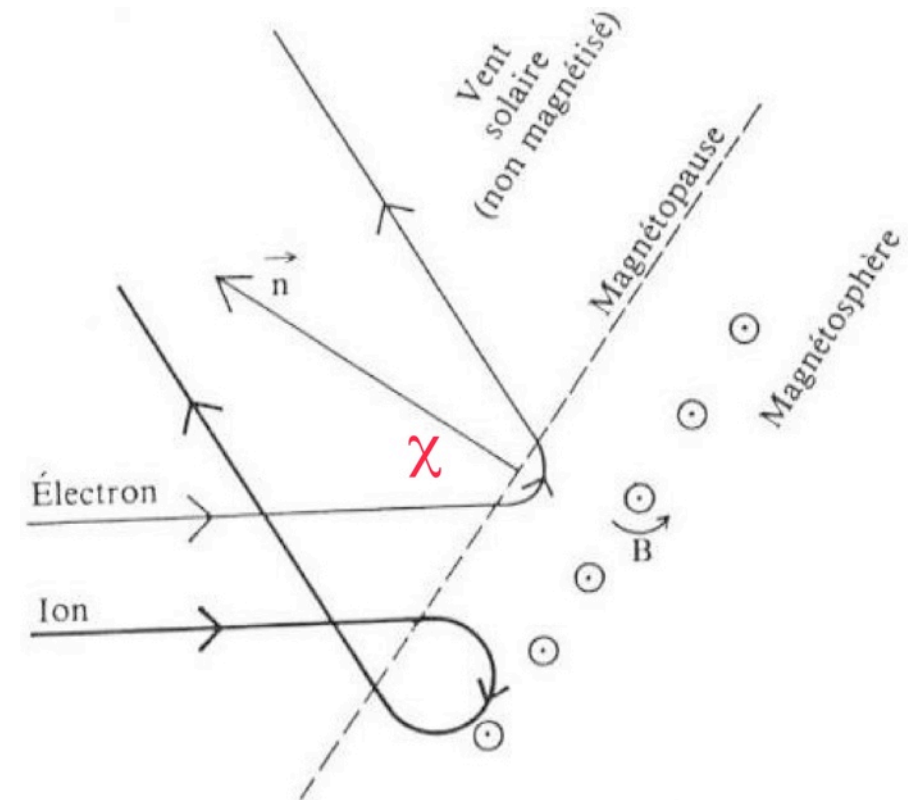
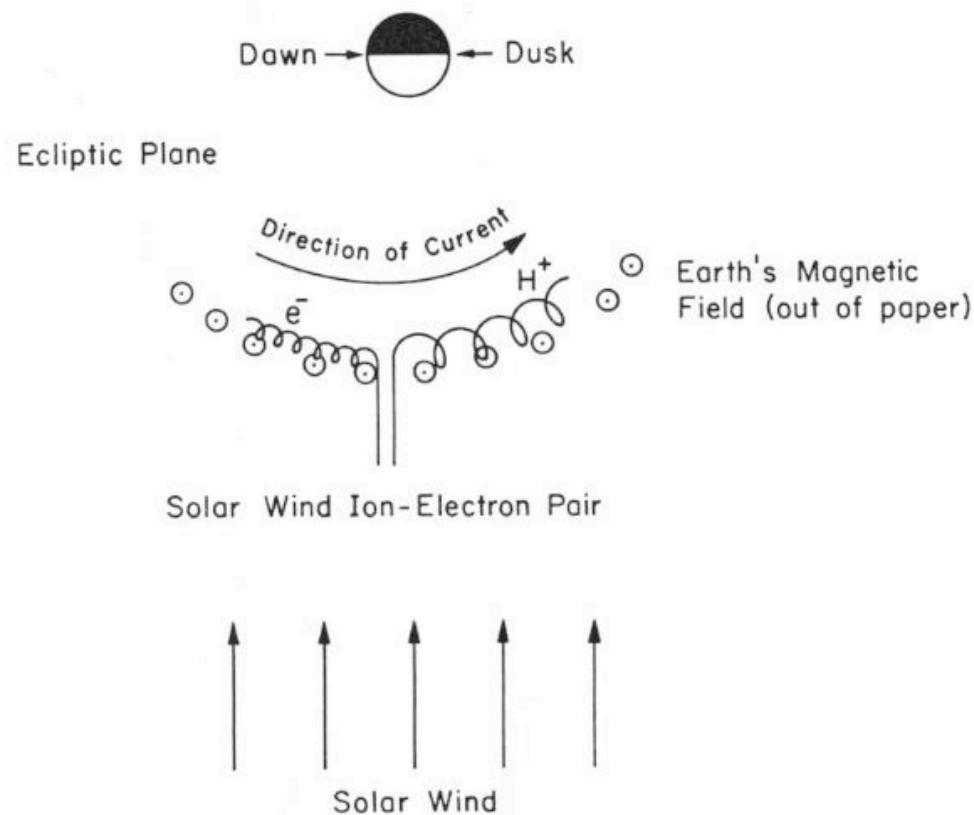
2.3 Dimension (subsolaire) de la Magnétopause

Équilibre des forces sur la surface : VS ~ jet monocinétique, $P_{\text{RAM}} \gg P_{\text{th}} \ \& \ P_{\text{B}}$, réflexion sur la magnétopause

→ chaque particule cède une impulsion $Km(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) = KmV \cos \chi$ $K=1-2$

$\times nV \cos \chi \rightarrow$ flux d'impulsion externe

$$P_{\text{RAM}} = KnmV^2 \cos^2 \chi$$

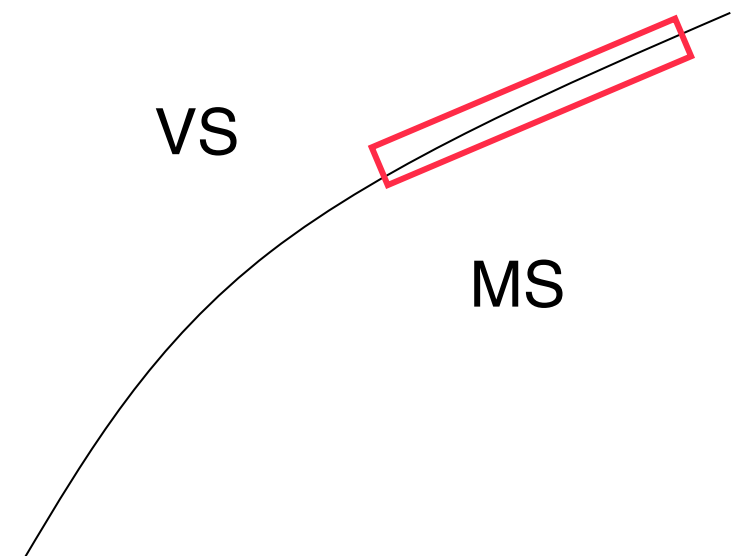


$\text{div } \mathbf{B} = 0$ & $B \sim 0$ dans le vent solaire $\rightarrow B_N = 0$ à la magnétopause

→ $B = B_T$ (discontinuité tangentielle)

→ flux d'impulsion interne = pression magnétique

$$P_{\text{MS}} = B_T^2 / 2\mu_0$$



→ Bilan du flux d'impulsion = équilibre magnétostatique :

$$P_{\text{RAM}} = P_{\text{MS}} \quad \rightarrow \quad K n m V^2 \cos^2 \chi = B_T^2 / 2 \mu_0$$

Calcul de la géométrie de la magnétopause : ? frontière libre (M) ? telle que

$$\mathbf{B} = -\nabla \psi \quad \text{entre la surface planétaire (P) et la frontière (M)}$$

(qui porte des courants), avec B fixé sur (P) ; par ex pour un champ dipolaire :

$$\mathbf{B}(R, \theta, \varphi) = (B_e / R^3) (1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (R \text{ en } R_p) \quad [1]$$

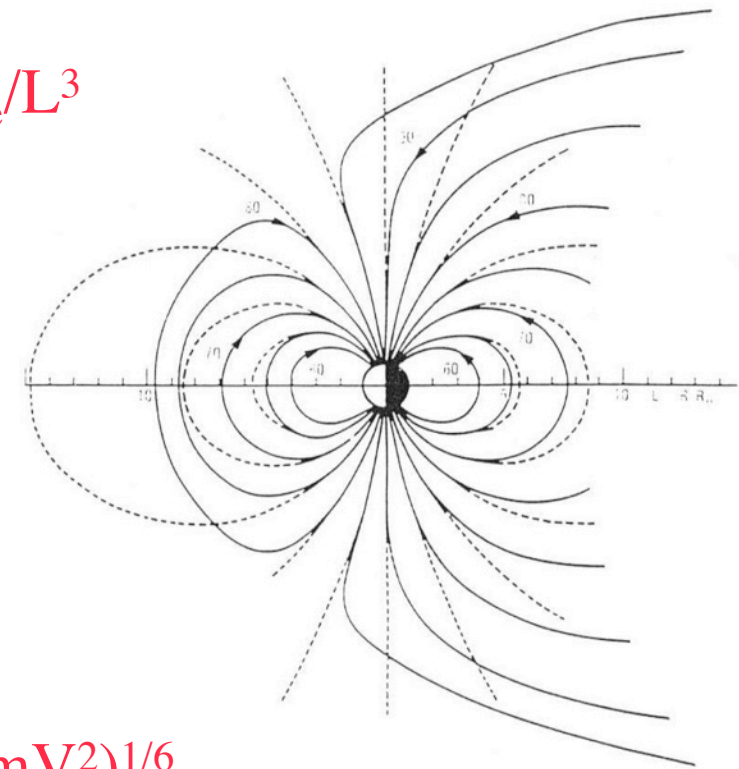
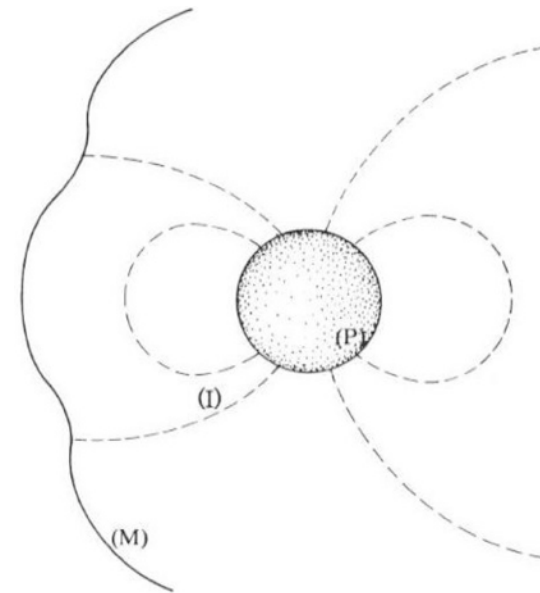
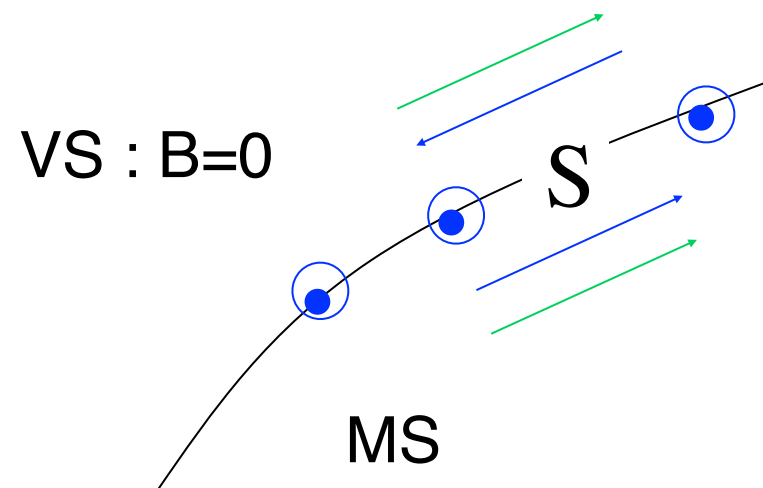
$$\text{et} \quad B_N = 0 \quad \text{sur (M)} \quad [2]$$

$$\text{et} \quad B_T = (2 K \mu_0 n m V^2 \cos^2 \chi)^{1/2} \quad \text{sur (M)} \quad [3]$$

$$B_T(S) = B_P \text{ (champ planétaire)} + B_C \text{ (courants de surface de la magnétopause)}$$

$$\rightarrow \text{dans la magnétosphère : } B = B_P + B_C$$

$$\rightarrow \text{dans le VS : } B = B_P - B_C = 0 \rightarrow B_C(S) = B_P(S) \rightarrow B_T(S) = 2 B_P = 2 B_e / L^3$$



→ [3] donne l'extension de la magnétopause :

$$R_{\text{MP}} = (2 B_e^2 / \mu_0 K n m V^2)^{1/6}$$

• Dans le cas de la Terre, on trouve typiquement

$$R_{\text{MP}} \sim 9 R_T \text{ (ok / observations)}$$

Champs magnétiques et magnétosphères planétaires :

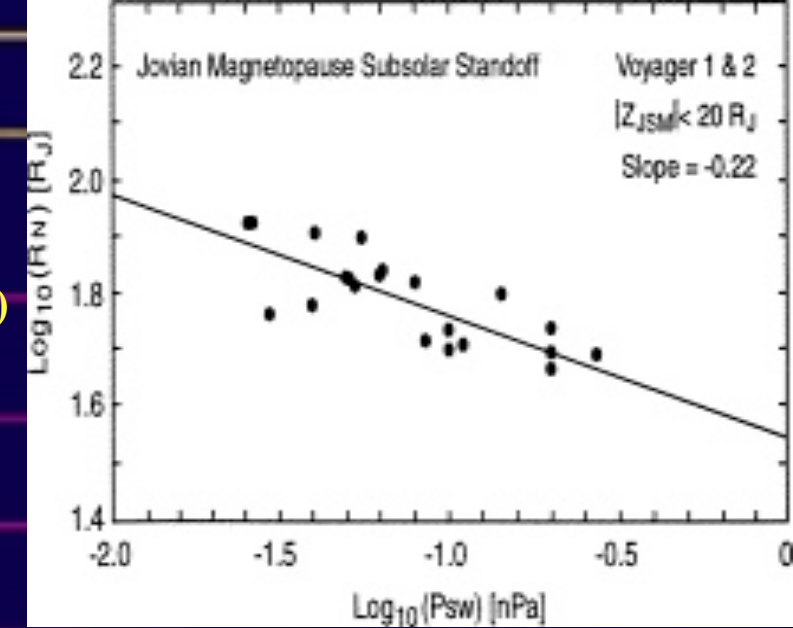
	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R_p (km)	2 439	6 378	71 492	60 268	25 559	24 764
D orbitale (UA)	0.39	1	5.2	9.5	19.2	30.1
M_{dip} (G.km ³)	5.5×10^7	7.9×10^{10}	1.6×10^{15}	4.7×10^{13}	3.8×10^{12}	2.2×10^{12}
Champ à l'équateur B_e (G)	0.003	0.31	4.3	0.21	0.23	0.14
Inclinaison [B, Ω] (°) et sens	+14	+11.7	-9.6	-0.	-58.6	-46.9
R_{MP} (km) calculée	3 400	57 000	2 700 000	1 000 000	550 000	530 000
R_{MP} (R_p) calculée [mesurée]	1.4 [~1.5]	9 [~10]	40 [~90]	17 [~20]	22 [~18]	21 [~23]

**Jupiter : R_{MP} calculé ($\sim 40 R_J$) < observé ($\sim 90 R_J$),
+ aplatissement équatorial**

Magnétosphère très compressible ($R_{MP} \propto P_{SW}^{-1/4.5}$)

**→ attribué à la déformation de B Jupiter par le disque
de courant équatorial dû aux sources de plasma internes (Io)**

→ Pression du plasma interne + élevée



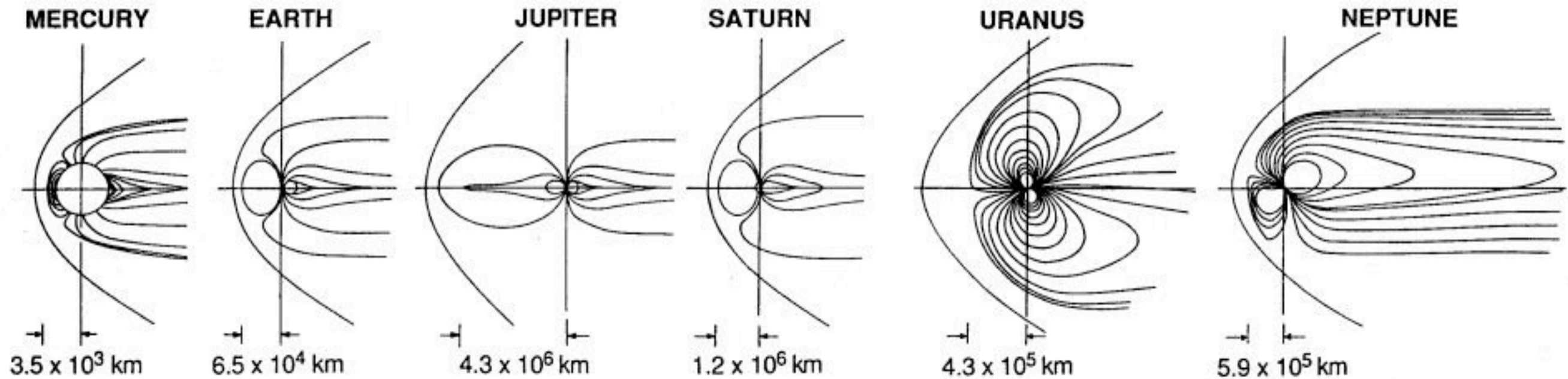
size of Sun
(to scale with
magnetospheres)

— magnetic field lines
 — axis of rotation
 — orientation of magnetic field
 — solar wind

Saturn

Uranus

Neptune



Notes :

- Terre : La Lune est majoritairement hors de la MS terrestre.
- Mercure : MS très petite, pas d'atmosphère.
- Jupiter : MS très étendue (2° dans le ciel, $>$ pleine Lune), englobe tous ses satellites.
- Saturne : MS englobe les anneaux et les satellites glacés ; Titan alternativement dans la MS et le VS.
- Uranus : MS englobe les anneaux et les satellites glacés.

2.4 Choc

Le vent solaire est toujours supersonique & superalfvénique
→ apparition d'un choc en amont de l'obstacle.

Vitesse du son, choc

V_s = vitesse de propagation de l'information « mécanique » dans le milieu

Pour un objet perturbateur à $V < V_s$, les ondes sonores se propagent vers l'avant, « avertissant » le milieu de l'arrivée de l'objet, et ajustant graduellement les variations de pression (compression à l'avant de l'objet).

Pour un objet perturbateur à $V > V_s$, les ondes sonores à V_s sont en permanence « rattrapées » par l'objet et aucune information sur la présence de l'objet ne peut remonter le flot → variation brutale à l'arrivée de l'objet = choc → variations brutales de P, T, ρ, V

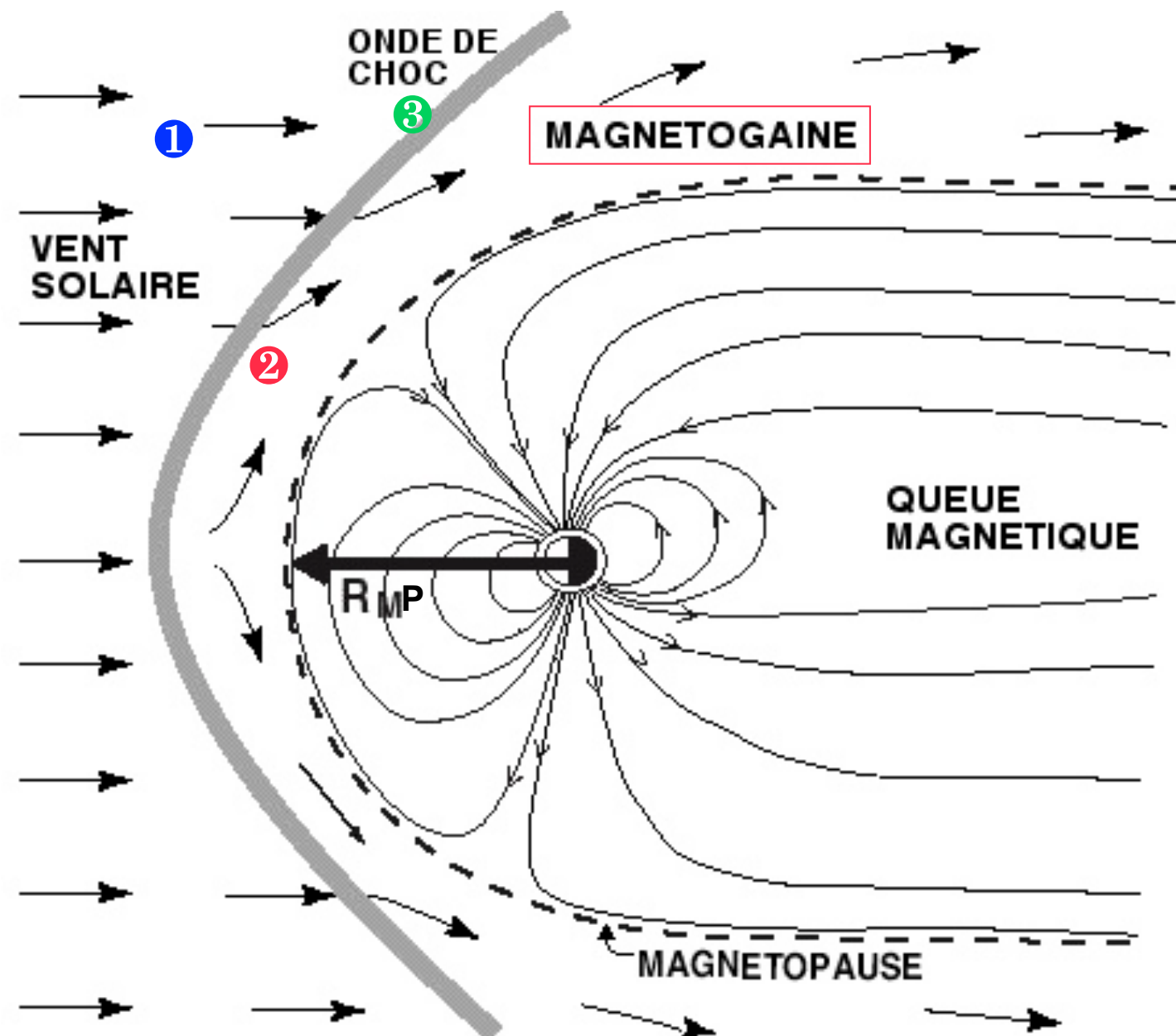
Choc = onde stationnaire / objet en mouvement, se propage / flot environnant.

3 régions :

① loin « upstream » : flot non perturbé

② près de l'obstacle : accumulation de matière $\rightarrow P, \rho, T \uparrow$; variations rapides $\rightarrow$ ~adiabatiques : $P \propto \rho^\gamma$; $V_s \propto (P/\rho)^{1/2} \propto \rho^{(\gamma-1)/2}$ augmente ; de plus, la conservation du flux de masse impose $V \downarrow$ donc le flot devient subsonique

③ zone de transition mince (échelle du $\text{grad}(\rho) \sim \text{lpm} \sim r_{Li} \leq 10^3 \text{ km}$ au niveau de l'orbite terrestre) ~ discontinuité = « bow shock »



Lois de conservation à la traversée du choc (région ① → ②) = relations de **Rankine-Hugoniot**

- flux de masse : $(\rho V)_1 = (\rho V)_2$
- flux de quantité de mouvement ($\sim$ pression) : $(P + \rho V^2 + B^2/2\mu_0)_1 = ()_2$
- densité d'énergie (par unité de masse) + adiabaticité : $(V^2/2 + (\gamma/\gamma-1)P/\rho)_1 = ()_2$

Résolution pour ρ , V , P , T entre les régions ① & ②

$$\rightarrow \quad V_2/V_1 = \rho_1/\rho_2 = (\gamma-1)/(\gamma+1) + 2/(\gamma+1)M_1^2$$
$$Vs_2^2 = \gamma P_2/\rho_2 \approx \gamma V_2 [V_1(1+1/\gamma M_1^2) - V_2]$$

A.N. avec $\gamma=5/3$ et $M_1 \gg 1$ dans le vent solaire :

$$V_2/V_1 = \rho_1/\rho_2 = 1/4 + 3/4 M_1^2 \approx 1/4$$

et $Vs_2^2 \approx \gamma V_2 [V_1 - V_2] \approx 5V_2^2$ d'où $V_2 = Vs_2 / \sqrt{5} < Vs_2$

Estimation de la position du choc en amont de l'obstacle :

- le flot subsonique derrière le choc doit être dévié sur les côtés de l'obstacle, typiquement à Vs_2 (onde de pression).
- le temps de contournement d'un obstacle de dimension R_{MP} à la vitesse Vs_2 est R_{MP}/Vs_2
durant lequel le flot a parcouru à la vitesse V_2 une distance $R_{MP} V_2 / Vs_2 \sim R_{MP} / \sqrt{5}$
 $\sim$ épaisseur du choc au point subsolaire $\sim 40\% \times R_{MP}$

Notes :

- Ok / détermination empirique de la position du choc terrestre : $R(R_T) = K / (1 + \varepsilon \cos\theta)$

avec $K=25 R_T$ et $\varepsilon=0.8$ $\rightarrow R_{MP} = K / (1 + \varepsilon \cos\theta) / (1 + 1/\sqrt{5}) = 9.6 R_T$

- le lpm des particules dans le VS au niveau de la Terre ($>1UA$) est très supérieur à l'épaisseur du front de choc $\rightarrow$ choc « non-collisionnel »

On pose :

$$I = P + \rho V^2 \quad J = \rho V$$

$$E = V^2/2 + (\gamma/\gamma - 1)P/\rho$$

$$V_s = (\gamma P/\rho)^{1/2}$$

$$I \text{ \& } J \quad \rightarrow \quad P/\rho = IV/J - V^2$$

$$\text{ \& } E \quad \rightarrow \quad V^2 - (I/J)2\gamma/(\gamma+1) V + 2E(\gamma-1)/(\gamma+1) = 0$$

$$\text{de la forme} \quad X^2 - SX + P = 0 \quad \text{avec } V_1 \text{ et } V_2 \text{ les 2 racines}$$

$$\rightarrow S = V_1 + V_2 = (I/J)2\gamma/(\gamma+1)$$

$$\rightarrow 1 + V_2/V_1 = (I/JV_1)2\gamma/(\gamma+1)$$

$$\text{or} \quad I/JV = 1 + P/\rho V^2 = 1 + V_s^2/\gamma V^2 = 1 + 1/\gamma M^2 \text{ avec } P/\rho = V_s^2/\gamma$$

$$d'où \quad 1 + V_2/V_1 = 2\gamma/(\gamma+1) (1 + 1/\gamma M_1^2)$$

$$\rightarrow \quad V_2/V_1 = \rho_1/\rho_2 = (\gamma-1)/(\gamma+1) + 2/(\gamma+1)M_1^2$$

$$\text{de } I, \text{ on tire alors :} \quad P_2 = \rho_1 V_1^2 (1 + 1/\gamma M_1^2) - \rho_2 V_2^2 = \rho_1 V_1 [V_1 (1 + 1/\gamma M_1^2) - V_2]$$

$$d'où \quad V_s^2 = \gamma P_2/\rho_2 \approx \gamma V_2 [V_1 (1 + 1/\gamma M_1^2) - V_2]$$

2.5 Forme de la Magnétopause

$K \sin^2 \chi = B_T^2 / 2\mu_0$ est une équation différentielle en χ , dont la résolution donne la forme de la magnétopause.

→ Écoulement calculé ensuite par un code hydrodynamique 3D avec forme de l'obstacle fixée : écoulement du VS ralenti, dévié, puis réaccélère sur les flancs de la magnétopause.

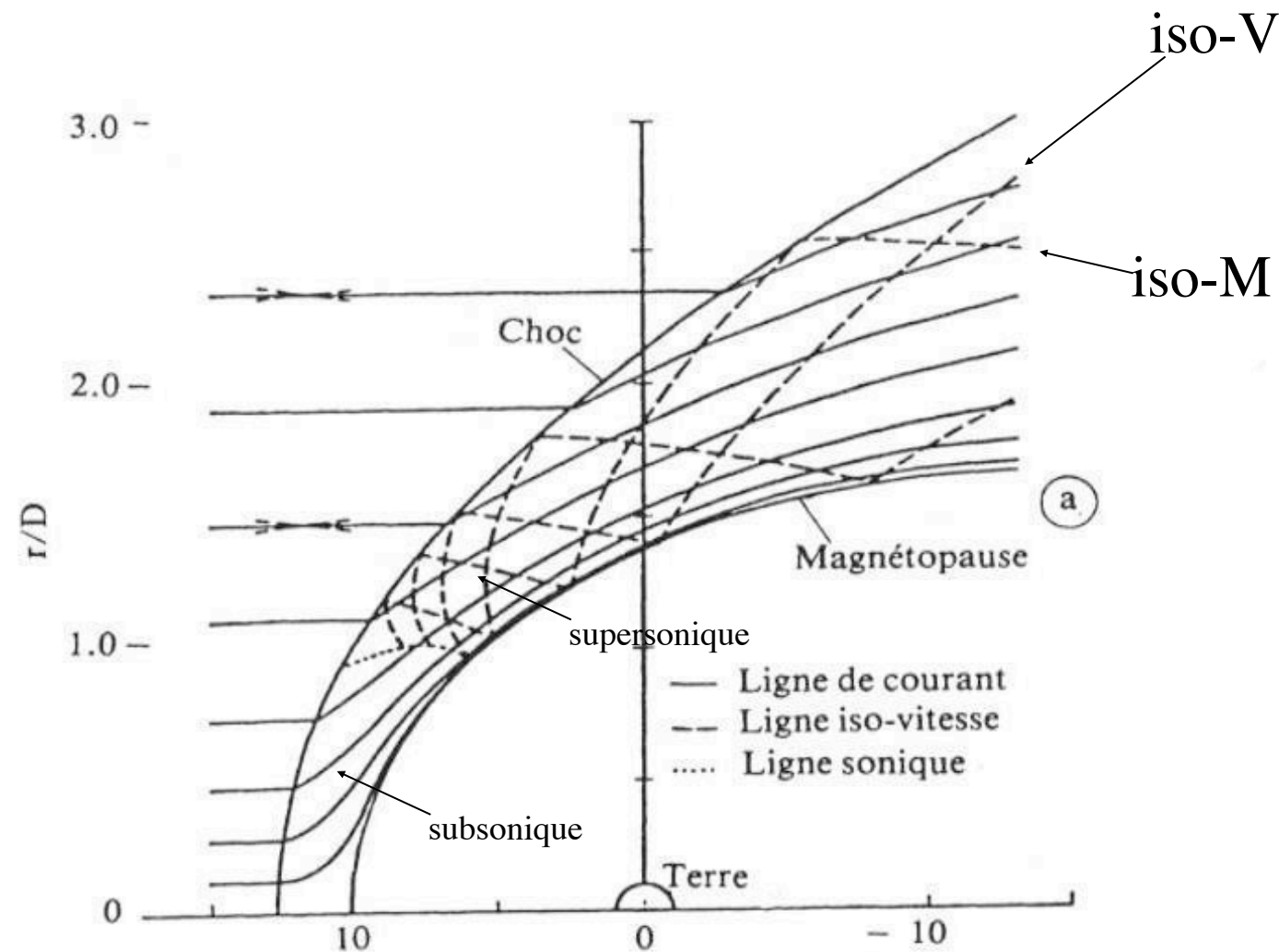


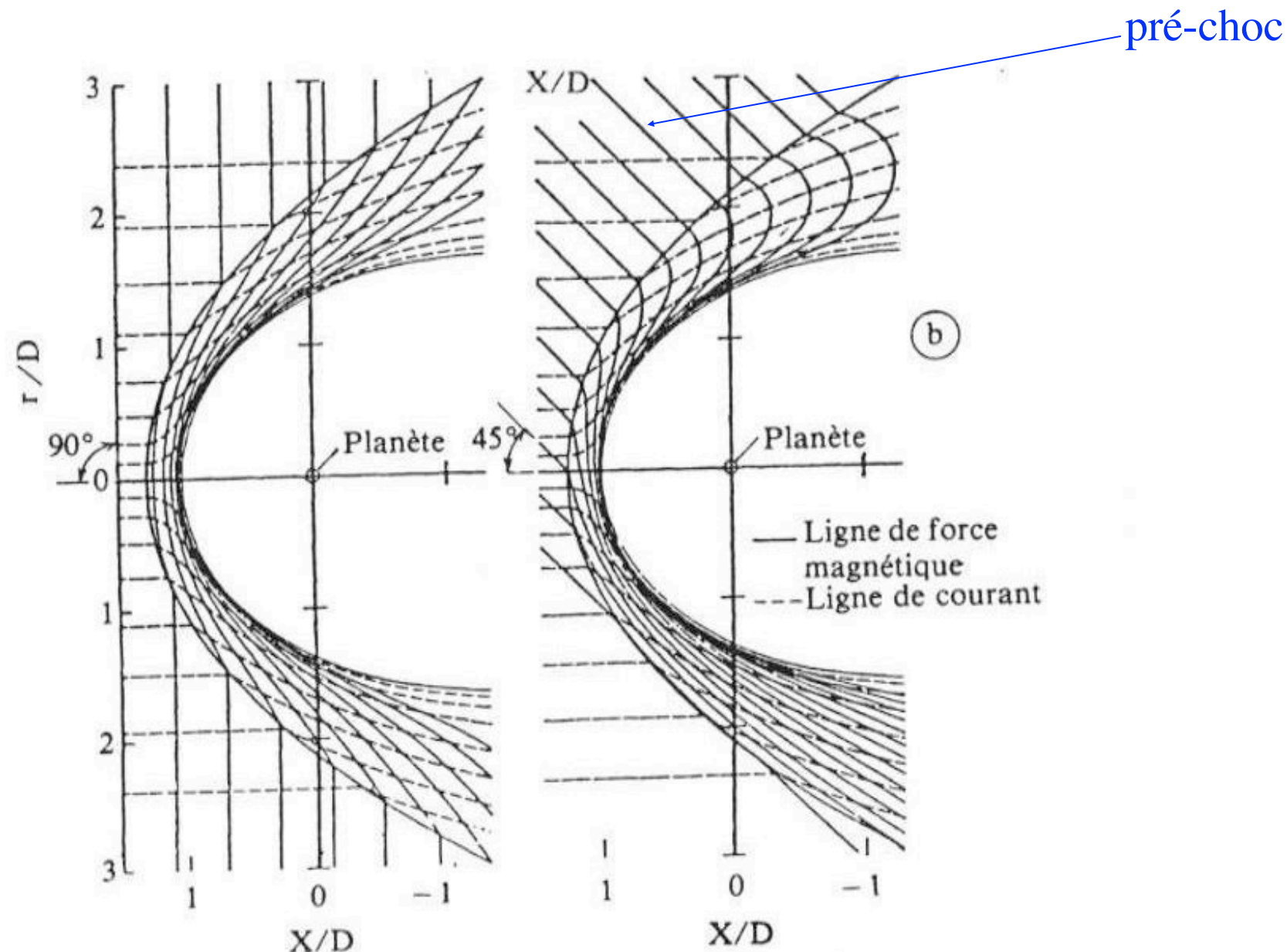
FIG. 5-37 – Résultats d'une simulation hydrodynamique de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre, présentés en coupe dans le plan de l'écliptique. (D'après J. R. Spreiter, A. L. Summers et A. Y. Alkne, « Hydromagnetic Flow around the Magnetosphere », *Planetary and Space Science*, 14, 223, © 1966 Pergamon Journals Ltd.)

→ distribution de B dans la magnétogaine calculée d'après l'équation du gel :

$$\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B} \quad \text{et} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad \rightarrow \quad \partial \mathbf{B} / \partial t + \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0$$

Dans la magnétogaine, sur la ligne Soleil-Terre, en régime stationnaire,

$$\nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = \partial (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) / \partial x = 0 \rightarrow \mathbf{V} \cdot \mathbf{B}_{\perp} = c^{te}$$



→ intensification de B par empilement $\propto$ décélération de l'écoulement

→ la pression dynamique du VS en amont du choc ($\propto V^2$) se retrouve convertie en pression magnétique ($\equiv$, $\propto B^2$) en amont de la magnétopause.

Ok/observations, sauf flancs côté queue, du fait des hypothèses simplificatrices (notamment gel).

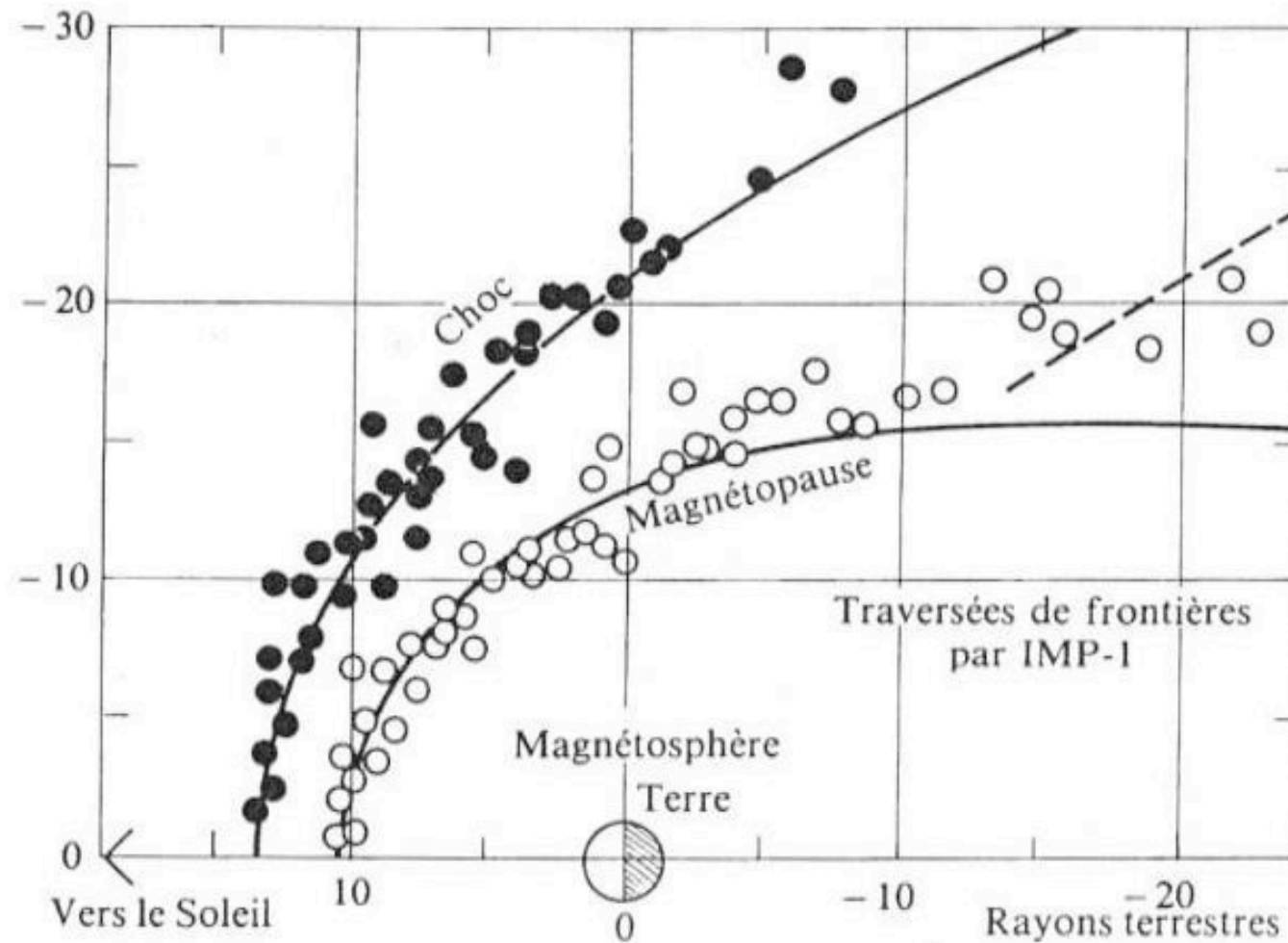


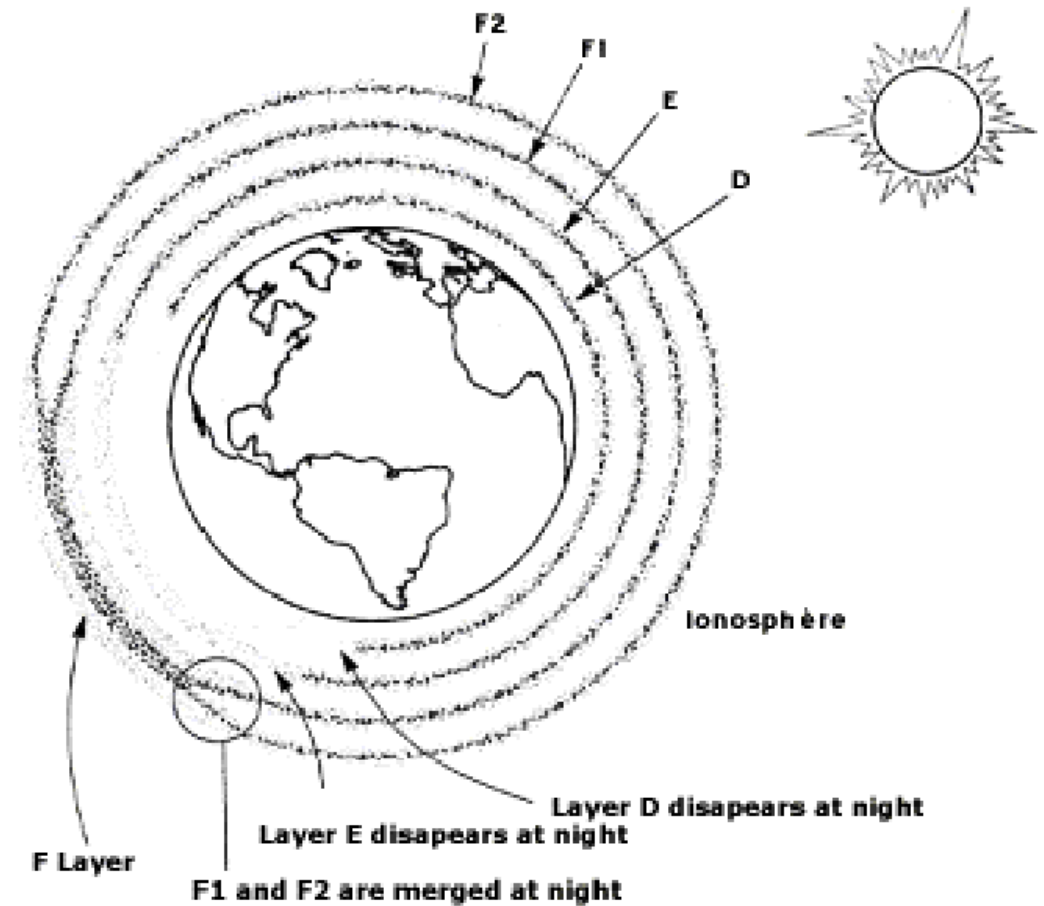
FIG. 5-38 – Les positions du choc et de la magnétopause dans le plan de l'écliptique prévues par la simulation hydrodynamique (figure 5-37) peuvent être ajustées avec un très bon accord aux positions de ces frontières relevées par les satellites (ici *IMP-1*) pour des valeurs semblables de la pression dynamique du vent solaire (les positions observées du choc sont marquées par un point noir, celles de la magnétopause par un cercle).

La magnétopause ci-dessus est imperméable au flux magnétique ($B_N=0$) et donc au plasma du VS : on parle de **magnétosphère « fermée »**.

Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr



3. Structure et dynamique de l'ionosphère (bref rappels)

3.1 Conductivités et courants ionosphériques

3.2 Diffusion verticale du plasma

3.3 Les ionosphères terrestre et planétaires

3.4 Couplage ionosphère-magnétosphère

3.1 Conductivités et courants ionosphériques

- Atmosphère neutre (haute = thermosphère/hétérosphère, stratifiée, équilibre hydrostatique) :
profil vertical = loi barométrique / constituant, $H_i = kT_i(z)/M_i g(z)$
au-dessus : exosphère non-collisionnelle

- Équation de continuité / espèce (électrons, ions) : $\partial N_i / \partial t + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = Q_i - L_i$
sources d'ionisation = Q, pertes = L

→ productions de couches ionosphériques en fonction de la pénétration de la source d'ionisation / profil de densité et composition des neutres

= Plasma de faible énergie (0.1-1 eV) → couplé à $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$, & au gaz neutre (collisions & ionisation/recombinaison)

- Equations du mouvement / espèce (termes dominants = champ e.m. et collisions / neutres)

→ Calcul des conductivités et des courants : *loi d'Ohm ionosphérique*

$$\mathbf{j} = N e (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_e) = \sigma_{//} \mathbf{E}'_{//} + \sigma_P \mathbf{E}'_{\perp} + \sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{E}'_{\perp} \quad (\mathbf{b} = \mathbf{B}/|\mathbf{B}|)$$

$$\sigma_{//} (//\mathbf{B}), \quad \sigma_P (Pedersen, \perp \mathbf{B} // \mathbf{E}), \quad \sigma_H (Hall, \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{E})$$

- σ_P, σ_H élevés pour $z \in [\sim 100, 150]$ km = seule couche où circulent $j_\perp$ non négligeables (limitées par la mobilité des ions) = dynamo ionosphérique
- $\sigma_{//} \gg$, essentiellement portée par les électrons
- au-dessous de 100 km, $j=0$ (collisions $\uparrow \uparrow$) ; au-dessus de 160 km, $j \sim j_{//}$

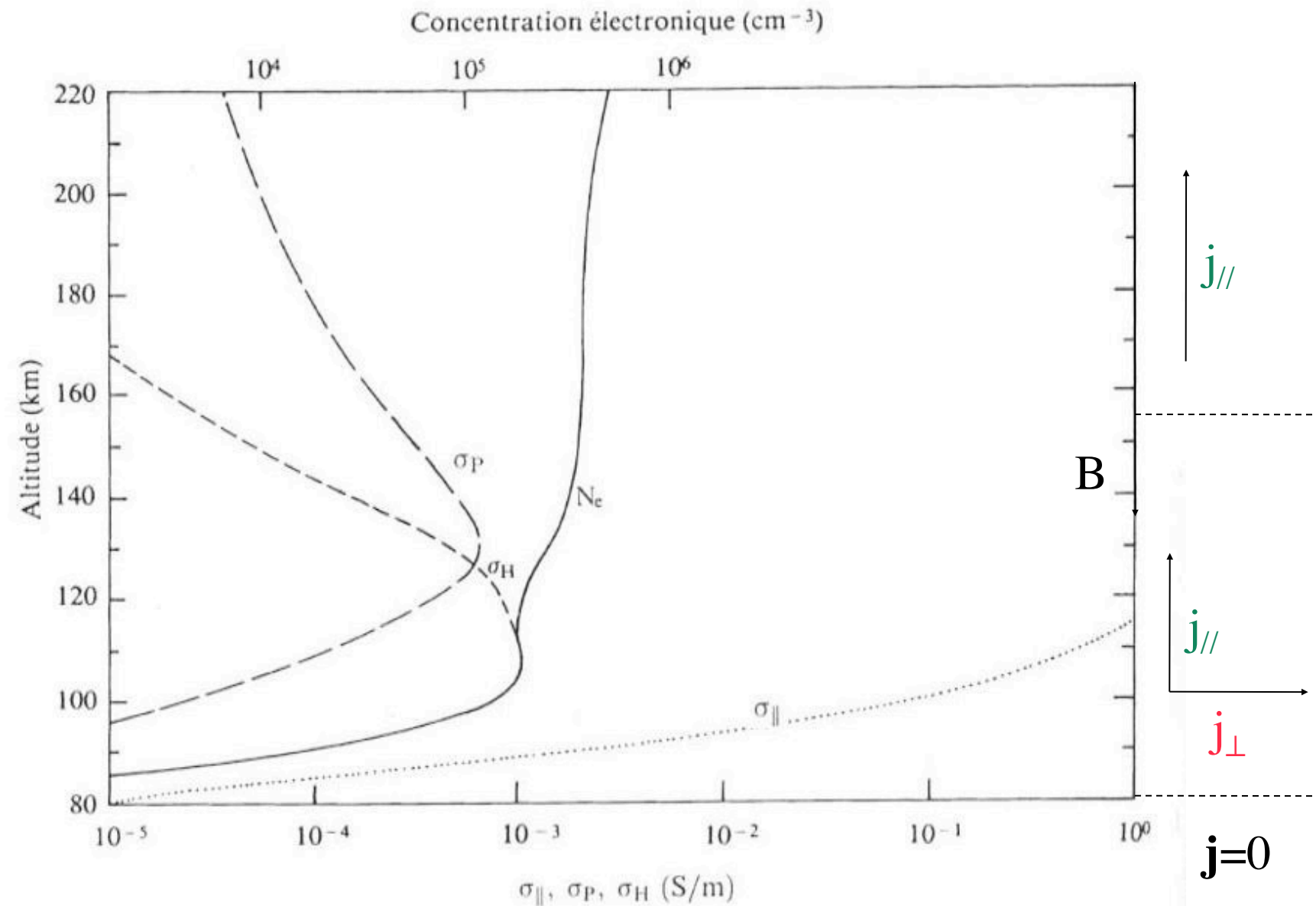


FIG. 5-24 – Profils verticaux des conductivités parallèle $\sigma_{//}$, Hall σ_H , Pedersen σ_P , pour des conditions typiques des moyennes latitudes de jour. Le profil de concentration électronique est superposé avec une échelle différente. On voit que la conductivité parallèle est supérieure (de plusieurs ordres de grandeur) aux conductivités de Hall et de Pedersen à toutes les altitudes ionosphériques. La couche où les conductivités perpendiculaires sont importantes s'étend de 90 à 160 km d'altitude environ. C'est la « couche dynamo » de l'atmosphère terrestre. (D'après A. D. Richmond, « Thermospheric Dynamics and Electrodynamics », *Solar-Terrestrial Physics*, Carovillano et Forbes, Éd., D. Reidel Publishing Company, 1983.)

3.2 Diffusion verticale du plasma

- L'ionosphère comme source de plasma magnétosphérique (diffusion verticale) :
 $\parallel \mathbf{B}$, on doit avoir $\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_e$ pour conserver la quasi-neutralité
 $\rightarrow$ transport vertical des couches ionosphériques (sauf près de l'équateur magnétique)
- Des équations du mouvement + *hyp. simplificatrices* ($N_i = N_e = N$, $m_e \ll m_i$, $m_e v_e \ll m_i v_i$), on tire $\parallel \mathbf{B}$:

$$\mathbf{V}_{\parallel i} = \mathbf{V}_{\parallel e} = \mathbf{V}_{\parallel} = 1/mv (\pm e E_{\parallel} - \nabla_{\parallel} P_i / N - mg)$$
 avec $E_{\parallel} \sim - \nabla_{\parallel} P_e / Ne$ (champ électrique de diffusion *ambipolaire*: ions et électrons sont animés d'un même mouvement)

$$\rightarrow \mathbf{V}_{\parallel} = -D [\nabla_{\parallel} \ln P + 1/H] \approx -D [\nabla_{\parallel} \ln N + 1/H]$$
 avec $P = P_i + P_e = NkT$, $T = T_i + T_e$, $H = kT/mg$, $D = kT/mv$ (coefficient de diffusion *ambipolaire*, caractérise la diffusion du plasma, e- & ions, dans son ensemble)
- En régime stationnaire : $\nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = d(N_i V_{iz})/dz = Q_i - L_i$

$$V = 0 \text{ (équilibre diffusif)}$$
 &
$$Q = L \text{ (équilibre photochimique)}$$

$$\rightarrow N = N_0 \exp(-(z - z_0)/H) \text{ (équilibre diffusif)}$$
 avec $H_{\text{plasma}} \sim 2 H_{\text{gaz neutre}} \quad (T_i \sim T_e \sim T_n, m_i \sim m_n)$
- La moitié de la masse des ions est supportée par leur grad. de pression partielle, l'autre moitié par le champ él. ambipolaire, i.e. « tirée » vers le haut par les électrons.

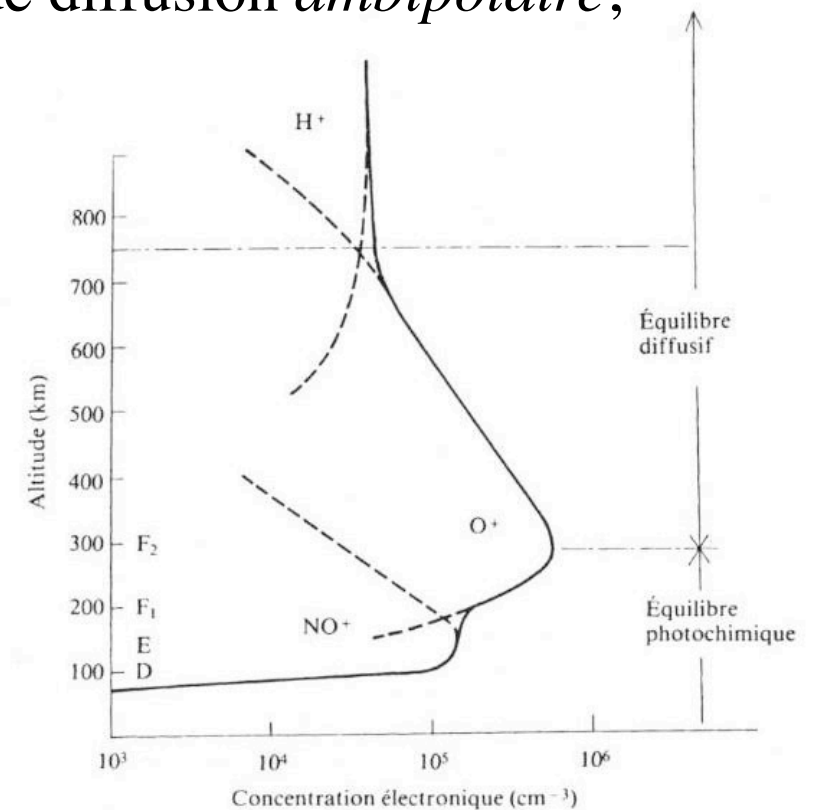


FIG. 5-23 – Allure typique du profil des concentrations ioniques dans l'ionosphère terrestre. Dans la basse ionosphère, le profil de la couche d'ions moléculaires NO^+ est typique de l'équilibre photochimique, de même que le bas de la couche d'ions O^+ (au-dessous du maximum). La partie supérieure de la couche d'ions O^+ , ainsi que la couche de protons qui « flotte » au-dessus d'elle, sont au contraire typiques de l'équilibre diffusif. (D'après R. W. Schunk, *Ibid.*)

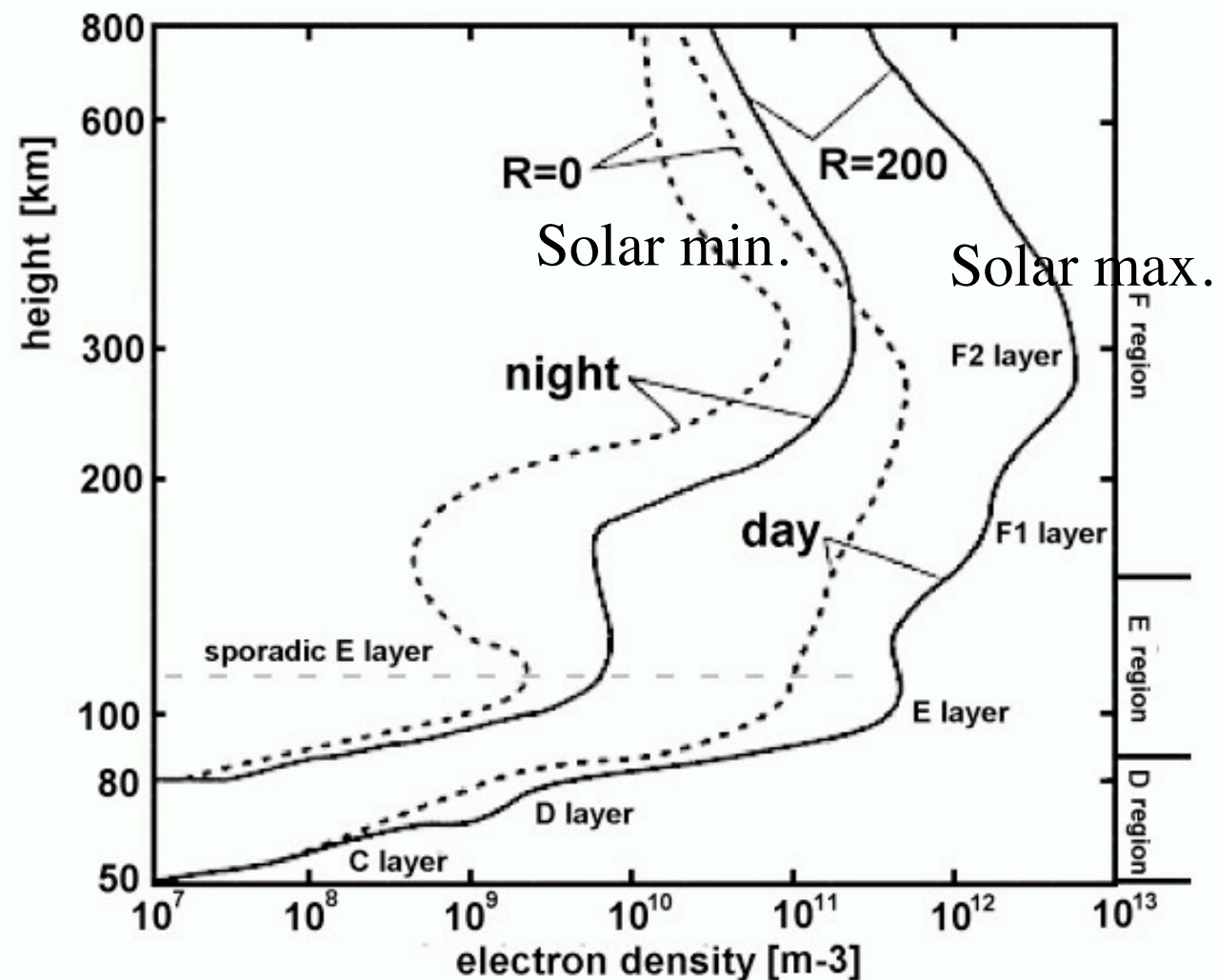
3.3 Les ionosphères terrestre et planétaires

Ionosphère terrestre

→ Formation de plusieurs couches en fonction de la composition de l'atmosphère et des processus dominants :

- *Basses couches* : très collisionnelles, recombinaison rapide, transport négligeable, dominées par ionisation/recombinaison
- *Hautes couches* : peu collisionnelles, dominées par diffusion/transport

$T_{\text{ionosphère}} \sim T_{\text{exosphère}} \sim 1000 \text{ K}$; énergie du plasma $\sim 0.1\text{-}1 \text{ eV}$.



Couche (ou région) D : $z=60-90$ km

- Source principale = ionisation de NO par UV solaire (Ly- α à 121.6 nm)
- Pertes par recombinaison dissociative de NO⁺

$N_e \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ de jour à 90 km, ne subsiste pas la nuit (v_{en} élevée)

Couche E : $z=90-150$ km

- Source principale = ionisation de O et N₂ par UV (Ly- β & continuum) & X (1-10 nm)
- Pertes par recombinaison dissociative des ions moléculaires NO⁺ et O₂⁺ (formés à partir de O⁺ et N₂⁺)

$N_e \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ de jour à 110 km, $N_e \sim 10^{3-4} \text{ cm}^{-3}$ de nuit

($N_{e-\max} \propto \cos^{1/2}\chi$; χ angle d'incidence du rayonnement solaire)

- + Ionisation météoritique sporadique importante (ions métalliques à longue durée de vie)
- couches fines denses ~100 km, sous l'effet du cisaillement par les vents horizontaux.

Couche F : $z>150$ km

- Source principale = ionisation de O par FUV (80-200 nm)
- Pertes via réactions ioniques (O₂+O⁺→O₂⁺+O, N₂+O⁺→NO⁺+N) lentes (notamment au-dessus de 200 km), puis recombinaison dissociative (O₂⁺+e⁻→O+O, NO⁺+e⁻→O+N)

→ couches F₁ et F₂

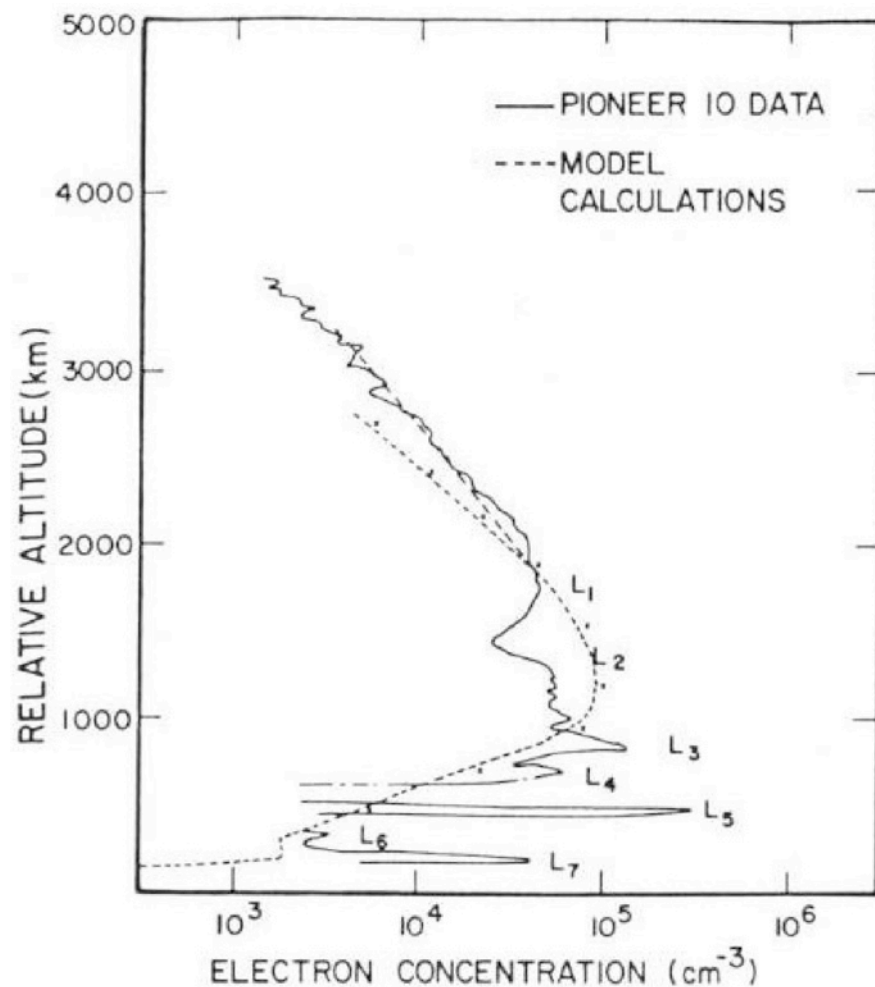
$N_e \sim 10^{5-6} \text{ cm}^{-3}$ de jour à 250-400 km, $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ (F₁) à 10^5 cm^{-3} (F₂) de nuit

Dans la couche F₂, diffusion verticale vers le haut de jour, et vers le bas (depuis la MS) de nuit (car du fait de la recombinaison à basse altitude, E ambipolaire décroît voire change de sens), qui maintient une densité électronique élevée.

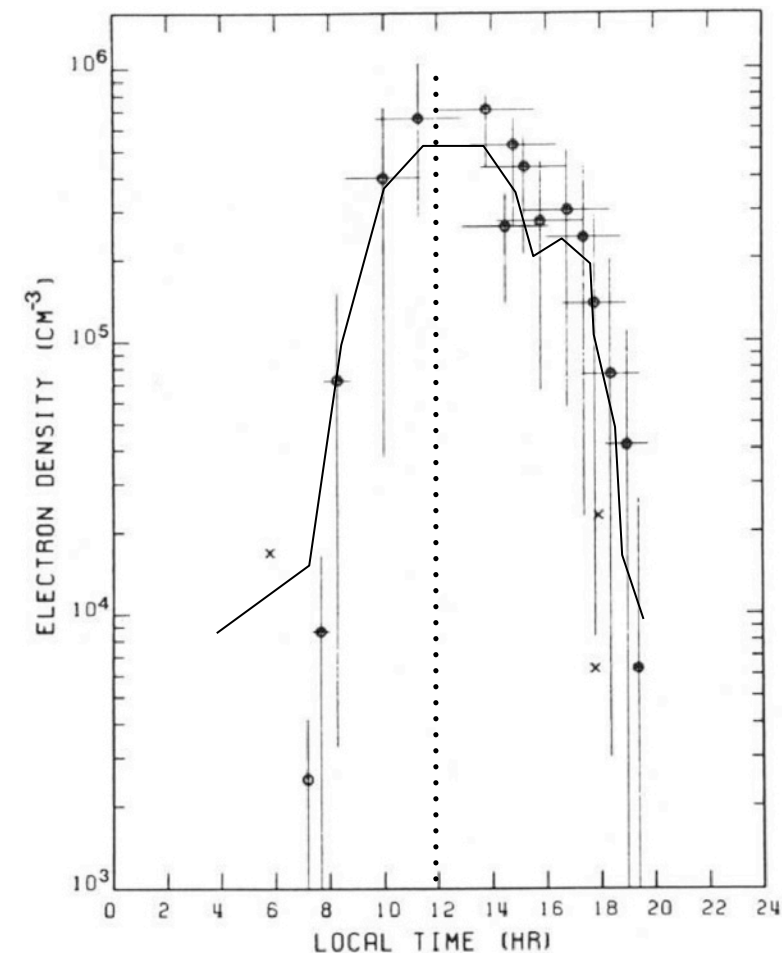
Ionosphères planétaires

- Plasma froid (0.1-1 eV), >100 km, fonction de la composition atmosphérique, $N \sim 10^{5-6} \text{ cm}^{-3}$ (<< neutre).
- Planètes géantes : UV solaire faible ($\propto R^{-2}$), ionisation particulière d'origine magnétosphérique + importante.

Jupiter : basses couches d'origine météoritique
→ très forte absorption radio.



Saturne : ionosphère sondée par coupure & absorption du rayonnement radio HF (lien sonde/Terre, éclairs d'orages ...)



3.4 Couplage ionosphère-magnétosphère

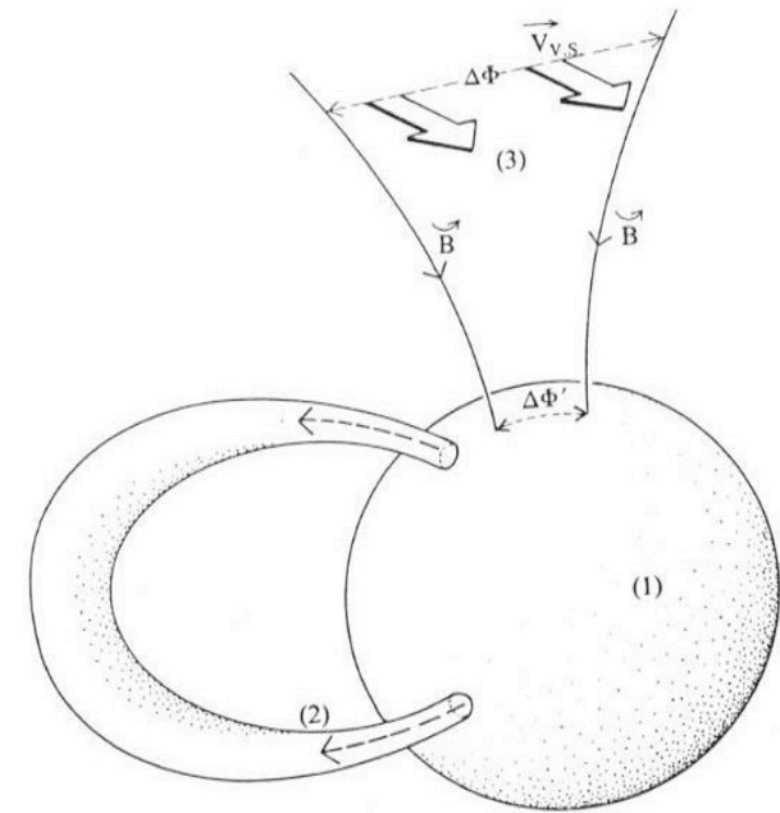
Ionosphère :

- Coquille conductrice [100, 150] km, de quelques H_n
- Source de plasma froid (0.1-1 eV), diffuse //t **B**
 - rend les lignes de champ très conductrices ($\sigma_{//} \gg$)
 - $E \cdot B = 0$ (équipotentiels électriques) → vont porter les courants

Origine des courants ?

- *Mouvements atmosphériques (vents neutres + collisions)*
 - « *dynamo ionosphérique* » dans la couche [100,150] km, où $j_{\perp}$ élevés (σ_P & $\sigma_H \uparrow \uparrow$)
- *Mouvements VS / MS et satellites / MS (cf. + loin)*
- *Diffusion radiale du plasma à partir des satellites (Io - cf. + loin)*
- ...
- L'ionosphère assure la fermeture des circuits de courants magnétosphériques par $j_{\perp}$ = couplage MS-IS.

Note : Mercure : ~pas d'atmosphère donc ~pas d'ionosphère → fermeture des courants MS ?



Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr

4. Circulation du plasma magnétosphérique

4.1 Circulation dans une magnétosphère fermée

4.2 Le concept de magnétosphère ouverte

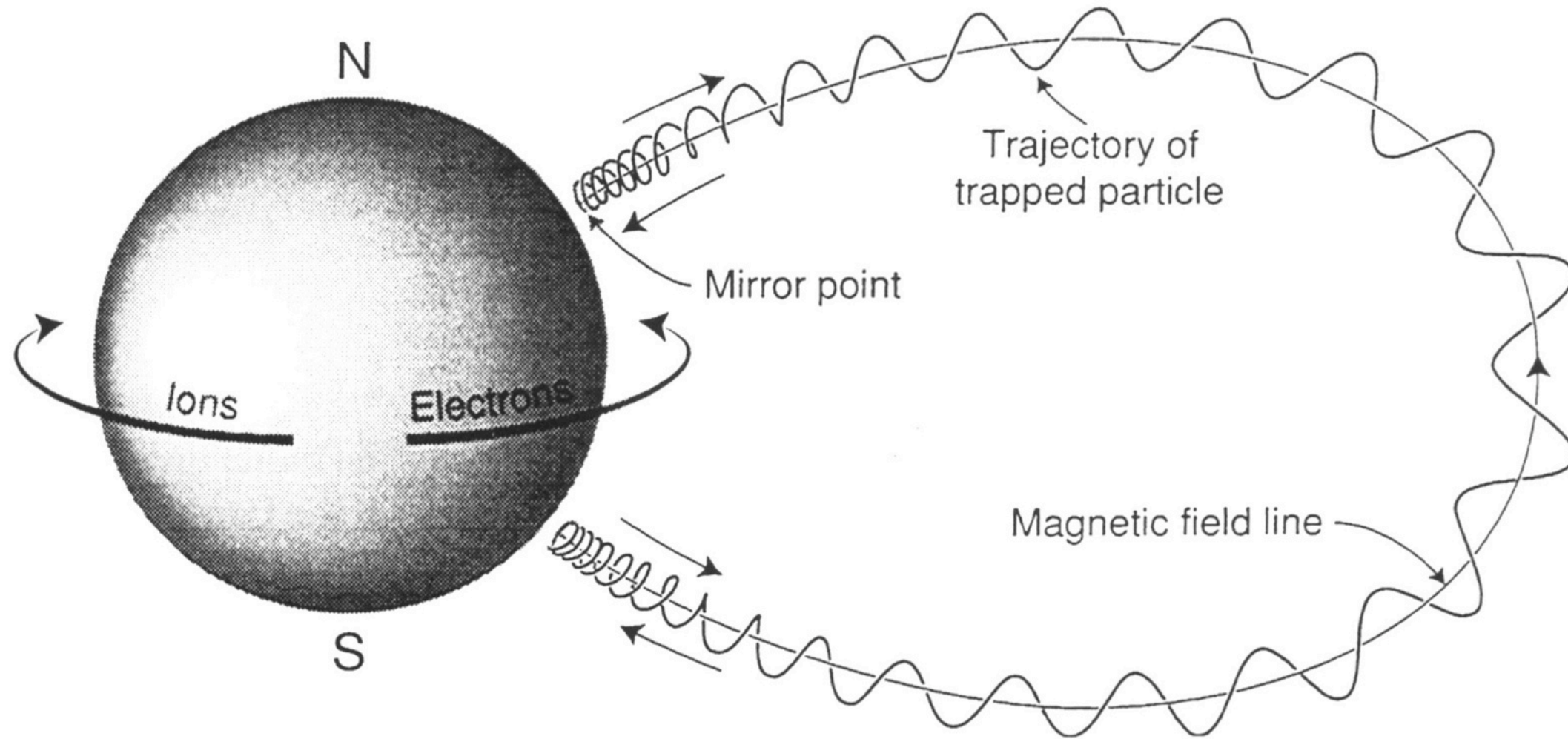
4.3 Convection

4.4 Corotation

4.5 Circulation globale du plasma thermique

4.6 Régions magnétosphériques

4. Circulation du plasma magnétosphérique



Dynamique des particules chargées dans un champ magnétique dipolaire:

- **giration** (cyclotron) autour du champ magnétique
- **rebond** entre les points miroir
- **dérive** perpendiculaire à B

→ associés à 3 invariants

- Giration : $\mathbf{F}_B = q\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ (B uniforme)
- $\Omega_c = qB/m$, $r_L = v_\perp / \Omega_c = m v_\perp / q B$

1^{er} invariant adiabatique :

variations lentes de B / giration

→ $\mu = mv_\perp^2/2B = \text{cte}$ (moment magnétique)

Conservation du 1^{er} invariant adiabatique μ du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique d'intensité variable :

Particule en mouvement le long d'une ligne de champ → « voit » B(t) variable

→ induit $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ ($\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$), qui modifie l'énergie perpendiculaire de la particule

Pour $\mathbf{B}$ dipolaire, dB/B au cours de $\tau_{\text{giration}} = 2\pi/\Omega_c$ est très faible :

$$dB/B \approx 3.dr/r \approx 3v_{//}\tau_{\text{gir}}/r \ll 3c\tau_{\text{gir}}/R_p \approx 6\pi m_e c / eBR_p$$

$$\approx 10^{-4} \text{ (pour la Terre) ou } 10^{-6} \text{ (pour Jupiter).}$$

→ B ~ c^t pour évaluer le travail de $\mathbf{E}$ durant une gyropériode :

$$\int_{2\pi R_{Le}} m_e . dv_\perp / dt . dl = \int_{2\pi R_{Le}} e \mathbf{E} . d\mathbf{l} = e \iint_{\pi R_{Le}^2} \text{rot } \mathbf{E} . d\mathbf{S} = -e \iint_{\pi R_{Le}^2} \partial \mathbf{B} / \partial t . d\mathbf{S}$$

avec $r_{Le} = m_e v_\perp / eB$

d'où $(2\pi m_e^2 v_\perp / eB) dv_\perp / dt = e\pi (m_e v_\perp / eB)^2 dB/dt$

→ $2 dv_\perp / v_\perp = dB/B$ → $v_\perp^2/B = \text{cte}$

• Rebond :

$\mathbf{F}_B$ ne travaille pas

→ en l'absence de $E_{//}$, $W_{\text{tot}} = \text{cte} = m(v_{\perp}^2 + v_{//}^2)/2 = mv_{//}^2/2 + \mu B$ (1)

→ Quand B augmente (vers les hautes latitudes magnétiques)

$v_{\perp}$ augmente aux dépens de $v_{//}$ jusqu'à ce que $v_{//}=0$

→ $W_{\text{tot}} = \mu B_M \rightarrow B_M = W_{\text{tot}}/\mu =$ champ magnétique au point « miroir »

La particule rebrousse alors chemin le long de B

→ mouvement périodique de rebond entre les 2 points miroir aux extrémités de la ligne de champ

2ème invariant adiabatique :

On montre que pour des variations lentes de B / période de rebond

→ $\int_{\text{Période-de-rebond}} p_{//} ds = \text{cte}$

(1) → $2m\mu(B_M - B) = p_{//}^2$

d'où $(8m\mu)^{1/2} \int_{M1}^{M2} (B_M - B(s))^{1/2} ds = \text{cte}$ (intégrale de rebond)

Quand la longueur de la ligne de champ (donc $\int ds$) décroît (ex: compression) → $v_{//}$ augmente

- Dérives :

$\mathbf{F}$ appliquée (en plus de $\mathbf{F}_B$) accélère/décélère les particules au cours de leur giration

→ dérive $\perp \mathbf{F}$ et $\mathbf{B}$, avec la vitesse

$$\mathbf{u} = \mathbf{F} \times \mathbf{B} / qB^2$$

- pour $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$,

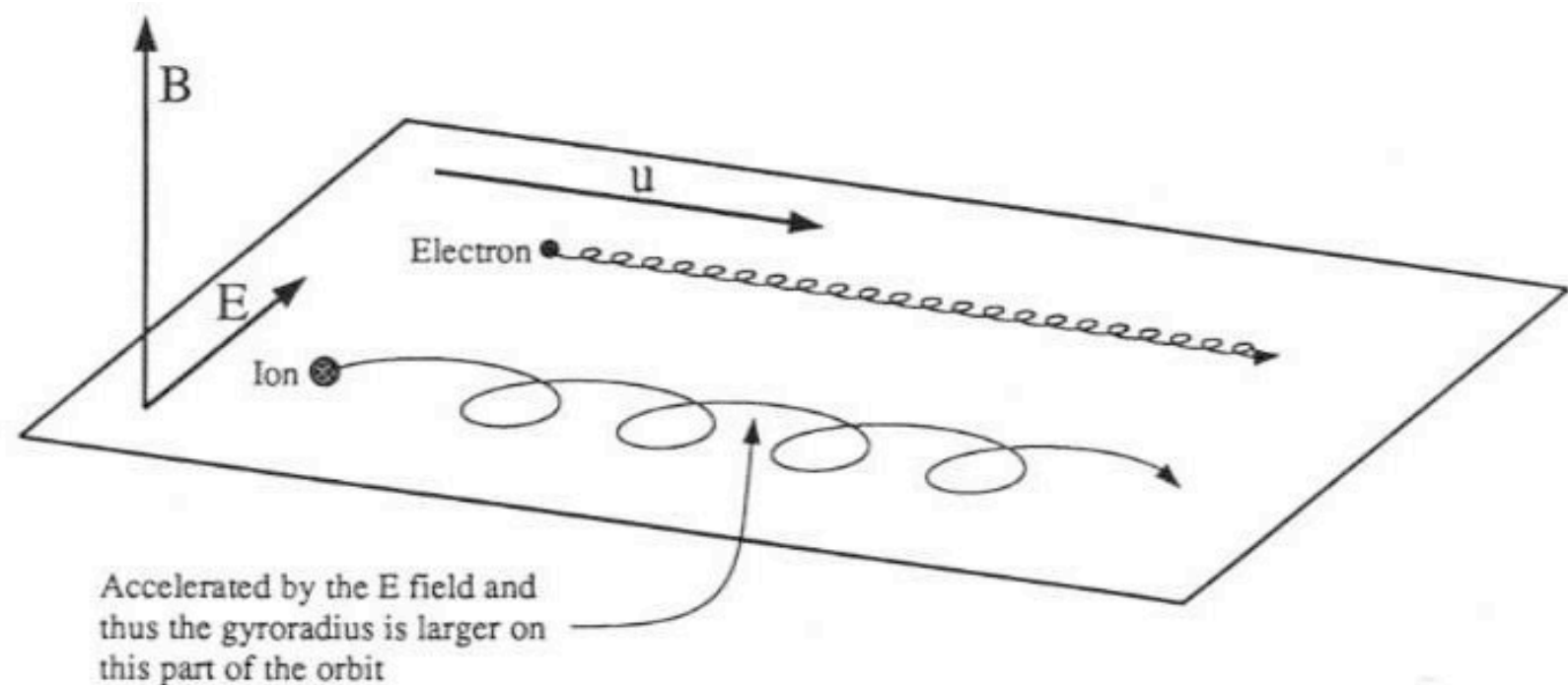
$$\mathbf{u} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$$

(dérive électromagnétique « en champs croisés » indépendante de la charge

→ n'introduit pas de courants $\mathbf{j}_\perp$)

- si $\mathbf{F}$ indépendante de q , dérive opposée pour les électrons et les ions → courants $\mathbf{j}_\perp$

FIG. 2.1. Schematic showing the motions of ions (charge e) and electrons (charge $-e$) in a uniform magnetic field $\mathbf{B}$ in the presence of an electric field $\mathbf{E}$ perpendicular to $\mathbf{B}$. The diagram represents motion in a plane perpendicular to the magnetic field. For both signs of the charge, the motion along the magnetic field is at constant velocity, unaffected by the presence of the fields.



Exercice 4 : montrer que la dérive est $\perp \mathbf{F}$ et $\mathbf{B}$, avec la vitesse $\mathbf{u} = \mathbf{F} \times \mathbf{B} / qB^2$

Dérives de gradient et courbure de $\mathbf{B}$:

- gradient $\nabla \mathbf{B} \perp \mathbf{B} \rightarrow$ variation de B au cours de la giration $\rightarrow$ dérive :

$$\mathbf{u}_G = -(mv_{\perp}^2/2) (\nabla \mathbf{B}/B) \times \mathbf{B}/qB^2 = -(\mu \nabla \mathbf{B}) \times \mathbf{B}/qB^2 = W_{\perp} \mathbf{B} \times \nabla \mathbf{B}/qB^3$$

avec $\mu = mv_{\perp}^2/2B$ moment magnétique

- courbure de $\mathbf{B} \rightarrow$ accélération centrifuge au cours de la giration $\rightarrow$ dérive :

$$\mathbf{u}_C = (mv_{\parallel}^2 \mathbf{r}_c/R_c) \times \mathbf{B}/qB^2 = 2W_{\parallel} \mathbf{r}_c \times \mathbf{B}/qR_c B^2$$

avec $\mathbf{r}_c/R_c = \partial \mathbf{b}/\partial s$, $\mathbf{b} = \mathbf{B}/B$, s = abscisse curviligne le long des lignes de force

3ème invariant adiabatique :

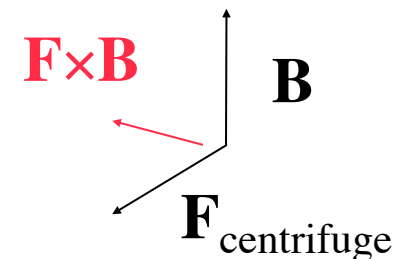
On montre que pour des variations lentes de B / période de dérive

$\rightarrow$ le flux magnétique limité par une coquille de dérive est conservé.

FIG. 1.19. Longitudinal drift of energetic charged particles in the earth's dipolar magnetic field. Electrons drift eastward in the direction of the earth's rotation, and protons westward.



(courbure)



- Echelles de temps :

$$\tau_{\text{giration}} = 2\pi/\Omega_c = 2\pi m/qB \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \tau_{\text{giration}}(\text{s}) &\approx 0.66 (100 \text{ nT} / B) && \text{(protons)} \\ &\approx 3.6 \times 10^{-4} (100 \text{ nT} / B) && \text{(électrons)} \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{rebond}} \sim 2 l_B / \langle v_{\parallel} \rangle \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \tau_{\text{rebond}}(\text{min}) &\approx 5 (l_B / 10 R_T) (1 \text{ keV} / W_{\parallel})^{1/2} && \text{(protons)} \\ &\approx 0.12 (l_B / 10 R_T) (1 \text{ keV} / W_{\parallel})^{1/2} && \text{(électrons)} \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{dérive-de-courbure}} \sim 2\pi r/u_C \sim 2\pi r q r B / 2W_{\parallel} \sim (\pi/W_{\parallel}) q B r^2 \sim (2/W_{\text{tot}}) q B r^2$$

$$\rightarrow \quad \tau_{\text{dérive}}(\text{h}) \approx 56 (r / 5 R_T)^2 (B / 100 \text{ nT}) (1 \text{ keV} / W)^{1/2}$$

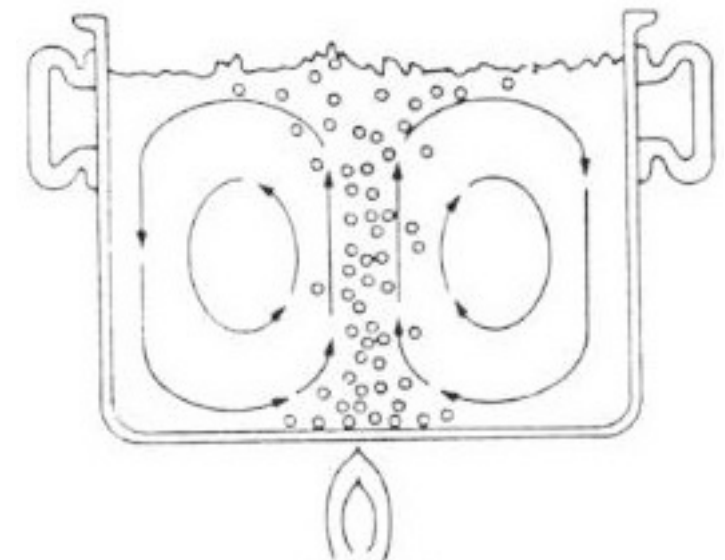
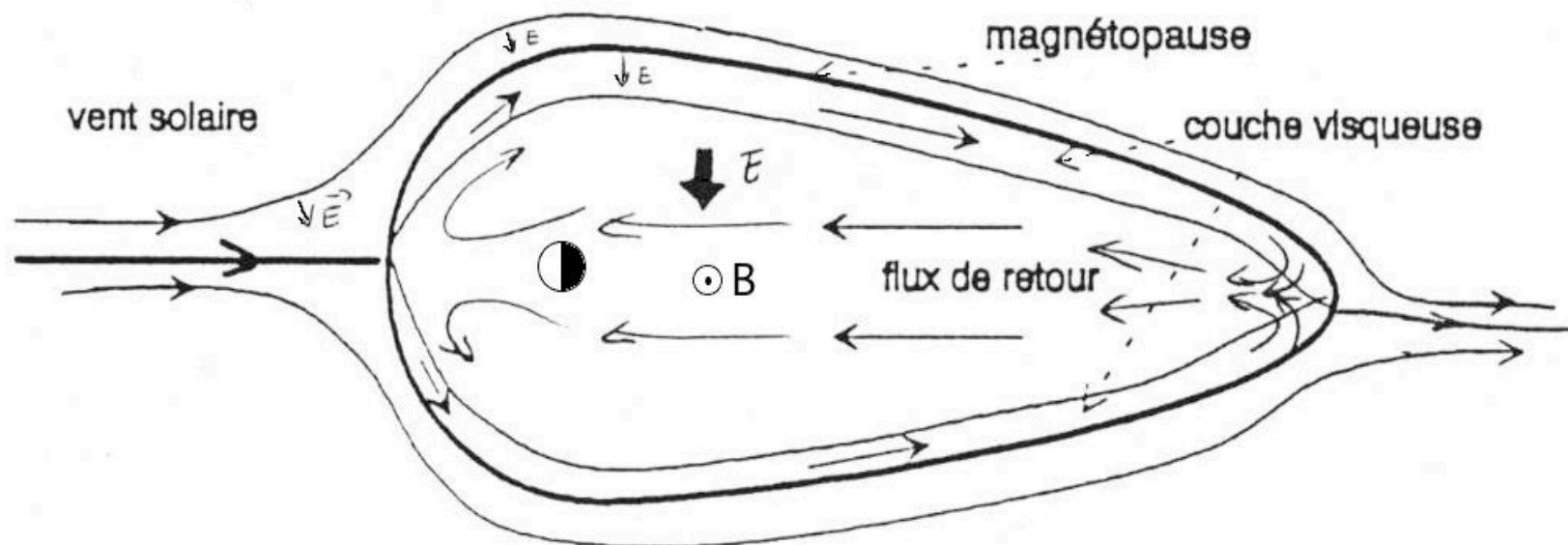
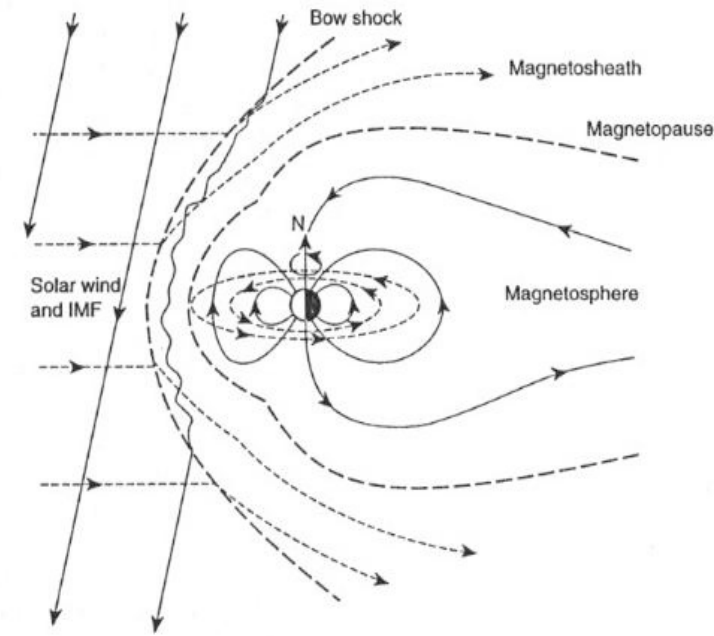
(protons & électrons)

- très différentes (>2 ordres de grandeur entre giration / rebond / dérive)
- séparation des échelles de temps
- pertinence des invariants adiabatiques.

4.1 Circulation dans une magnétosphère fermée

- MS fermée $\rightarrow$ le VS s'écoule sans pénétrer $\rightarrow V_{VS} \parallel$ magnétopause
- Les lignes d'écoulement du plasma sont équipotentiellles ($E \perp V$)
 - $\rightarrow$ la magnétopause aussi
 - $\rightarrow$ l'intérieur de la MS est électriquement découplé de l'extérieur
- Mais fort gradient de V à la magnétopause
 - $\rightarrow$ entraînement par friction sur quelques r_{Li} d'épaisseur
 - $\rightarrow$ écoulement antisolaire du plasma sur les flancs de la magnétopause
 - $\rightarrow$ retour vers le soleil à l'intérieur
 - $\rightarrow$ 2 cellules de convection magnétosphérique

~ Ok (qualitativement) /observations de la circulation de plasma,
mais ...

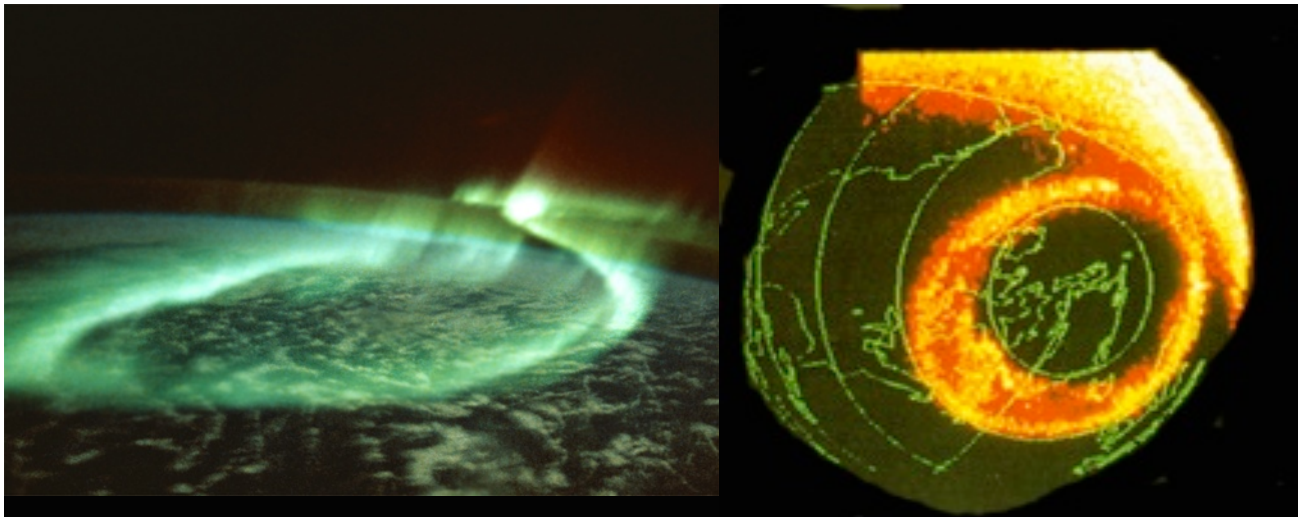


4.2 Le concept de magnétosphère ouverte

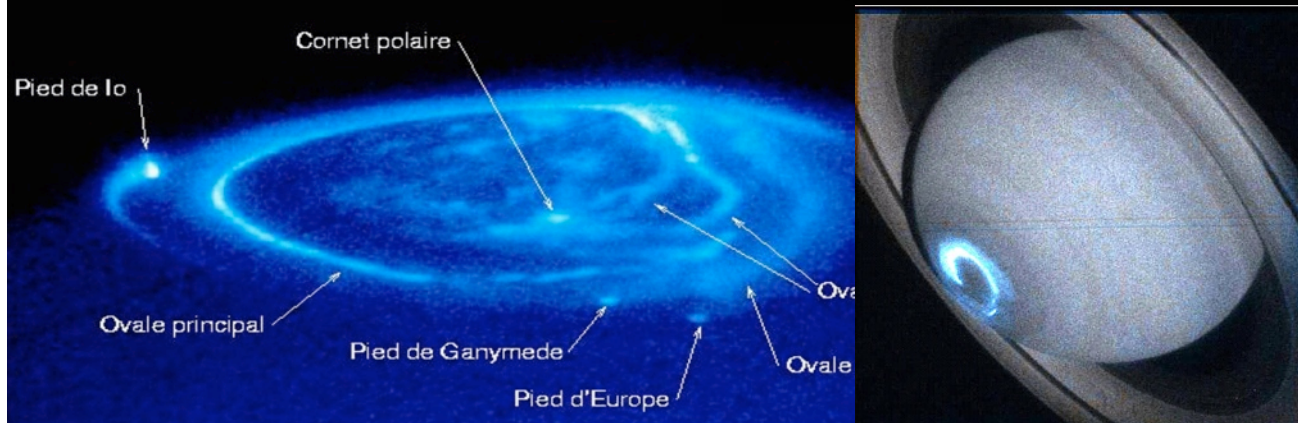
Observations

- Présence de plasma énergétique dans les MS
→ origine planétaire ? solaire (mécanisme de pénétration) ? processus d'accélération ?
- Existence d'un champ électrique à grande échelle à travers la MS
- Ceinture d'aurores ~permanentes (ovale lumineux ~circumpolaire magnétique, de rayon $\sim 10^\circ$ - 20°) et émissions radio associées

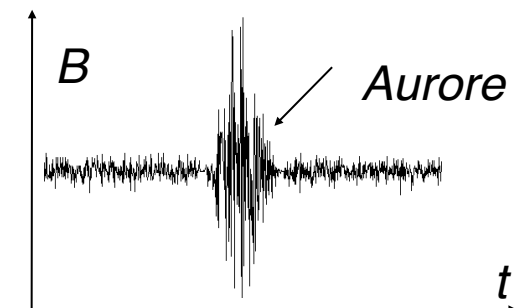
Terre



Jupiter



Saturne



- Contrôle par le VS (via B_z) de l'activité aurorale (intensité et rayon de l'ovale $\uparrow$) et géomagnétique (perturbations de B mesurées par les magnétomètres au sol et les satellites)
- Rôle prépondérant de la composante B_z (VS) : activité $\uparrow$ avec B_z sud $\uparrow$ (// B terrestre).

→ invalide le concept de magnétosphère fermée

→ sources ? transport du plasma ? circulation de courants, couplages avec l'ionosphère ?

Mesures satellites

→ ~1% du flux de matière du VS franchit la section efficace de la magnétopause
= une source de plasma pour les aurores et les ceintures de radiation.

→ ~10% de $E_{IP} = V_{VS} \times B_{VS}$ est transmis à l'intérieur de la magnétosphère.

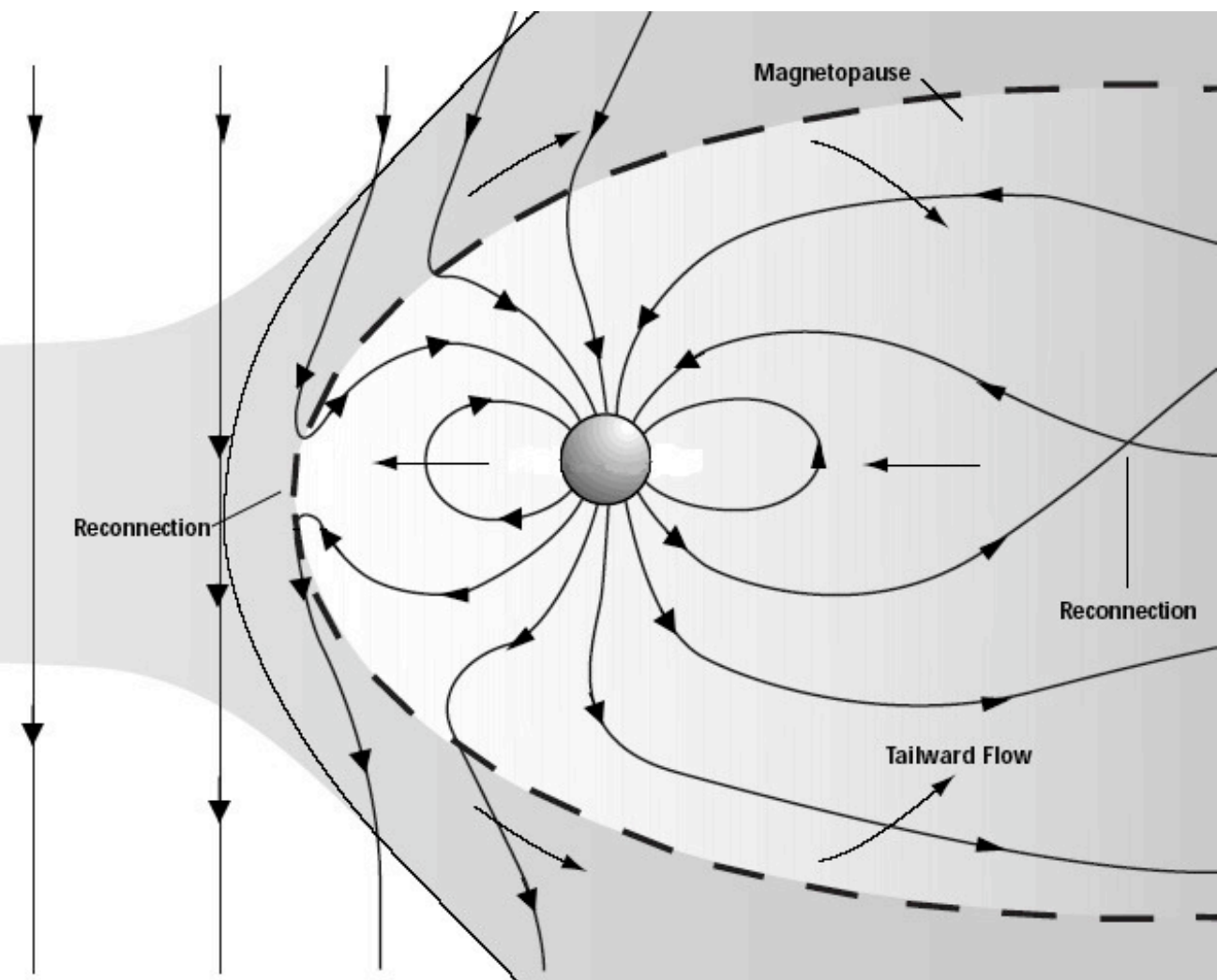
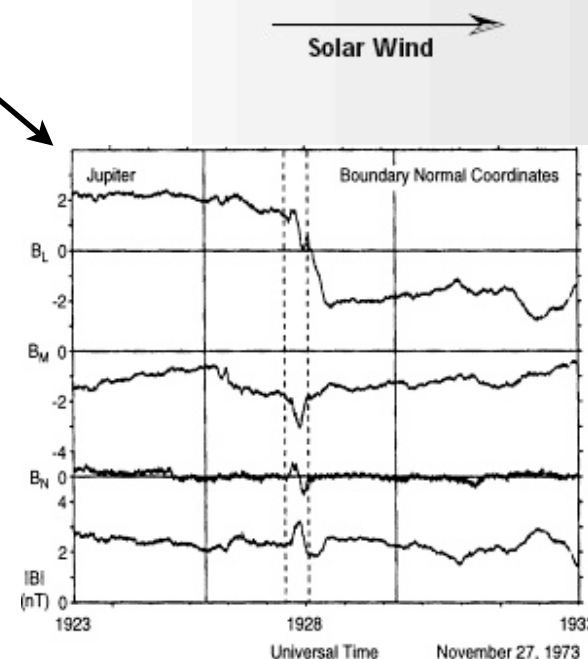
Modèle de Dungey (1961) : Reconnexion magnétique à la magnétopause

B_z sud → reconnexion de B_P & B_{IP} antiparallèles
(nappe de courant intense sur la magnétopause,
qui peut être instable - instabilité « de déchirement »)

→ reconnexion stationnaire ou sporadique
(«flux transfert events»)?

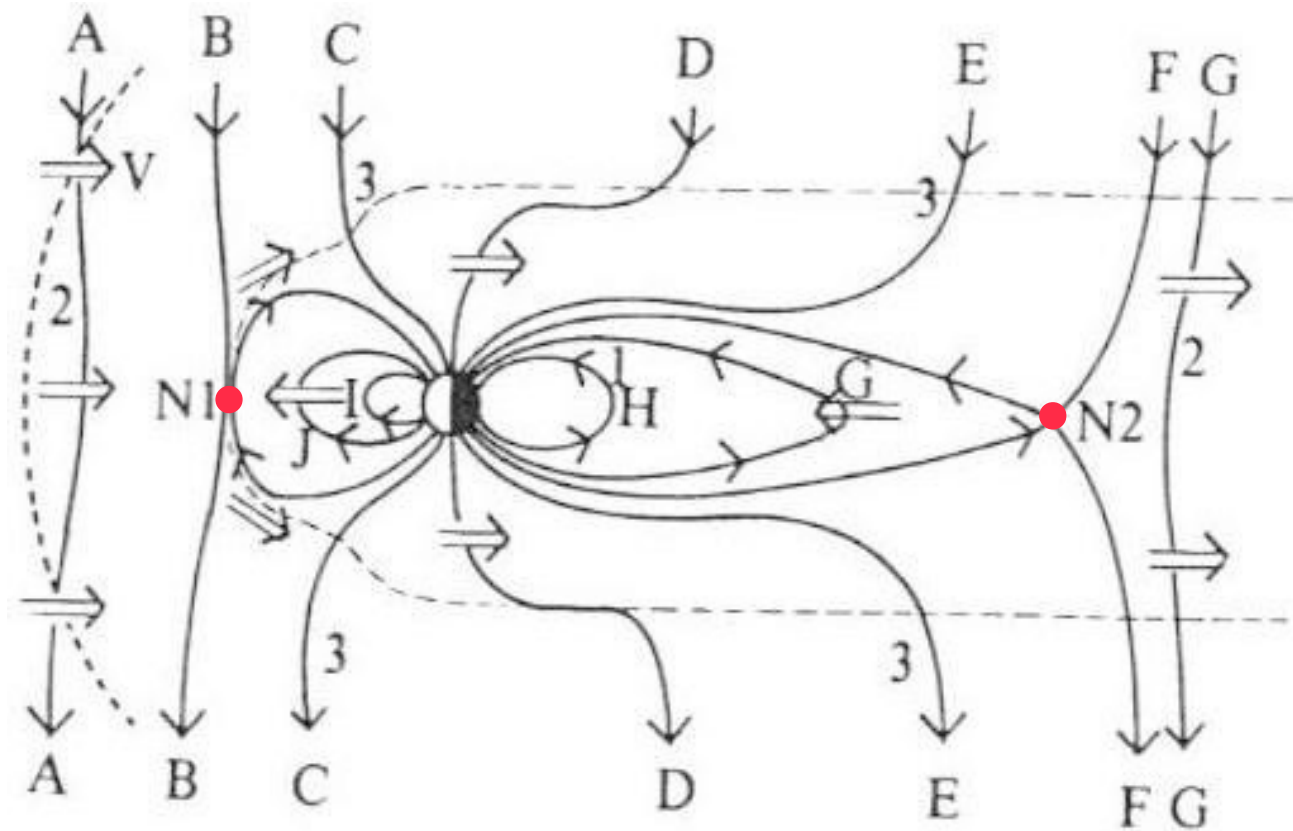
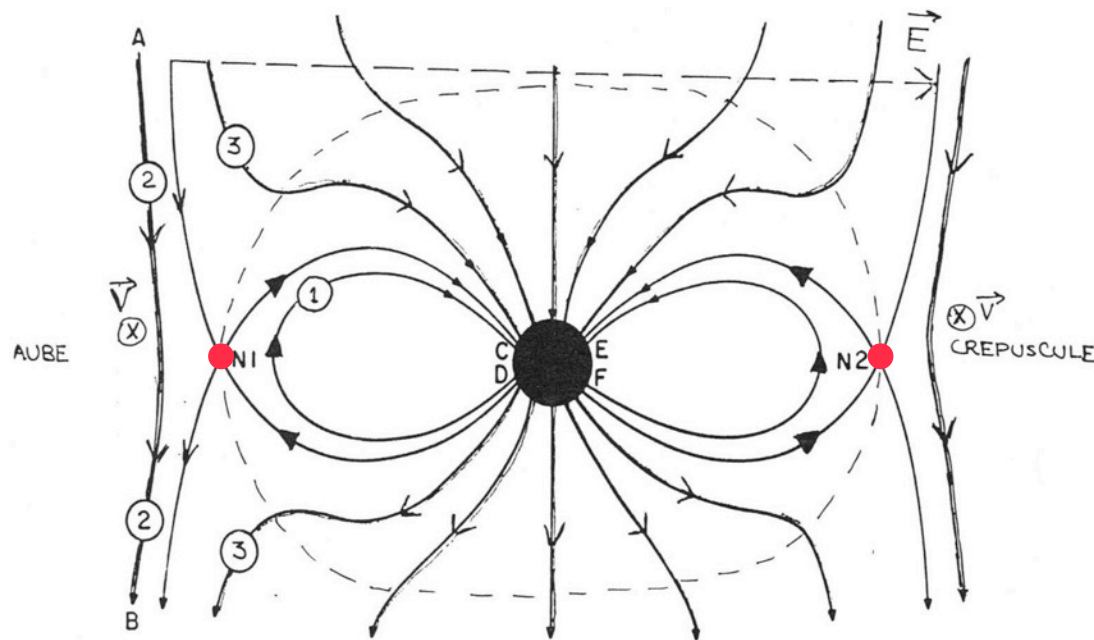
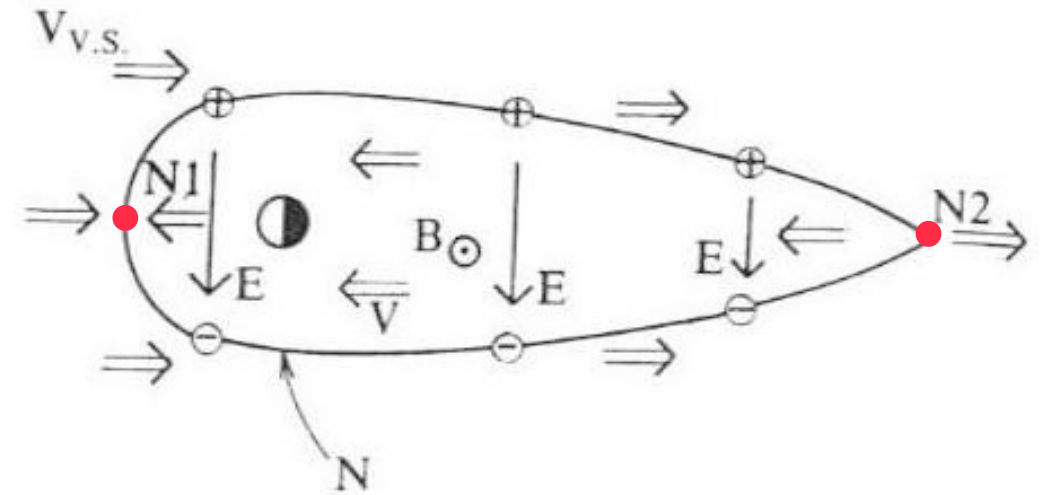
→ $B_N \neq 0$: pénération du plasma
du VS dans la MS ;
la magnétopause n'est
plus équipotentielle

→ ligne neutre à l'équateur
(autour de laquelle B
a une topologie en X)



→ 3 classes de lignes de **B** :

- (1) fermées (planétaires)
- (2) ouvertes (dans le VS et la magnétogaine)
- (3) semi ouvertes (connectent planète & VS)



- Limite entre (1) & (3) ~ **ovale auroral** = projection sur l'atmosphère, //^t B, de la ligne neutre circumplanétaire équatoriale (N1-N2).
- A l'intérieur de l'ovale, E(e-) ~ 1-10 eV, ~VS & magnétogaine
- Sur les ovales & à l'intérieur (à plus basse latitude) → E(e-) ~ 1-10 keV

- Quand B_z est orienté au N, pas de reconnexion
au nez de la magnétopause
→ ~ pas d'échange VS-MS
→ pas d'activité magnétosphérique
- En fait, reconnexions possibles à plus hautes latitudes
N & S → observé.

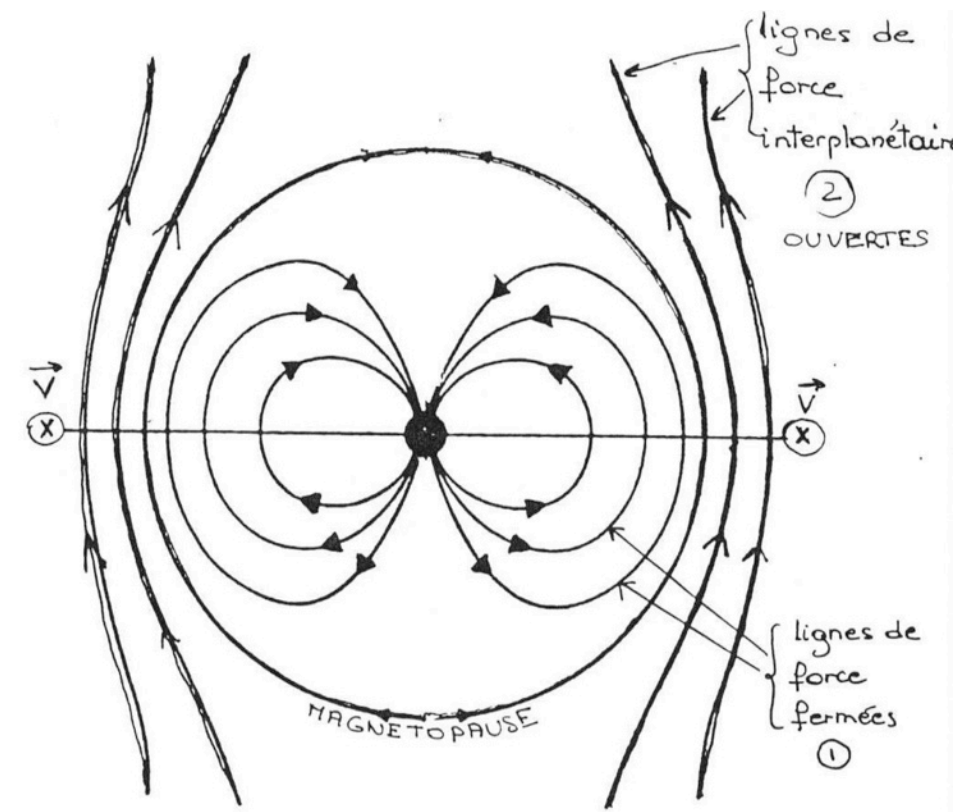
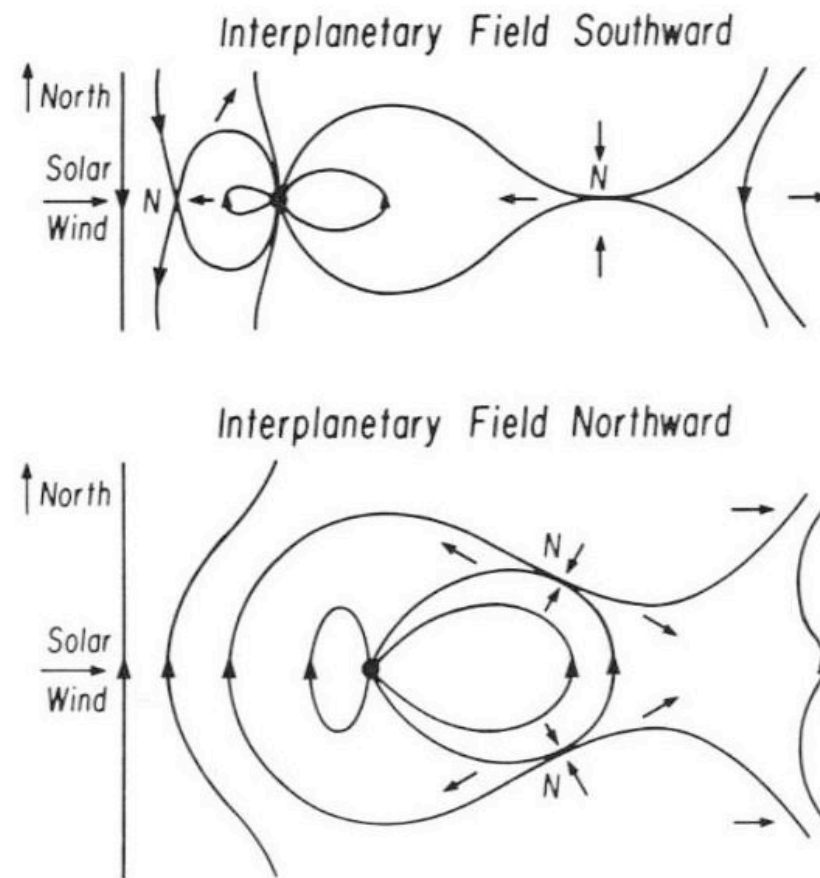


FIG. 1.16. Topology of the magnetosphere for northward and southward interplanetary fields, according to J. W. Dungey in the early 1960s. In the steady state, the plasma flows as indicated by the short arrows. (From Dungey, 1963a.)

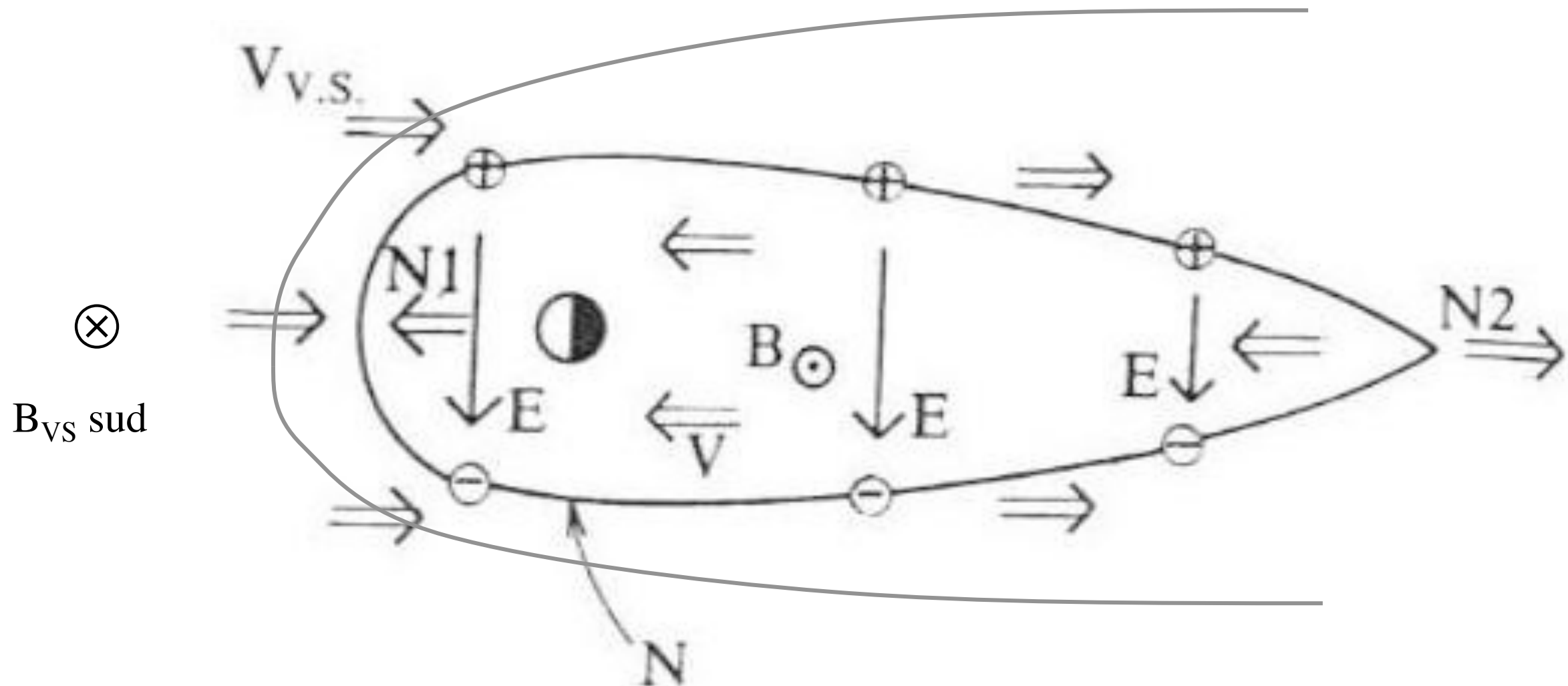


→ Configuration de type ouverte / fermée en alternance avec la rotation solaire.

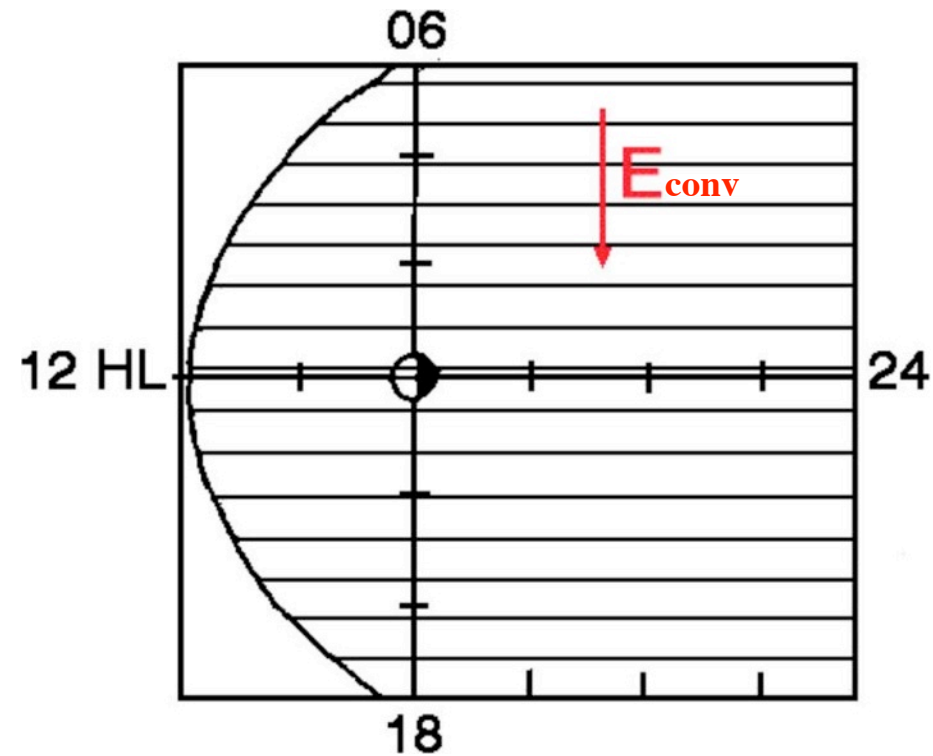
→ Circulation du plasma dans la magnétosphère ?

4.3 Convection

- Gel plasma/**B** vérifié sauf dans le voisinage immédiat de la ligne neutre.
 - les lignes (3) définissent la circulation du plasma MS :
circulation jour $\rightarrow$ nuit à haute latitude au-dessus des pôles
(à l'extérieur de la ligne neutre)
 - d'où circulation nuit $\rightarrow$ jour du plasma dans la MS (à l'intérieur de la ligne neutre),
sur les lignes (1), pour conservation du flux magnétique planétaire
 $\rightarrow$ 2 régions distinctes de la magnétosphère (à circulation solaire ou antisolaire)



- « Dynamo » = vent solaire, avec un champ électrique associé : $\mathbf{E}_{\text{conv}} = -\epsilon \mathbf{V}_{\text{VS}} \times \mathbf{B}_{\text{VS}}$
direction aube $\rightarrow$ crépuscule
 $\epsilon \sim 0.1$ à 0.2 pour la Terre (une partie du flux du VS est absorbée, une autre est déviée)



$$\mathbf{E}_{\text{conv}} = E_o \mathbf{y}$$

$$E_o = 0.16-0.32 \text{ mV/m pour } V=400 \text{ km/s et } B=4 \text{ nT}$$

$$\Delta\phi_{\text{conv}} \sim E_{\text{conv}} \times 3 L_M$$

$$\sim 50 \text{ kV pour la Terre}$$

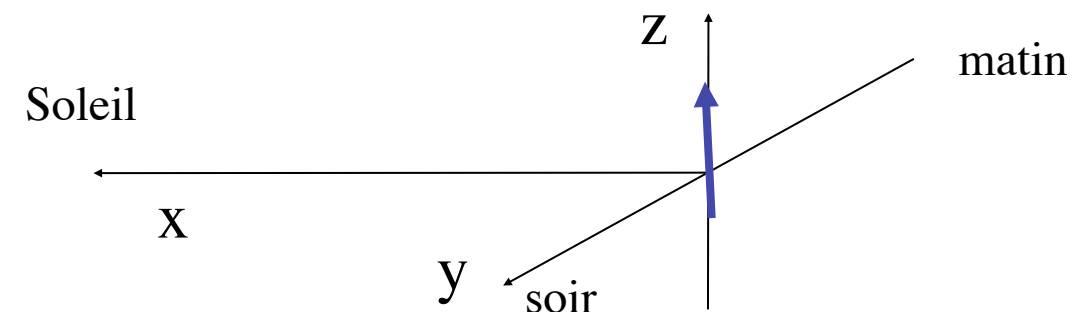
Repère magnétique écliptique (GSM pour la Terre = Géocentrique, Solaire, Magnétosphérique)

O = centre de la Terre,

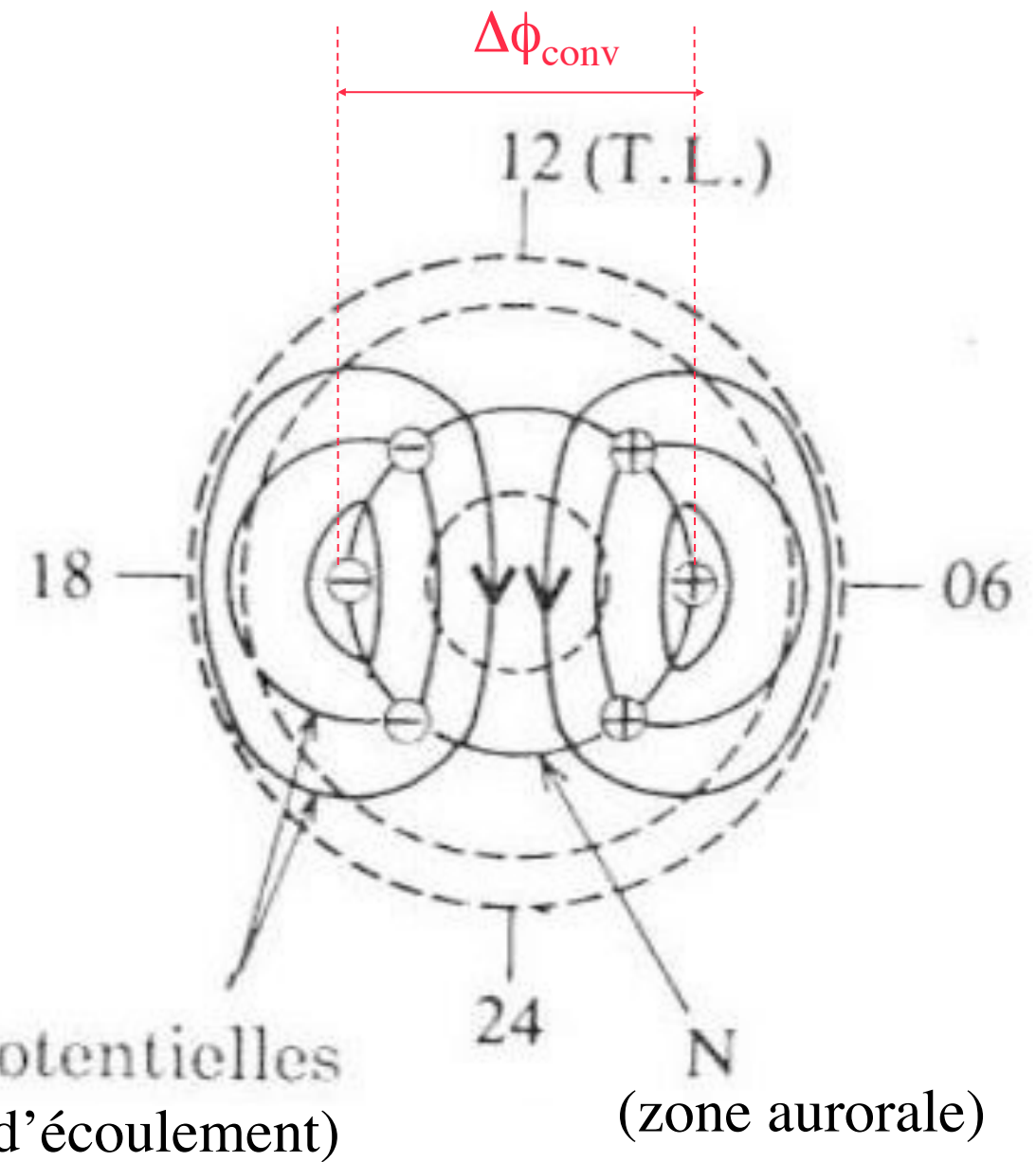
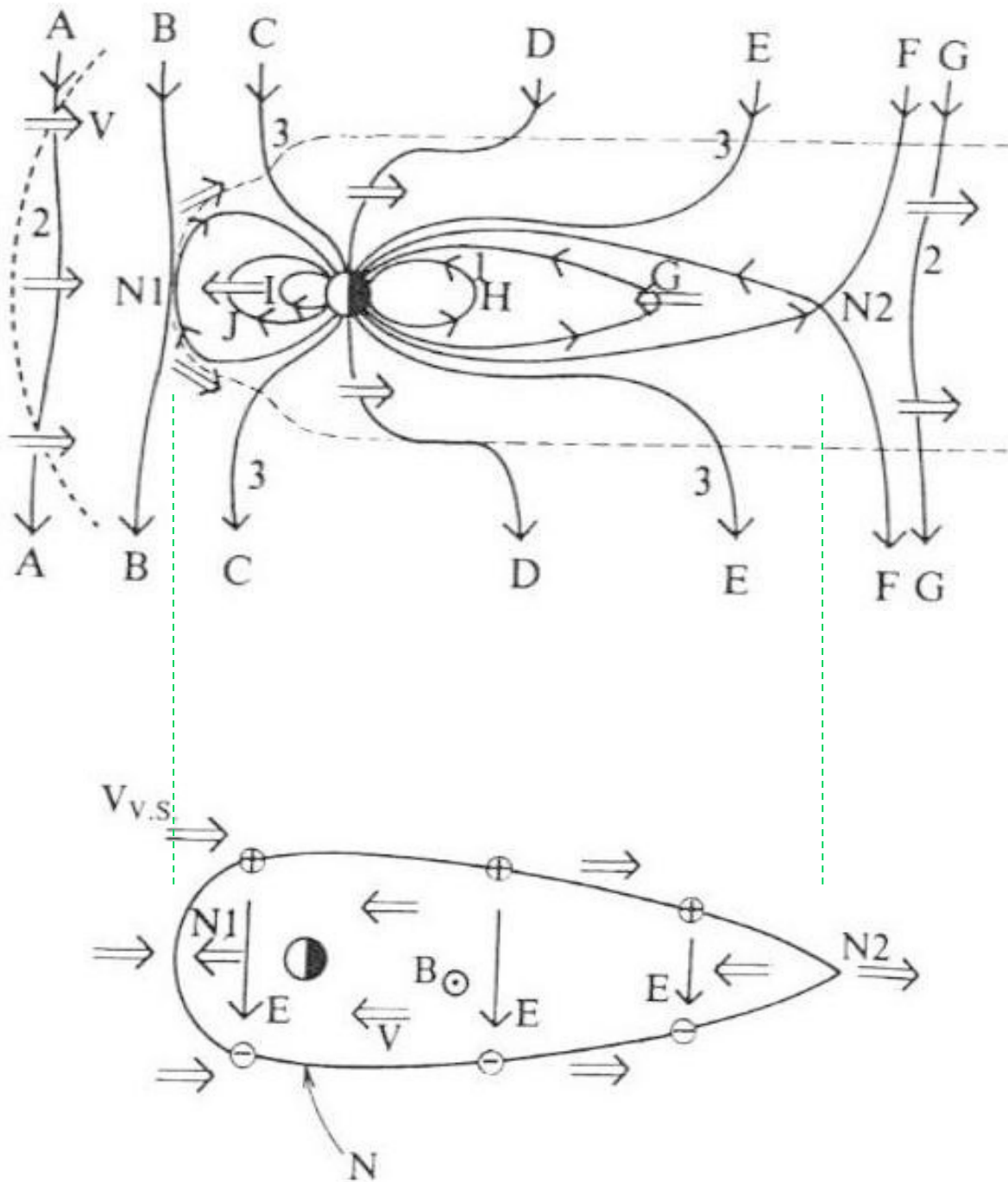
Ox vers le Soleil,

dipôle magnétique planétaire dans xOz,

Oy matin $\rightarrow$ soir.



- Dans l'ionosphère, par projection le long de B
 - 2 cellules de convection polaires, matin/soir
 - = « convection » magnétosphérique induite par le vent solaire.



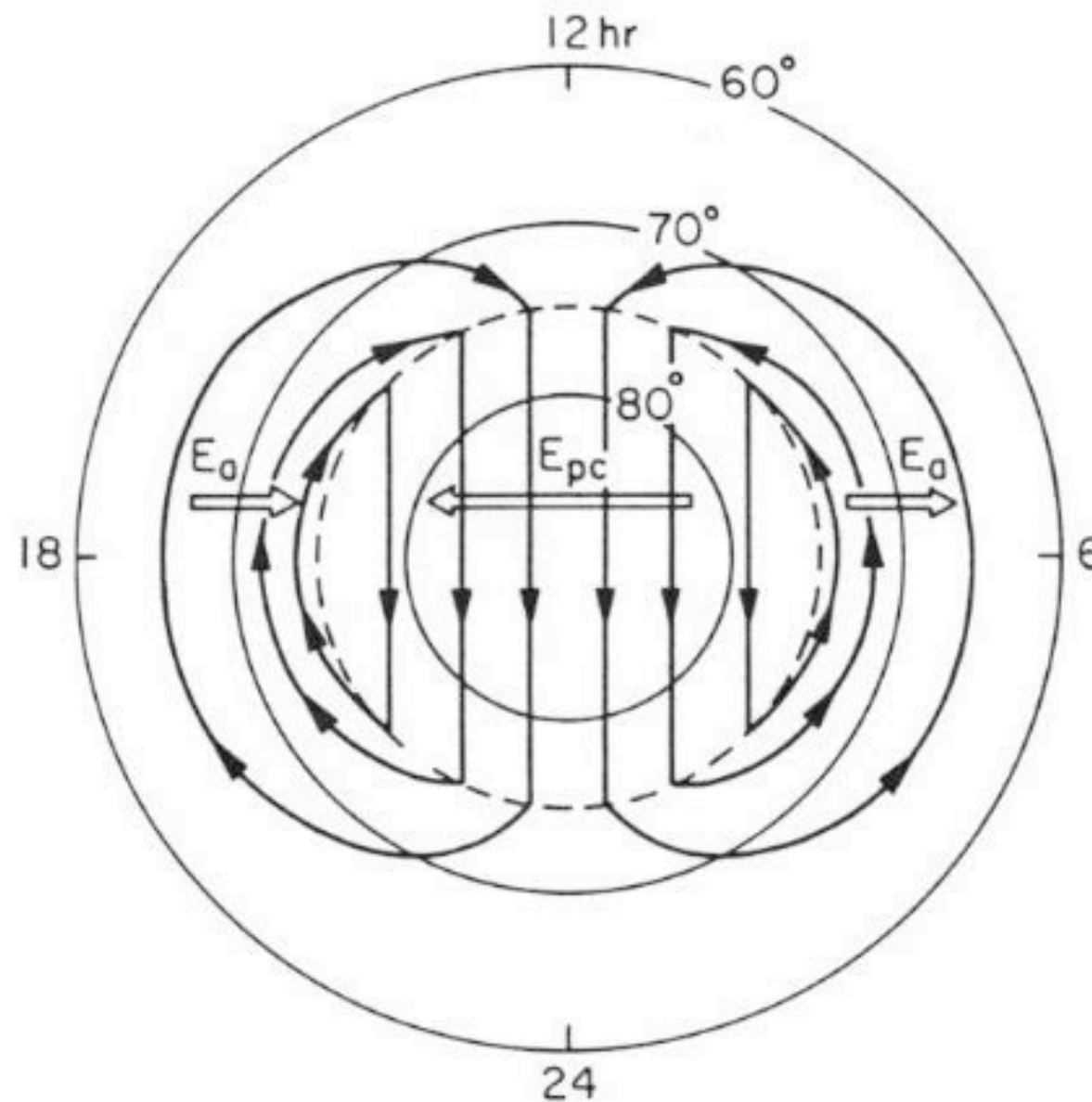
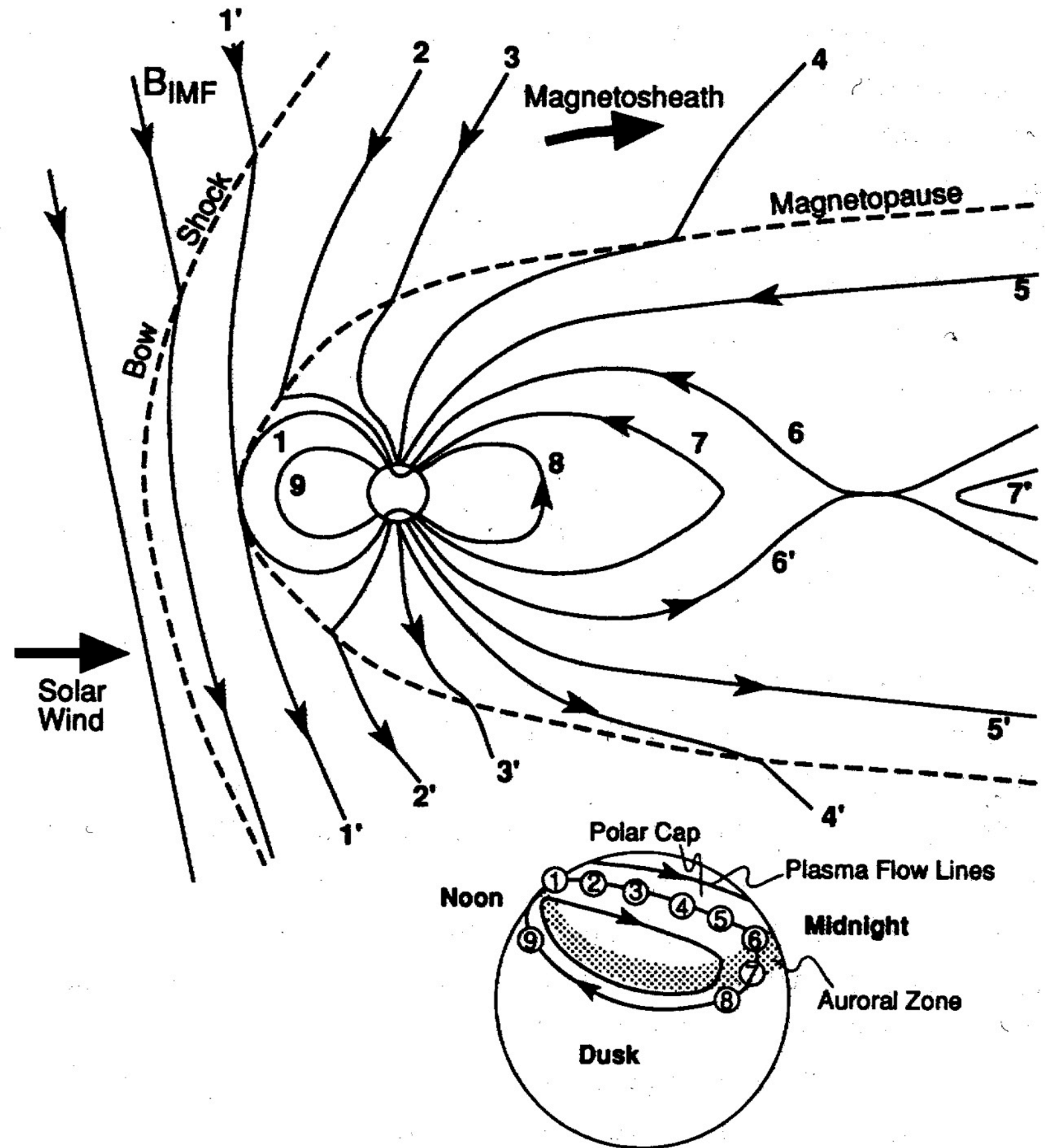


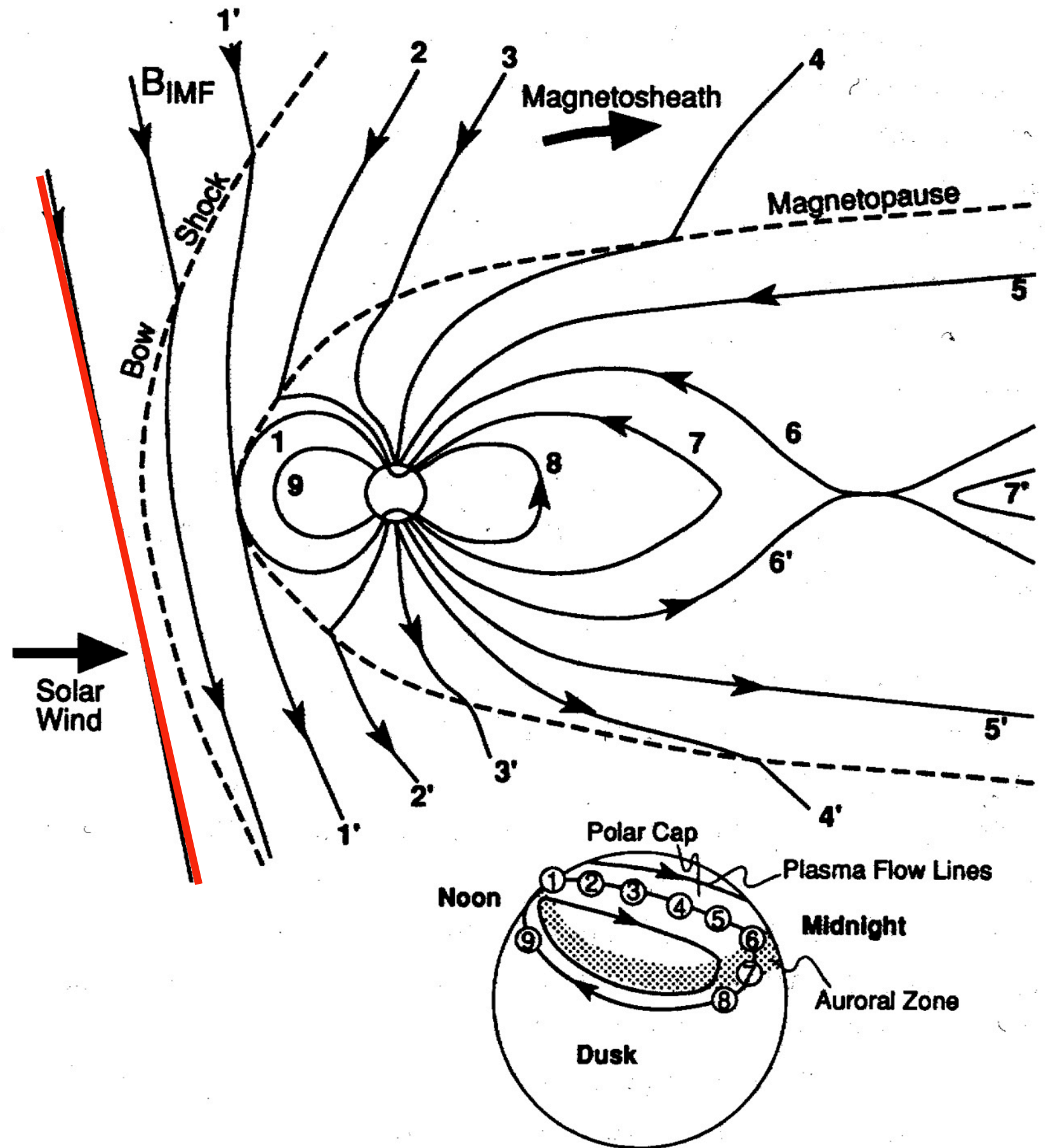
Fig. 6.3. Representation of ionospheric electric fields in the northern hemisphere polar cap and auroral zone, as well as the plasma flow due to those fields.

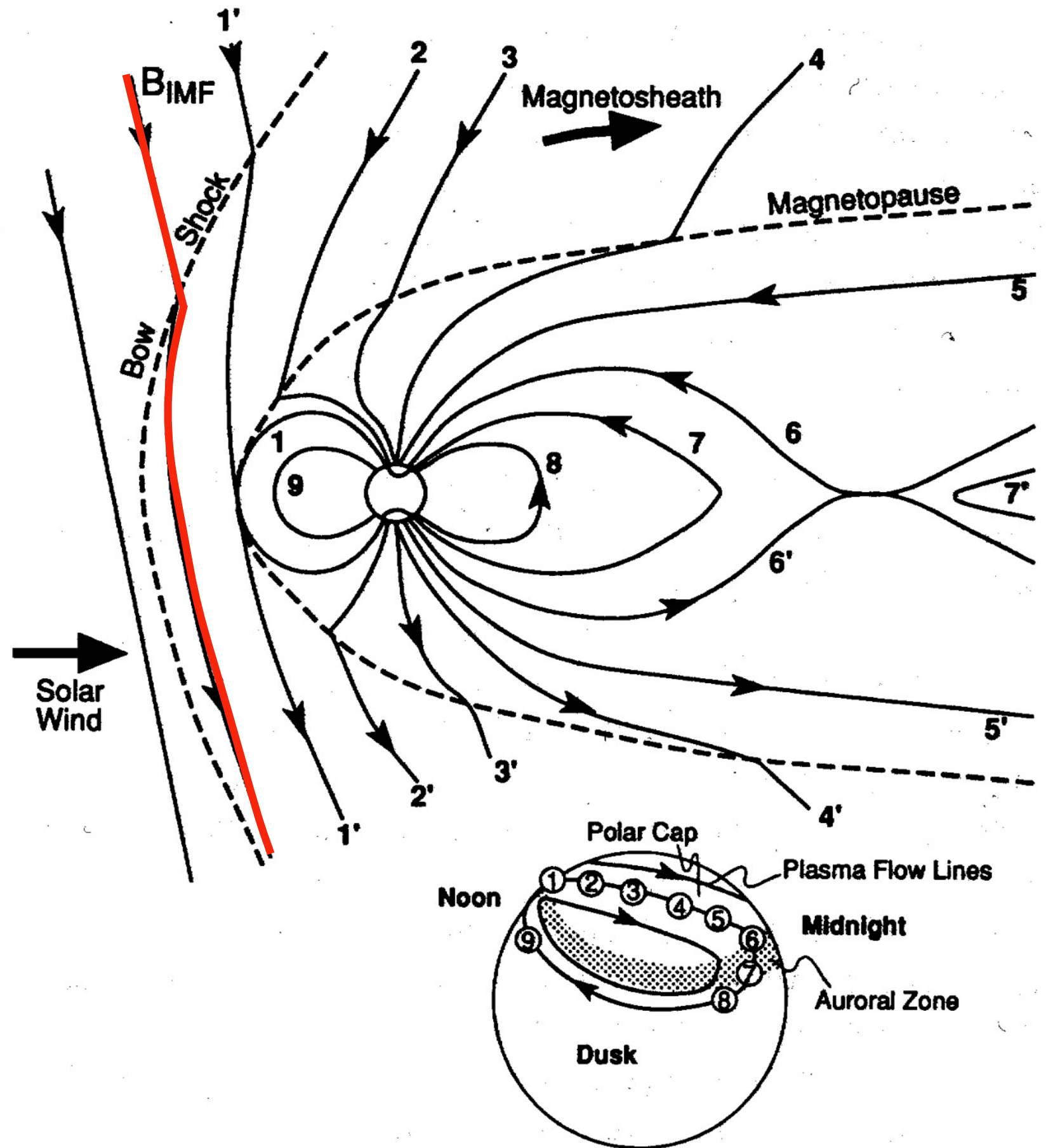
Notes :

- *la ligne de champ « change d'identité » au cours du cycle de convection*
- *plasma/B découplé dans la basse ionosphère*
- *convergence des lignes de $\mathbf{B}$ vers la planète :*
 - $E_{conv}(\text{ionosphère}) \sim \text{centaines de mV/m} \gg E_{conv}(MS) \rightarrow \text{mesures !}$
 - $V_{conv}(\text{ionosphère}) \sim \text{centaines de m/s} \ll V_{conv}(MS)$

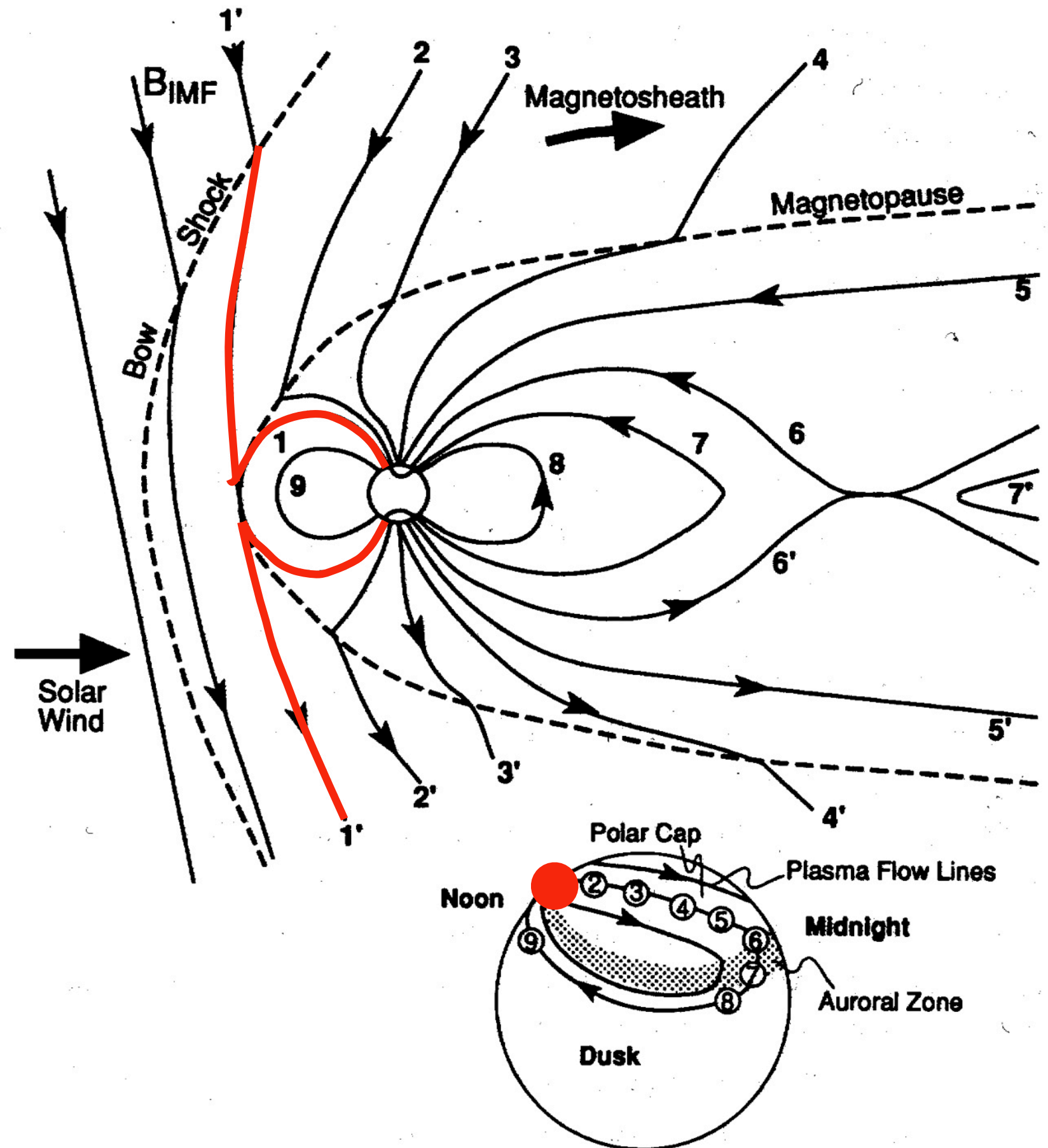
**cycle de
circulation du
plasma et du
champ
magnétique
dans la
magnétosphère
terrestre**

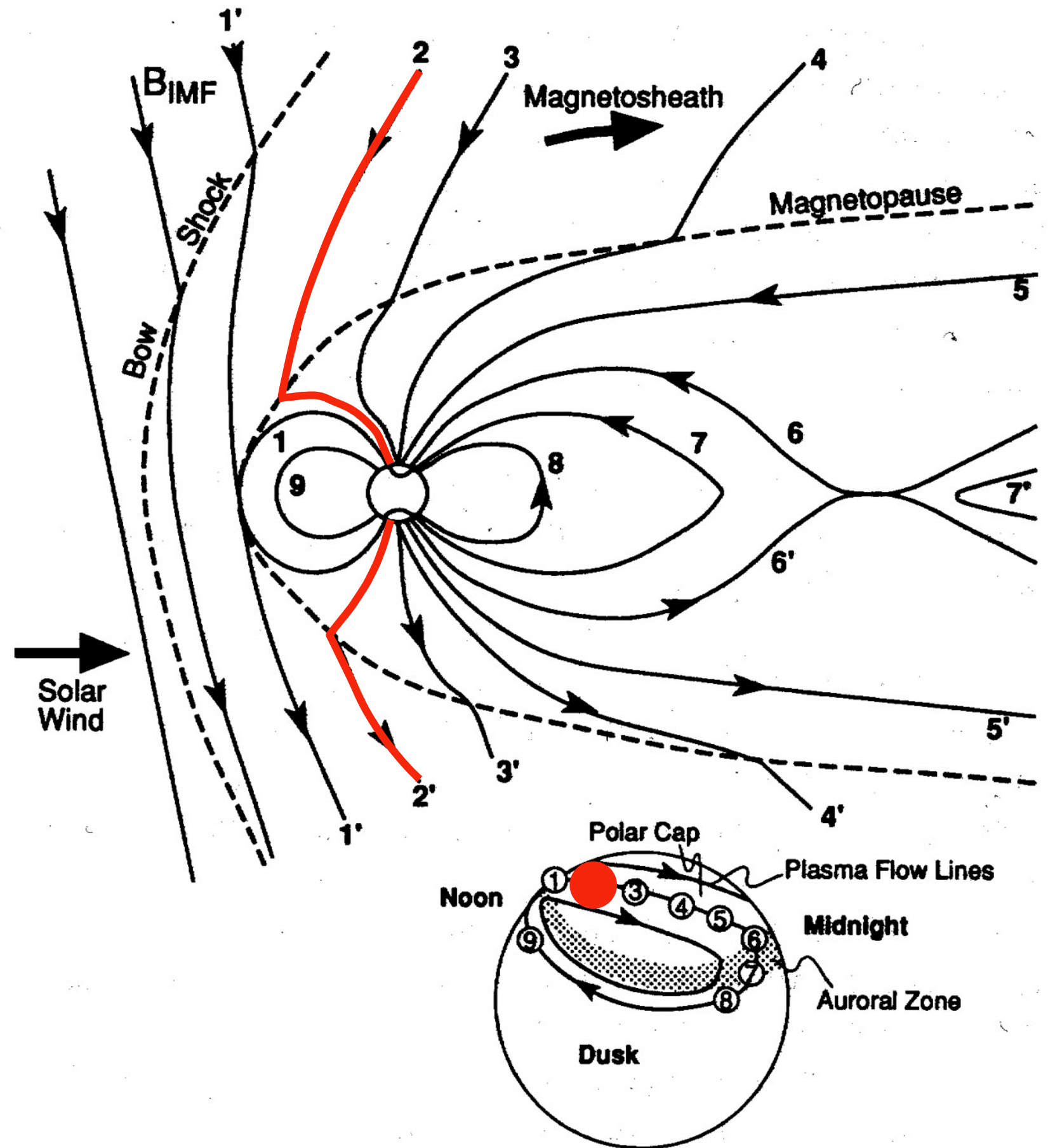


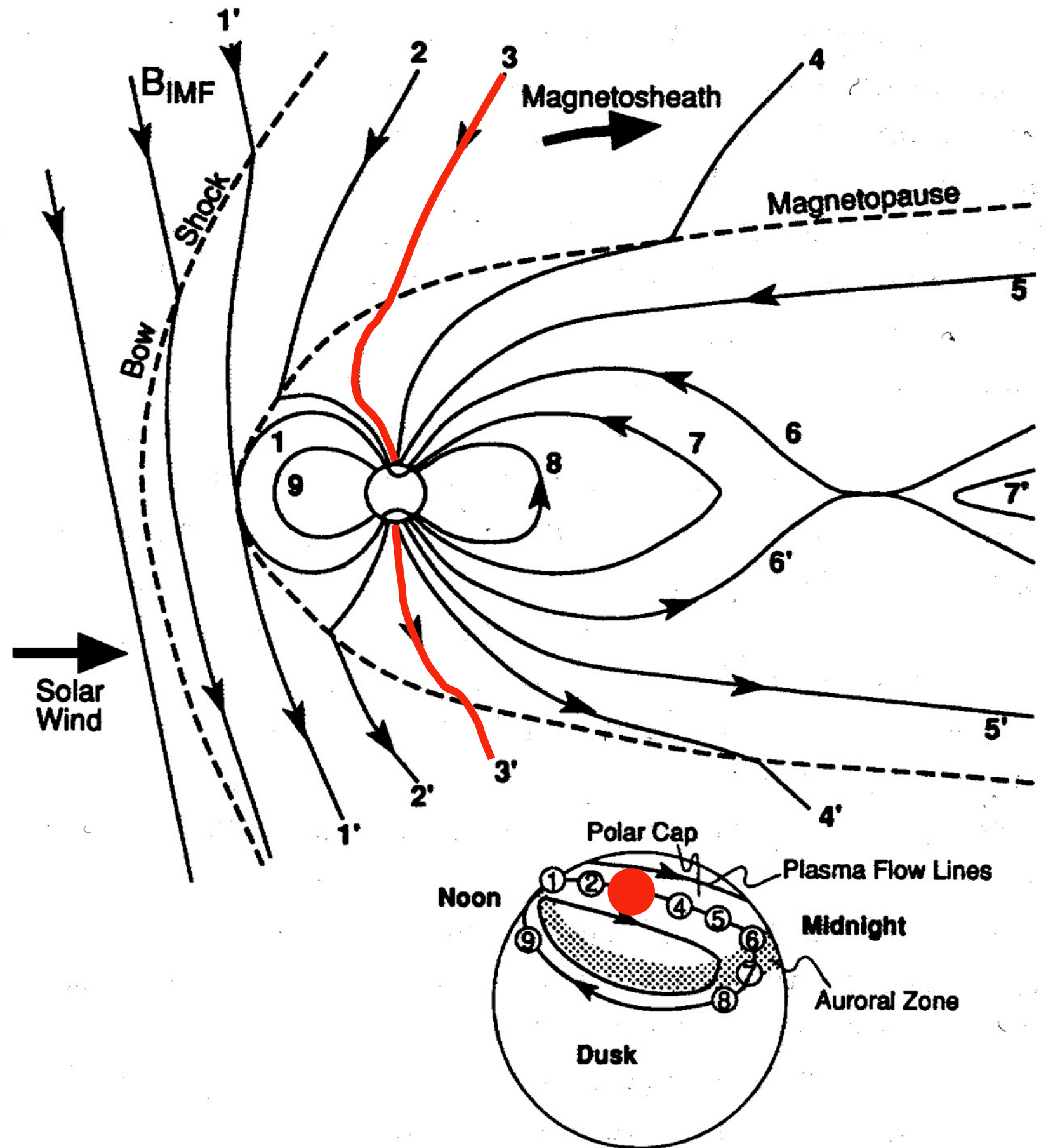




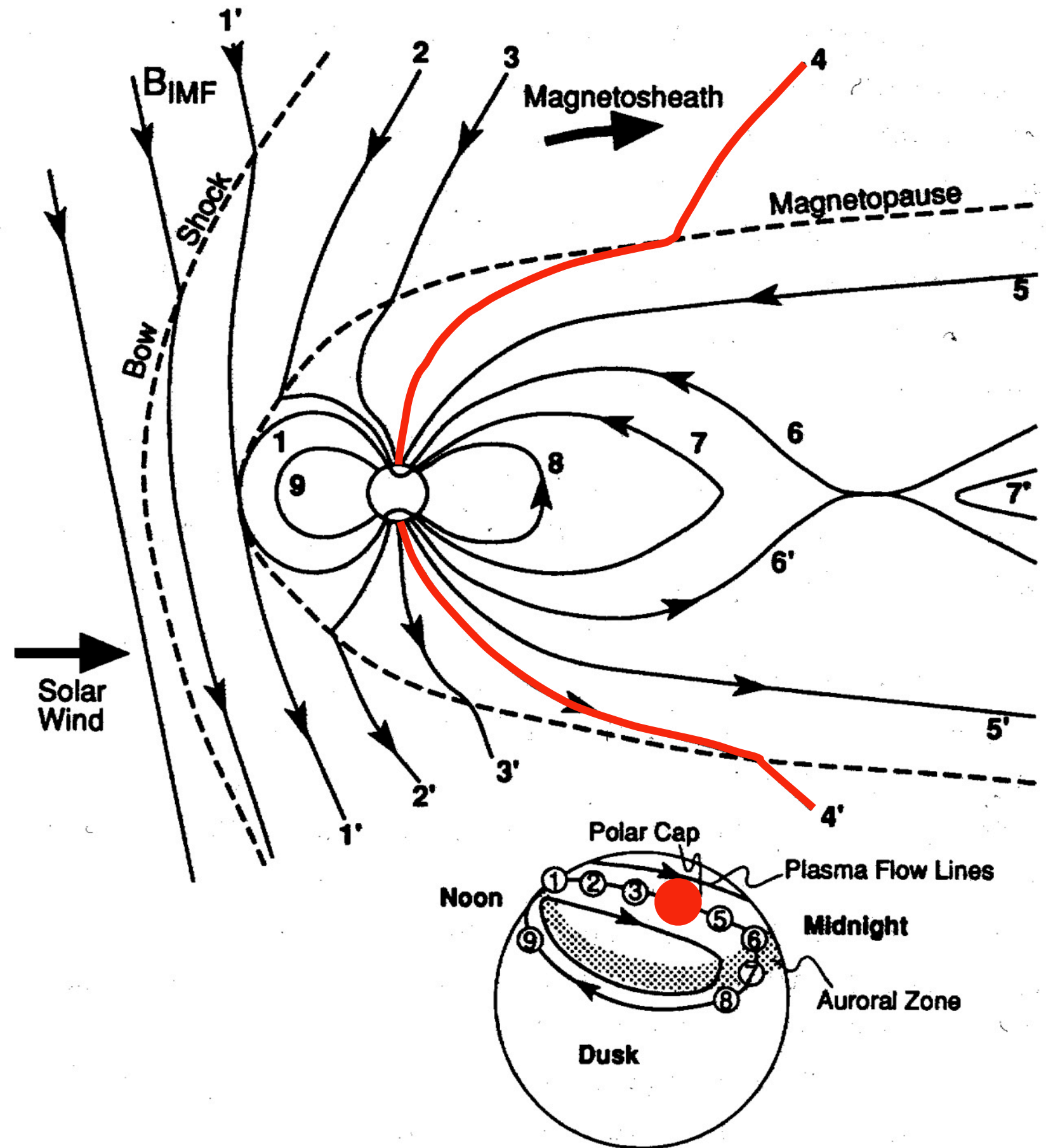
**1^{ère} reconnection
(côté jour) = début
du cycle**

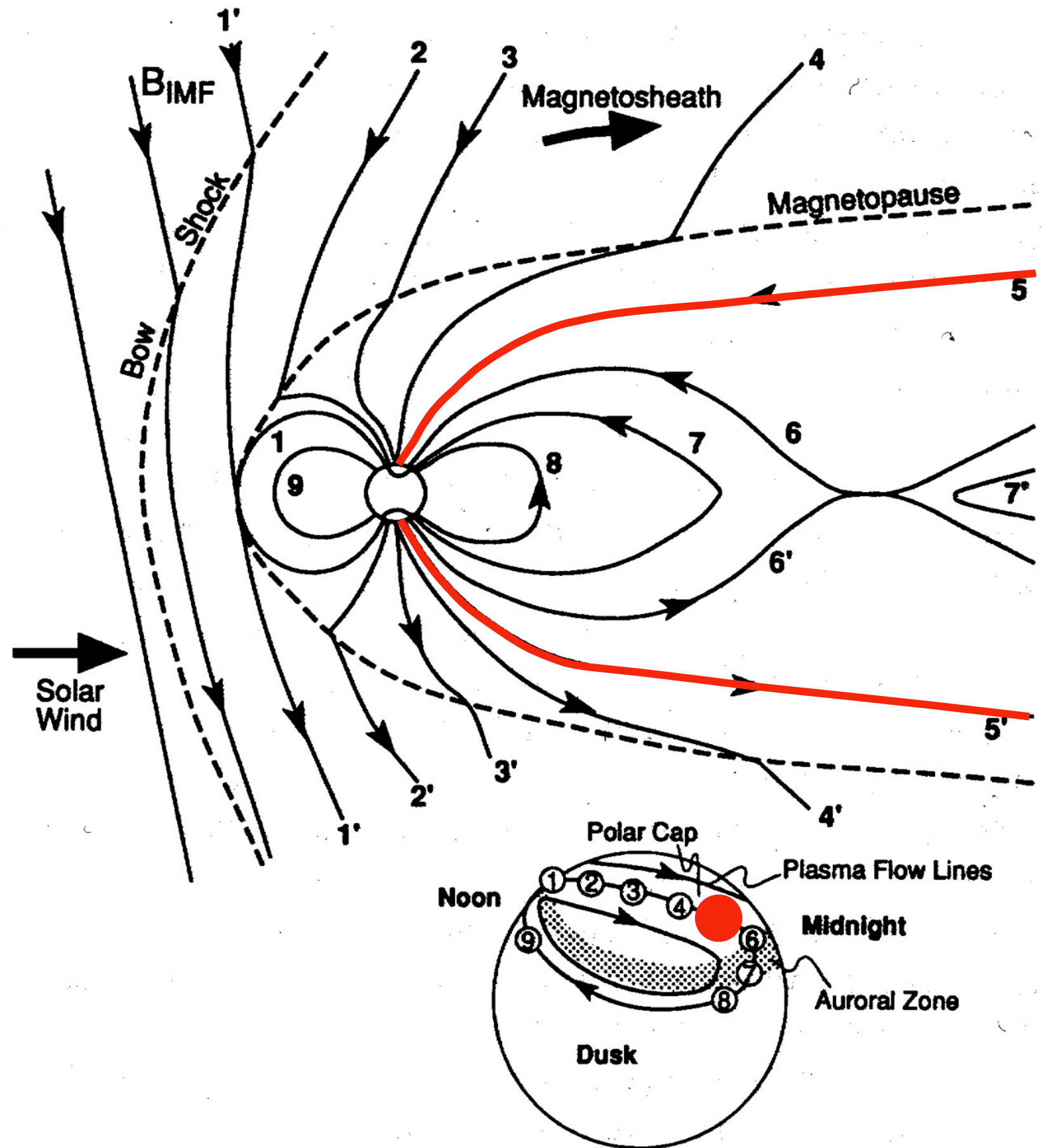




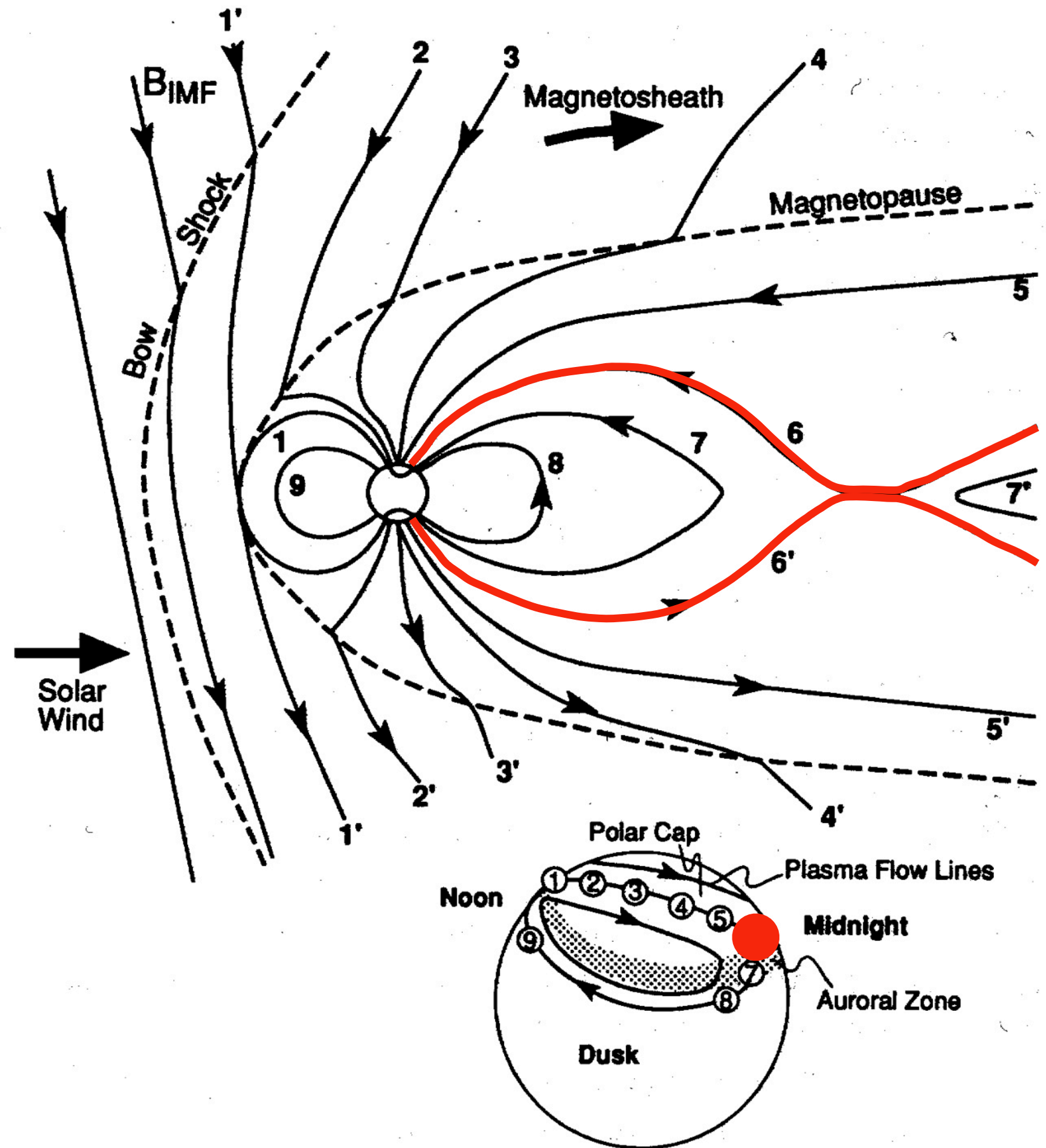


transport
au-dessus
des pôles

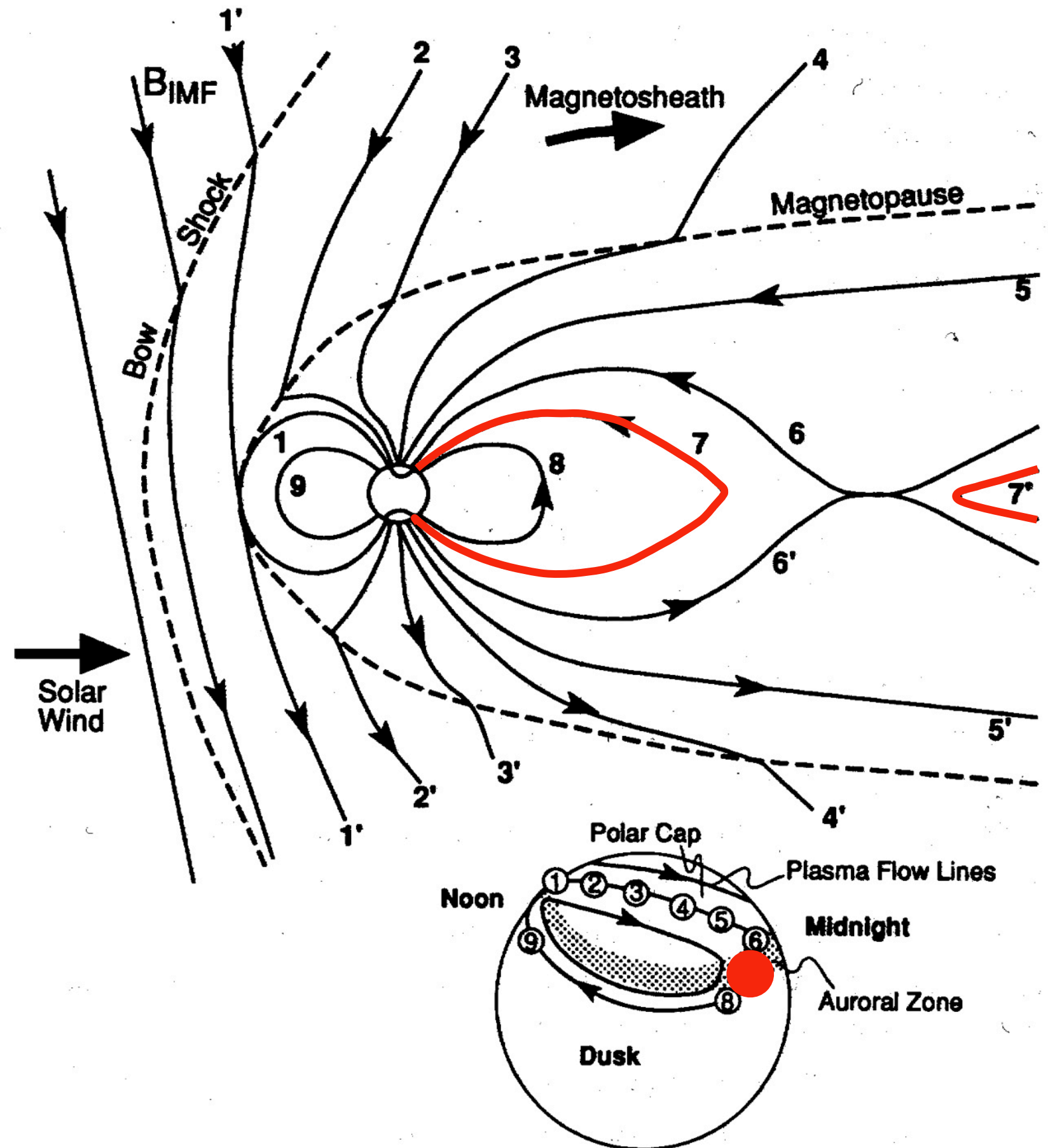




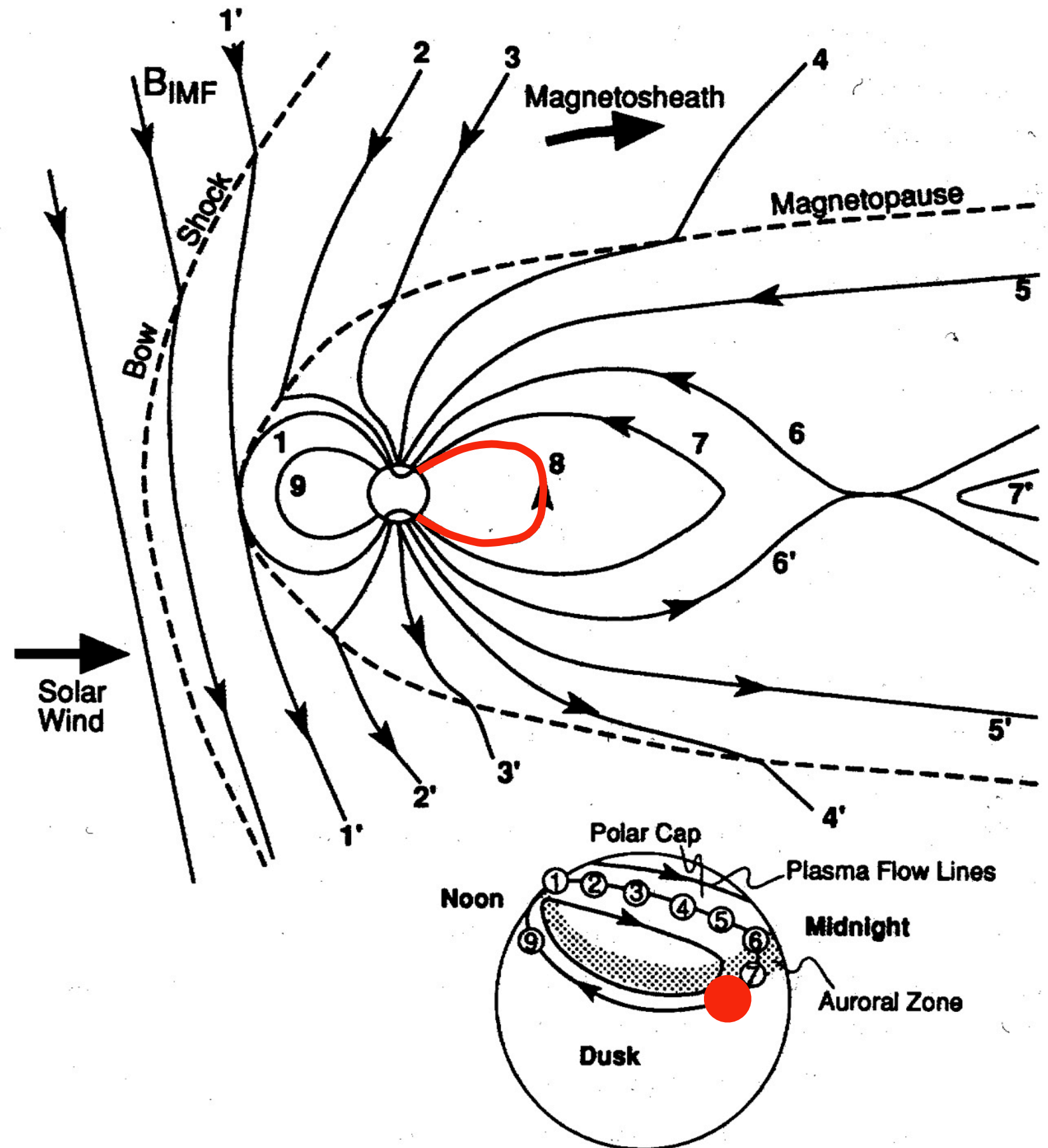
2ème reconnection (côté nuit)



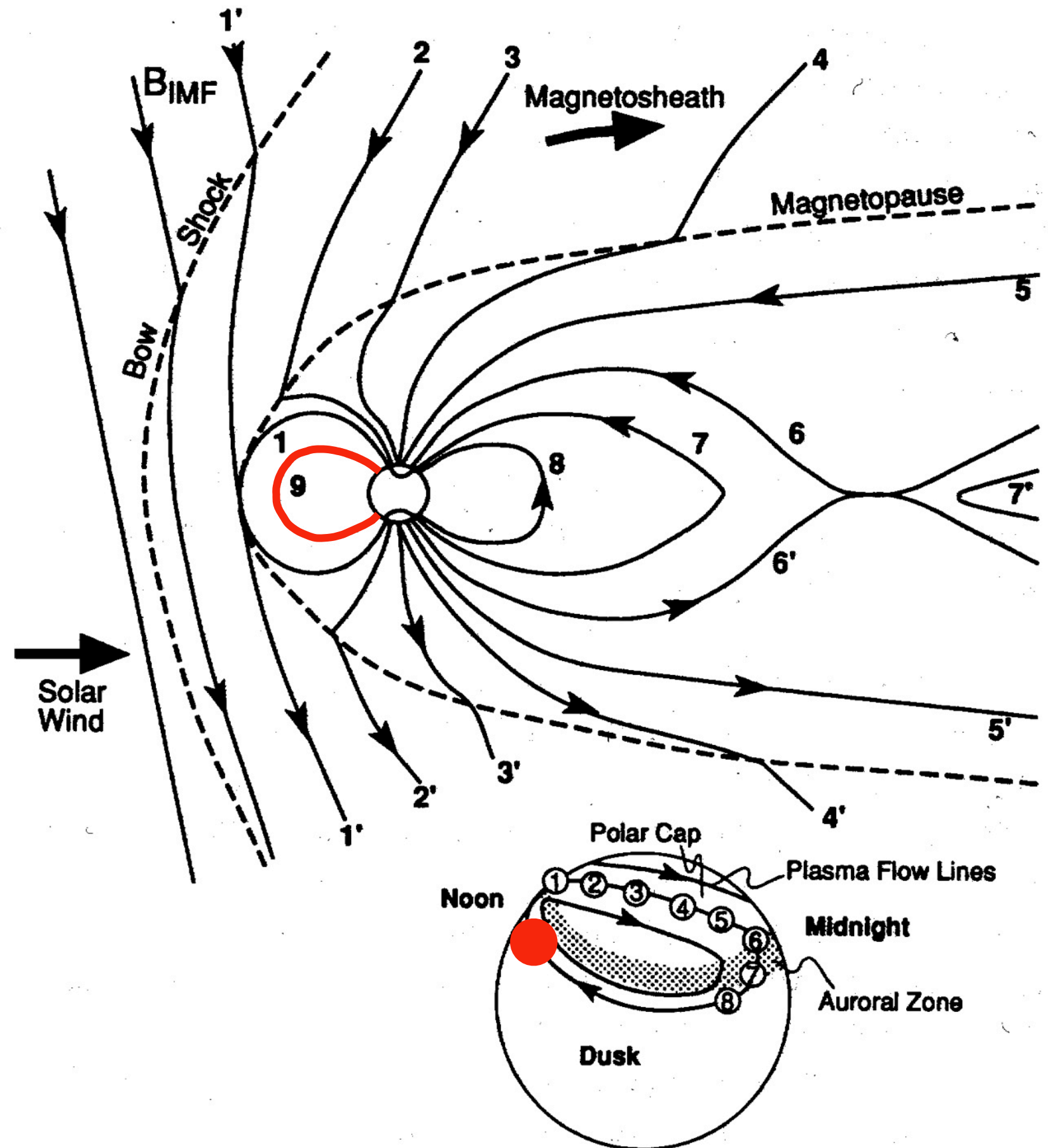
éjection d'une
bulle de plasma
(plasmoïde)
vers la queue



et retour d'une
boucle de champ
magnétique
vers le côté "jour"



**= un sous-orage
magnétosphérique**



4.4 Corotation

- La vitesse d'entraînement du plasma dans la couche dynamo ionosphérique s'écrit dans le repère inertiel planétaire (fixe / Soleil) :

$$\mathbf{V} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{V}_n$$

avec $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$ la vitesse de dérive due à la corotation rigide

et $\mathbf{V}_n$ la vitesse propre du fluide atmosphérique / planète = vent neutre.

($\mathbf{V}_n \ll \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{R}$ sauf au voisinage des pôles)

→ Champ électrique de corotation :

$$\mathbf{E}_{\text{corot}} = - (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$$

(radial, équipotentiellles = cercles
= lignes de circulation du plasma:

$$\mathbf{u} = \mathbf{E}_{\text{corot}} \times \mathbf{B} / B^2 = \boldsymbol{\Omega} \mathbf{r})$$

- Dans le plan équatorial ($B = B_e R_p^3 / r^3$, $r = R \cdot R_p$) :

$$\mathbf{E}_{\text{corot}} = -\boldsymbol{\Omega} r B \mathbf{e}_r = -\boldsymbol{\Omega} B_e R_p^3 / r^2 \mathbf{e}_r = -\boldsymbol{\Omega} B_e R_p / R^2 \mathbf{e}_r$$

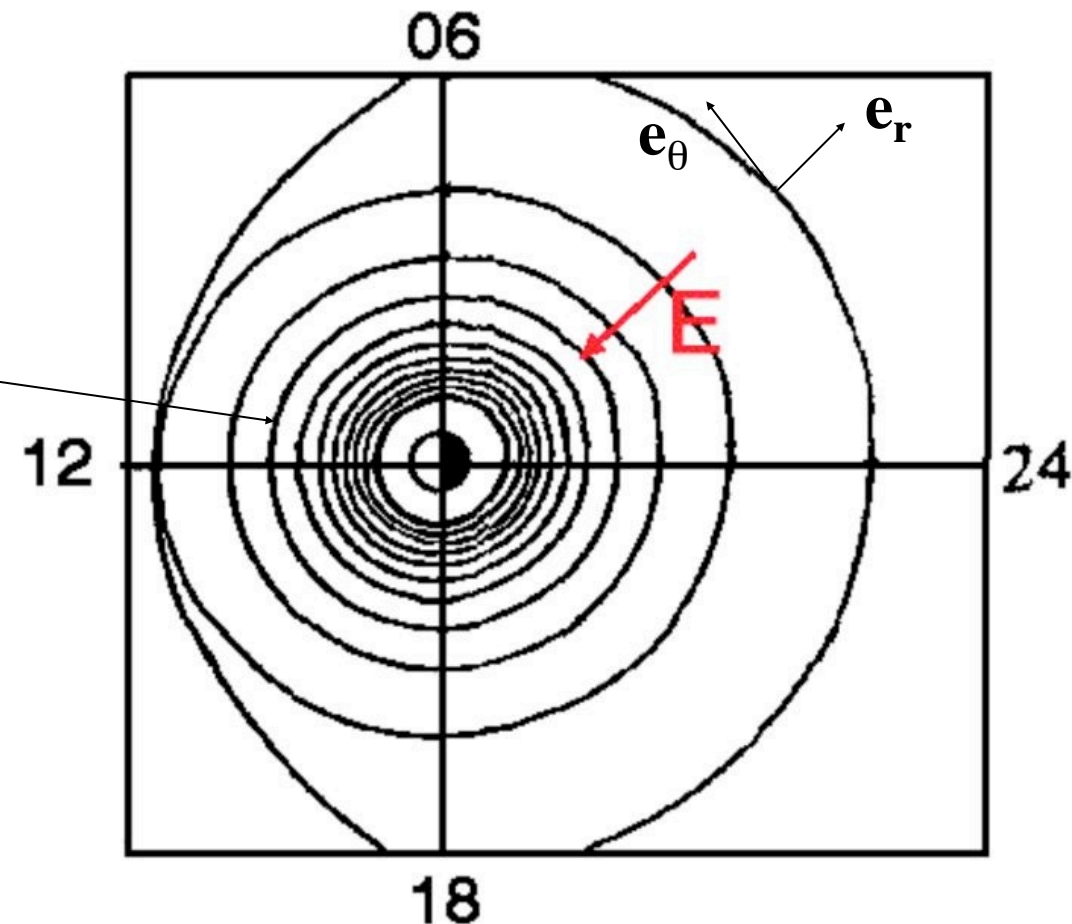
$$\Delta\phi_{\text{corot}} \sim \int_{R_p}^{\sim L_m} E_{\text{corot}} dr \sim \boldsymbol{\Omega} B_e R_p^2$$

- Dans l'ionosphère, par projection le long de B

→ Corotation domine la circulation à basse latitude, idem MS interne

Pour la Terre :

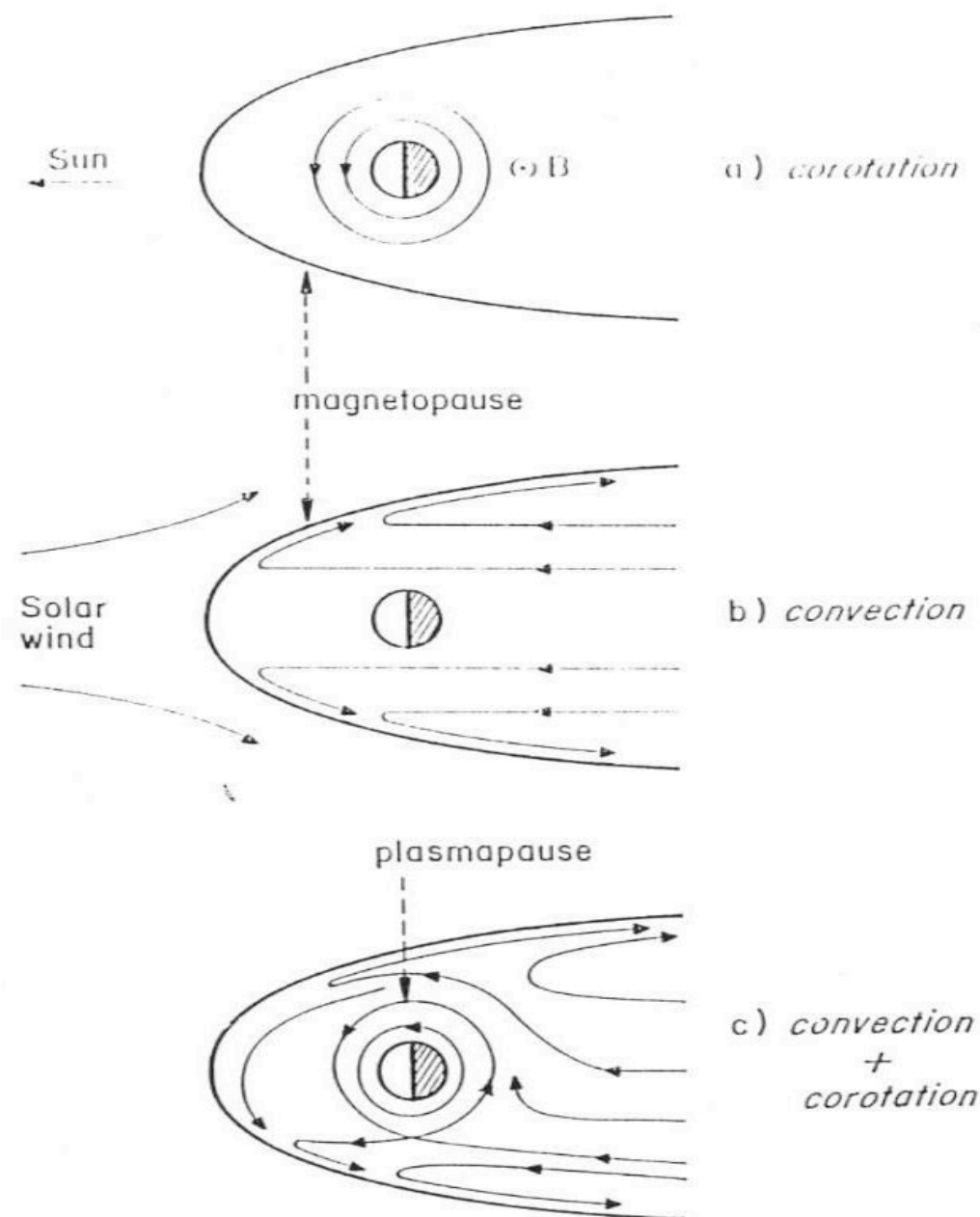
$$\Delta\phi_{\text{corot}} \sim \boldsymbol{\Omega} B_e R_p^2 = (2\pi/86400) \cdot (0.31 \times 10^{-4}) \cdot (6.4 \times 10^6)^2 \sim 90 \text{ kV} \sim 2 \times \Delta\phi_{\text{conv}}$$



Notes :

- la corotation est une conséquence du gel, i.e. $\sim$ pas de mouvement $\perp$ entre plasma et B
- si B est incliné / Ω ou si le plasma est mis en mouvement de rotation par « friction » (ex : collisions ions-neutres dans l'ionosphère)
→ mise en « corotation » à grande échelle du plasma avec B
- partout où $V_{\text{corotation}} > V_{\text{képlérienne}}$, les corps neutres (satellites, poussières) sont accélérés par le flot de plasma.

Les 2 régimes vont se superposer



4.5 Circulation globale du plasma thermique

- Circulation MS globale = superposition des circuits de convection et corotation.

à l'équateur :

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{corot}} + \mathbf{E}_{\text{conv}} &= -\Omega B_e R_p^3/r^2 \mathbf{e}_r - E_o \sin\theta \mathbf{e}_r - E_o \cos\theta \mathbf{e}_\theta \\ &= \partial\Phi/\partial r \mathbf{e}_r + 1/r \partial\Phi/\partial\theta \mathbf{e}_\theta \\ \rightarrow \Phi &= \Omega B_e R_p^3/r - E_o r \sin\theta + C \\ &= \Omega B_e R_p^2/R - E_o R R_p \sin\theta + C \end{aligned}$$

- Les équipotentielles sont les lignes d'écoulement du plasma de faible énergie (cf. dérive en champs croisés $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$).

$$\Phi = c^{\text{te}} \rightarrow K/R - R \sin\theta = C' \quad \text{avec} \quad K = \Omega B_e R_p / E_o$$

→ 2 domaines de circulation $\neq$, séparés par une ligne de courant singulière avec un point de stagnation sur l'axe 6-18h TL.

$$\begin{array}{llll} R \ll & \rightarrow & K/R = C' & \rightarrow & R = K/C' & \text{(corotation)} \\ R \gg & \rightarrow & -R \sin\theta = C' & \rightarrow & R = -C'/\sin\theta & \text{(convection)} \end{array}$$

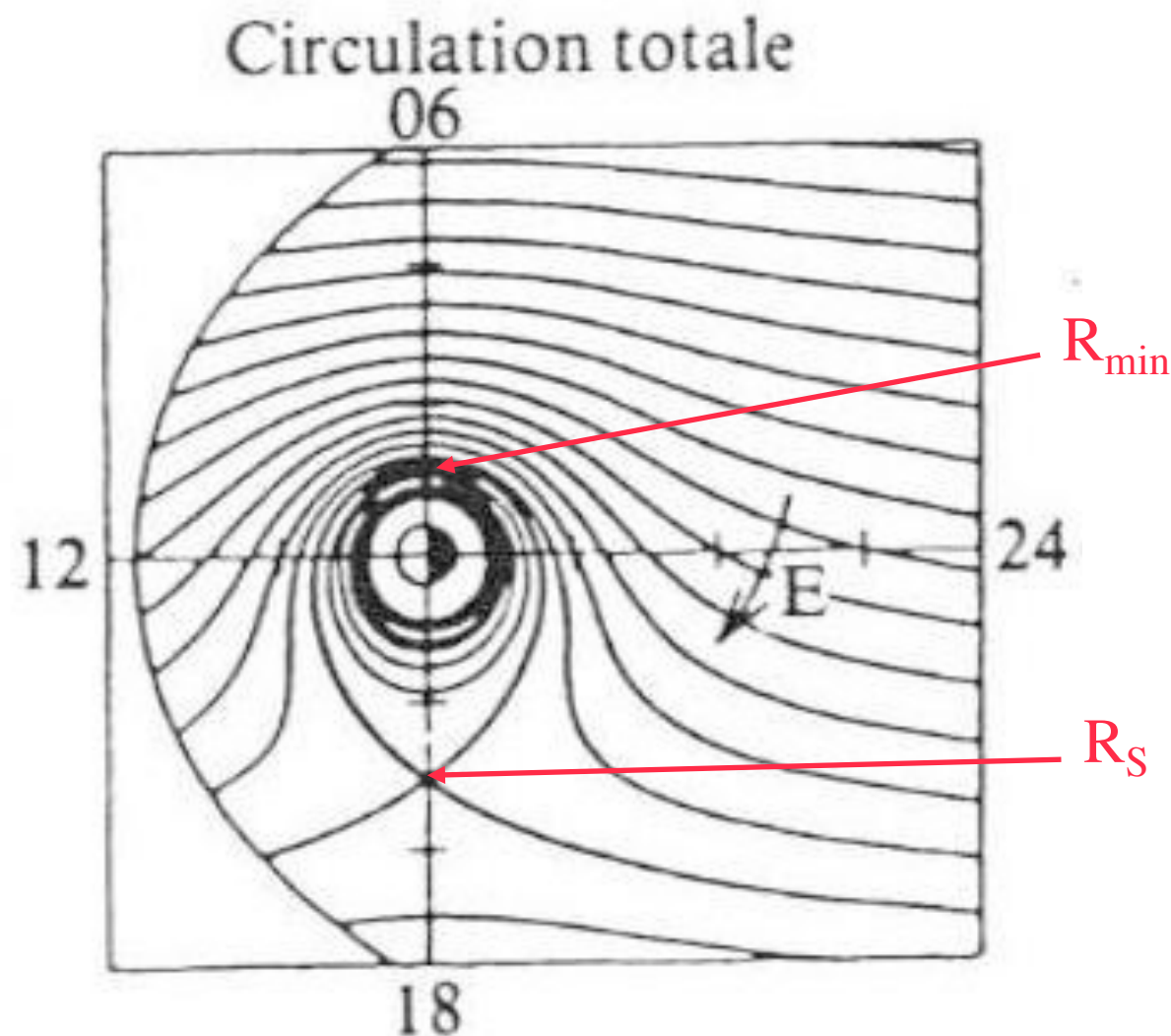
$$\mathbf{E} = - (\Omega B_e R_P / R^2 + E_o \sin\theta) \mathbf{e}_r - E_o \cos\theta \mathbf{e}_\theta$$

- Point de stagnation : $\mathbf{E} = 0$ (d'où $V = 0$) $\rightarrow$ $\theta_S = -\pi/2$ (18h TL)
 et $R_S = (\Omega B_e R_P / E_o)^{1/2} = K^{1/2}$
 ($R_S = 7.8 R_T$ pour $E_o = 0.24$ mV/m)

- Pour cette dernière équipotentielle « fermée » : $K/R - R \sin\theta = C' \rightarrow C' = 2 K^{1/2}$

et la distance minimale à la Terre, côté matin (6h TL, $\theta = +\pi/2$) est :

$$R_{\min} = (\sqrt{2} - 1) K^{1/2} \sim 3 R_T$$



- Dans l'ionosphère, par projection le long de B, modification du schéma dû à la convection seule (*E vers l'équateur dilate la cellule « DAWN » et contracte la cellule « DUSK »*)

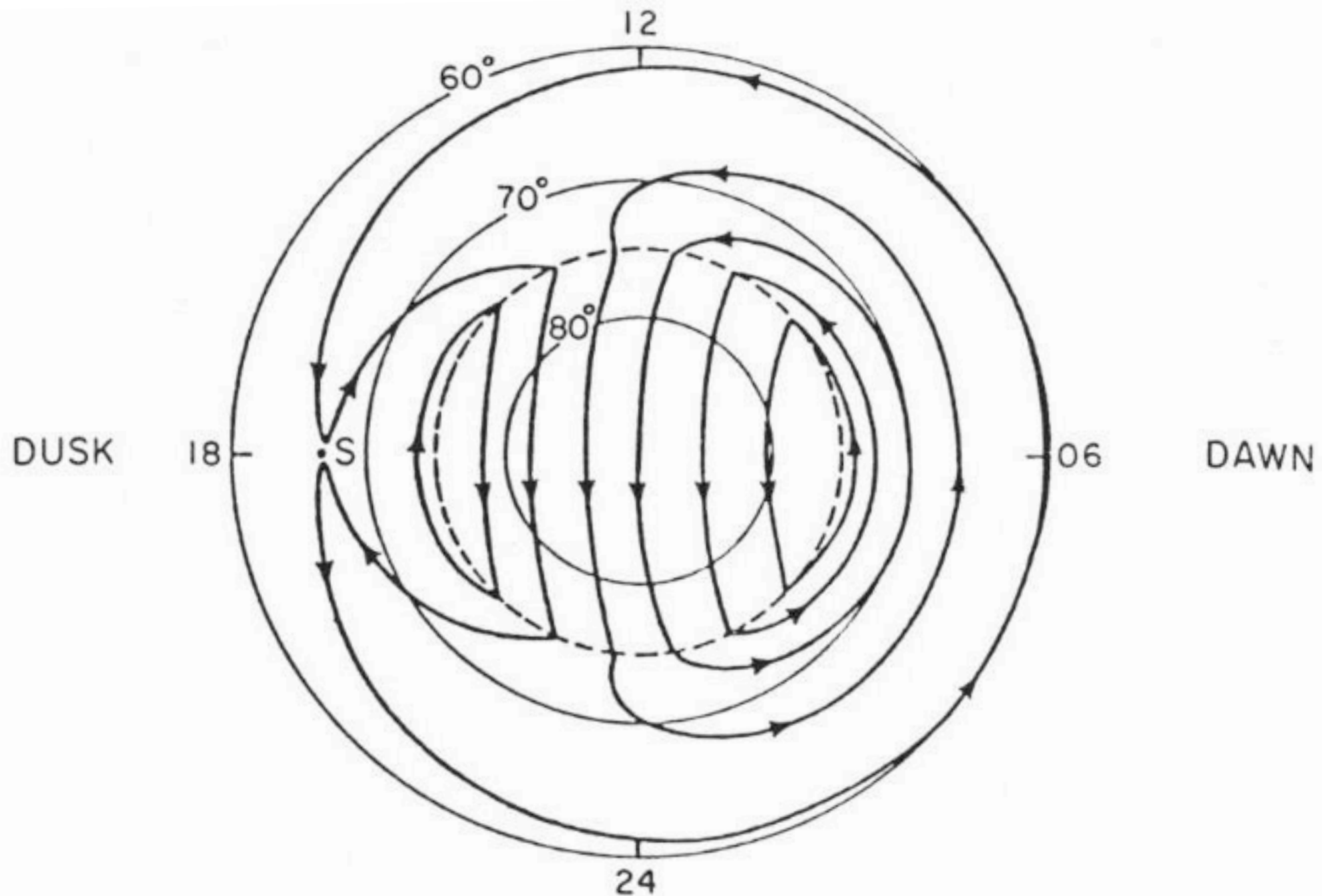


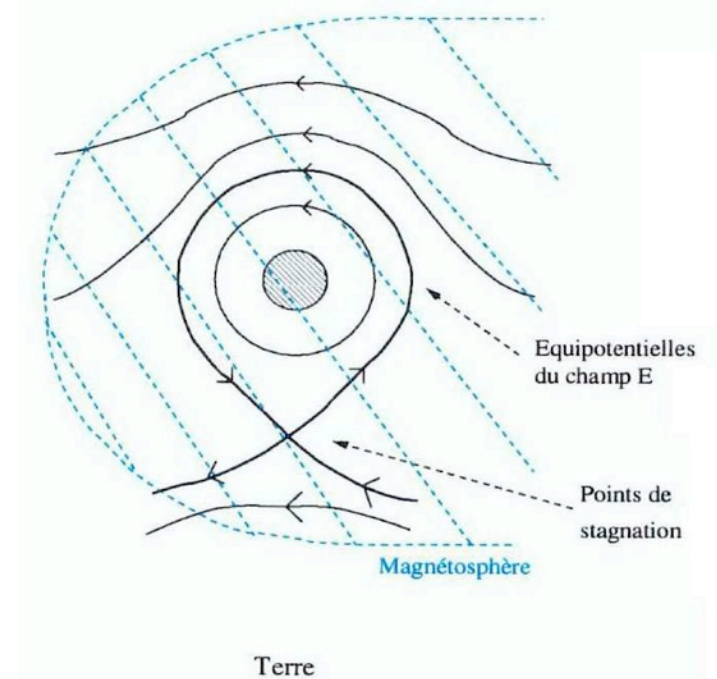
Fig. 6.5. Ionospheric flow paths at high latitudes including the effect of corotation of the plasma with the earth. The diagram is fixed with respect to the sun.

- Convection / Corotation planétaires comparées

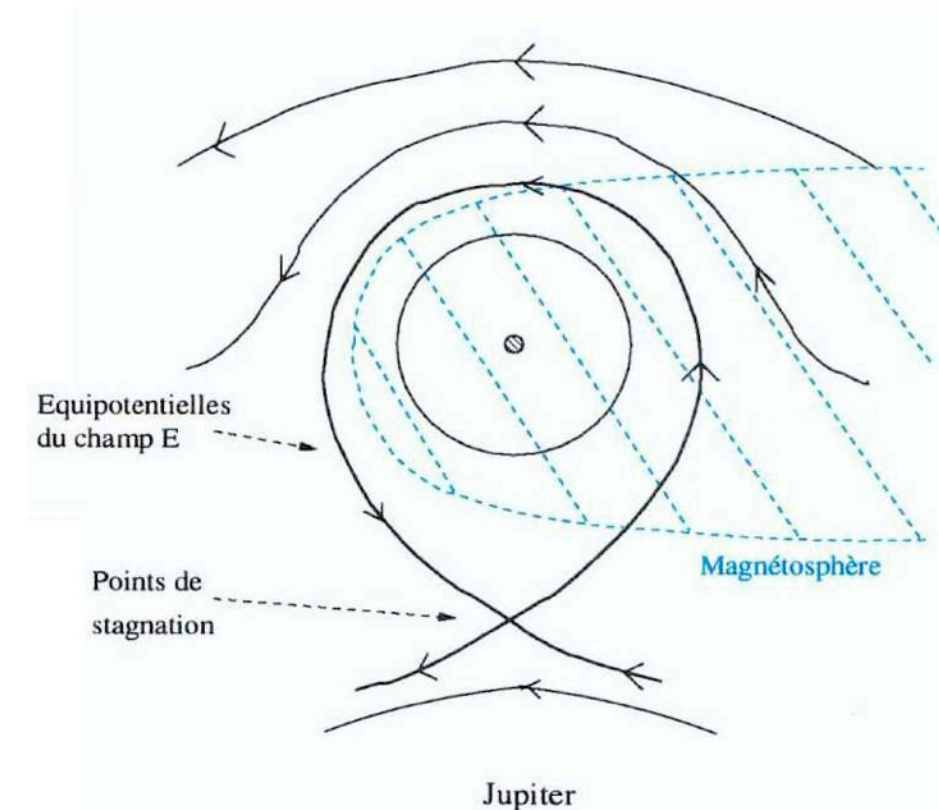
	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R_p (km)	2 439	6 378	71 492	60 268	25 559	24 764
M_{dip} (G.km ³)	5.5×10^7	7.9×10^{10}	1.6×10^{15}	4.7×10^{13}	3.8×10^{12}	2.2×10^{12}
Champ à l'équateur B_e (G)	0.003	0.31	4.3	0.21	0.23	0.14
R_{MP} (R_p) calculée [mesurée]	1.4 [~1.5]	9 [~10]	40 [~90]	17 [~20]	22 [~18]	21 [~23]
B VS (nT)	10 (20)	4	0.8	0.4	0.2	0.13
Prot (h,m)	1407 h 30 m	24 h	9 h 55.5 m	10 h 39.4 m	17 h 14.4 m	16 h 6.6 m
E_{conv} (mV) [$\varepsilon=0.15$]	0.6	0.24	0.05	0.025	0.013	0.008
$\Delta\phi_{\text{conv}}$ (kV) [$\varepsilon=0.15$]	7	46	900	90	17	14
$\Delta\phi_{\text{corot}}$ (kV)	0.002	90	400 000	12 000	1 500	1000
R_S/R_{MP}	0.02	0.8	4	4	4	3

NB : indépendantes de l'inclinaison de B (sauf U & N)

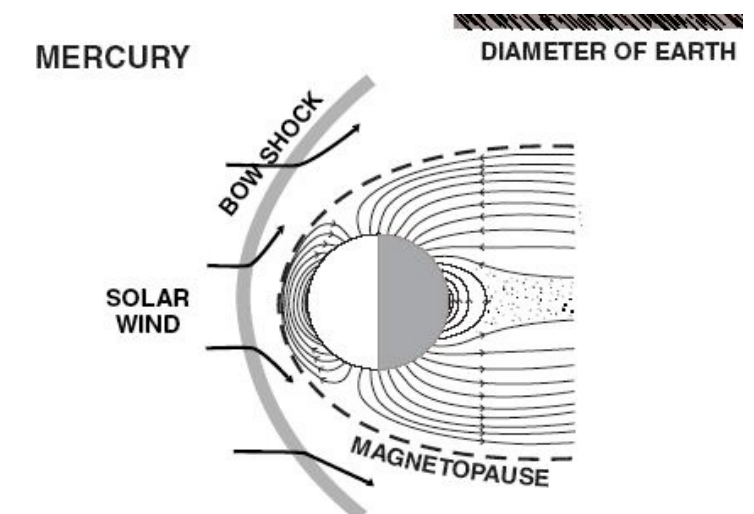
Terre : $\Delta\phi_{conv} \sim 50 \text{ kV}$, $\Delta\phi_{corot} \sim 90 \text{ kV}$
 $R_S \sim R_{MP}$
 $corotation < 3-8 R_E$
 $\rightarrow$ convection dominante (/volume de MS)



Jupiter : $\Delta\phi_{conv} \sim 1 \text{ MV}$, $\Delta\phi_{corot} \sim 400 \text{ MV}$
 $R_S > R_{MP}$
 MS dominée par la corotation
 influence du MIP limitée aux régions
 externes (très hautes latitudes) et à la queue
 régions de topologie fermée dominées par les sources de
 plasma internes (ionosphère et surtout satellites)



Mercure : $\Delta\phi_{conv} \sim 7 \text{ kV}$, $\Delta\phi_{corot} \sim 0.002 \text{ kV}$
 rotation très lente ($P_{sid} = 88j$)
 $\rightarrow R_S \ll R_{MP}$
 zone de corotation $< R_p$!
 mini-MS entièrement contrôlée par la convection.



4.6 Régions magnétosphériques

- Le plasma provenant de la queue de la MS et remontant en direction solaire est dévié par B en rotation ; il le contourne de part et d'autre, isolant une « cavité » en corotation.
- **A l'intérieur de la ligne singulière** : plasma gelé avec des lignes en permanence de type (1), connectées à la source de plasma ionosphérique, jamais en contact avec le VS (en 1^{ère} approx.)
 - La coquille de la ligne singulière = frontière interne de la région magnétosphérique influencée par le milieu interplanétaire. Cette région s'emplit de plasma ionosphérique (créé par l'UV solaire + collisions) jusqu'à un équilibre de pression avec la source
 - plasma relativement dense et froid = « plasmasphère ».
 - La frontière (dernière équipotentielle fermée) est la « plasmopause ».
- **A l'extérieur de la ligne singulière** : convection « solaire » avec lignes de champ alternativement de type (3) [jour → nuit] et (1) [nuit → jour].
 - A chaque ouverture sur le VS, le plasma (principalement H⁺) s'échappe vers l'espace interplanétaire par un effet de tuyère semblable à celui à l'origine du VS = échappement à vitesse supersonique, appelé « vent polaire ».
 - plasma froid raréfié (>10× / plasmasphère) + présence de plasma chaud du VS.

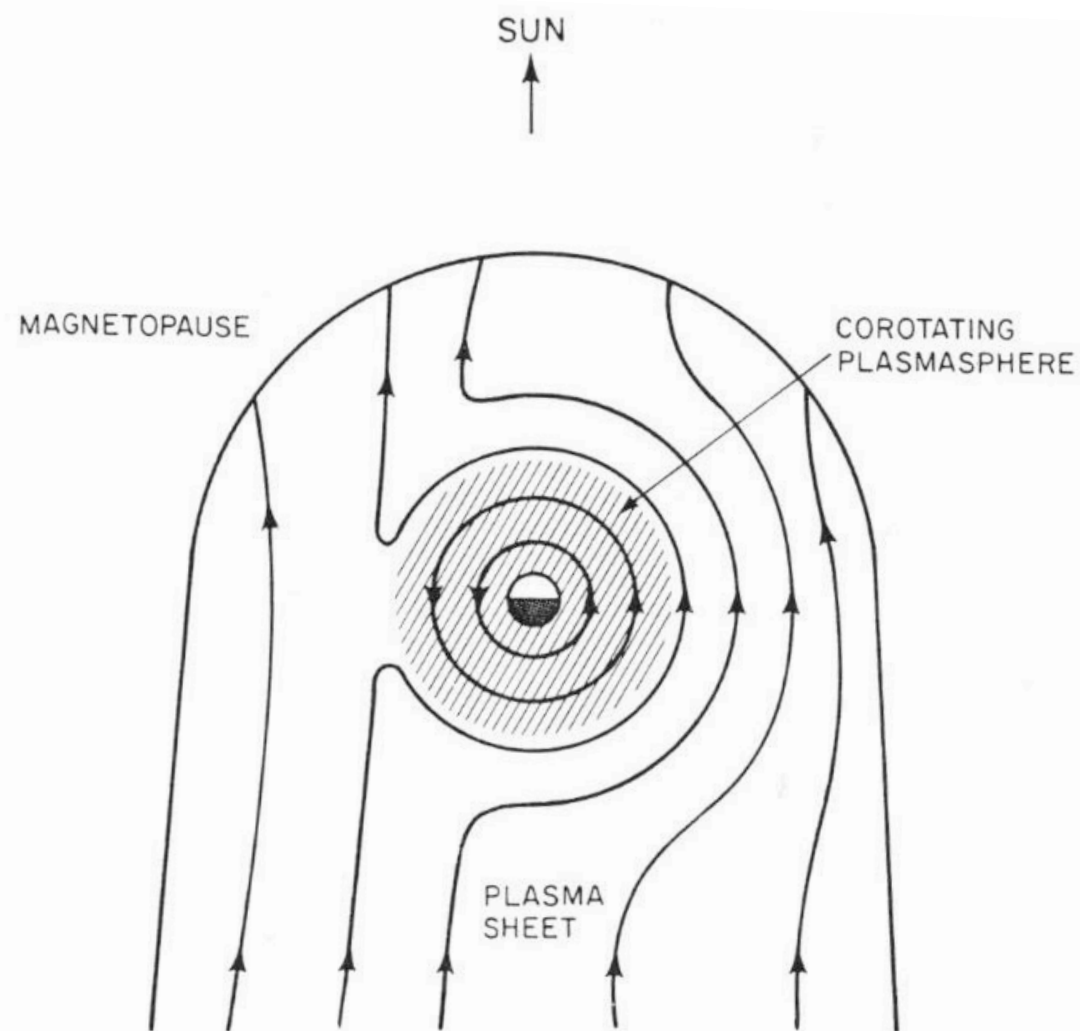


Fig. 6.6. Contours of plasma flow velocity and equipotentials in the magnetic equatorial plane. The concentric circles indicate corotating plasma deep in the magnetosphere. The diagram is fixed with respect to the sun.

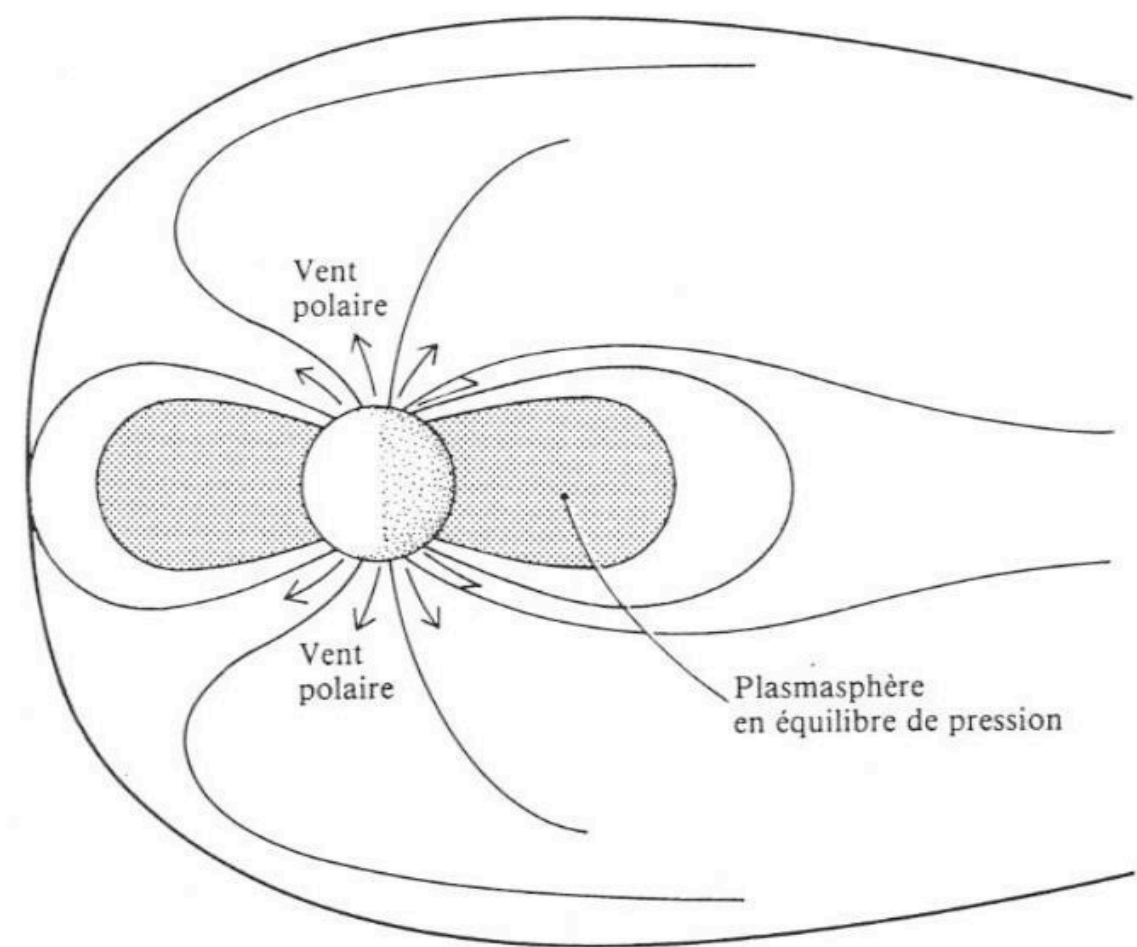


FIG. 5-42 – La superposition de la convection et de la corotation des tubes de force magnétiques d'une magnétosphère planétaire fait apparaître trois régimes distincts de remplissage de ces tubes de force par le réservoir de plasma ionosphérique. La partie interne, la « plasmasphère », est une région peuplée de façon à peu près permanente d'un plasma dense et froid qui est le prolongement du plasma ionosphérique dans la magnétosphère. (D'après P. M. Banks, A. F. Nagy et W. I. Axford, « Dynamical Behavior of Thermal Protons in the Midlatitude Ionosphere and Magnetosphere » ; *Planetary and Space Science*, 19, 1053, © 1971 Pergamon Journals Ltd.)

- Les observations confirment cette transition abrupte :
 → variation $\times 10$ -100 de N en quelques $R_T/10$ autour de $\sim 4 R_T$
 Renflement de la plasmasphère côté soir comme prédit.
- Comme E_{conv} varie /t, la position de la plasmopause varie aussi
 → des tubes de plasma se trouvent alternativement d'un côté ou de l'autre
 → processus complexes de remplissage / vidage.

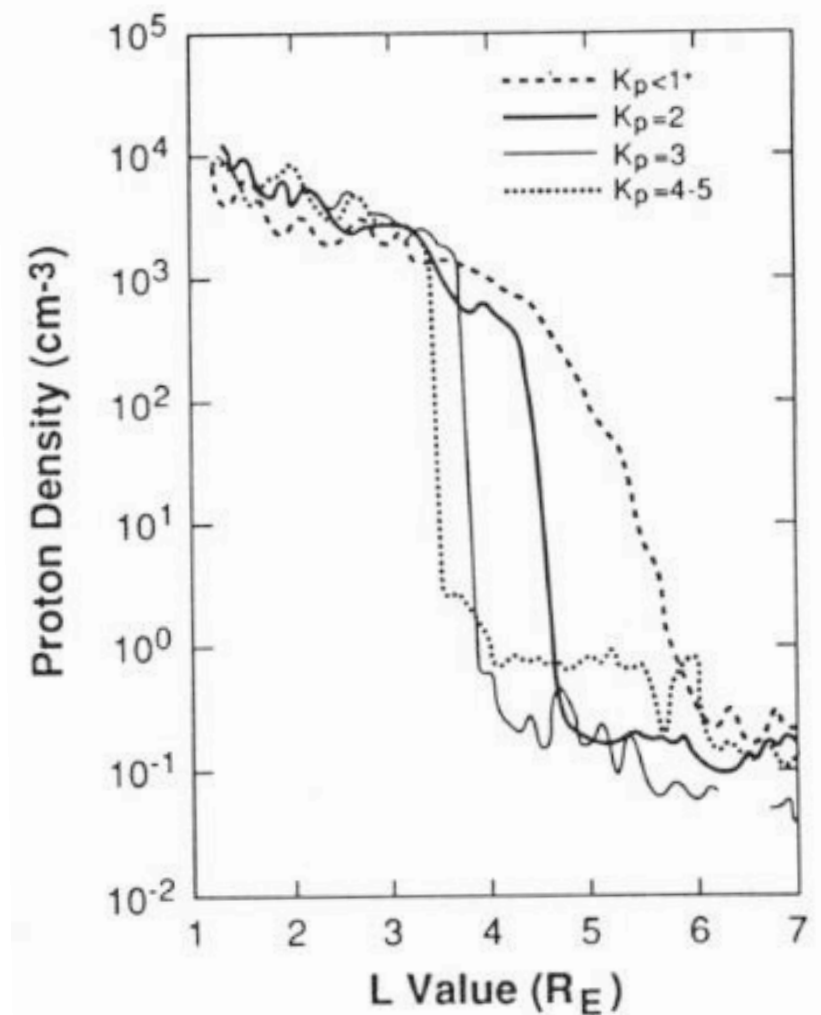
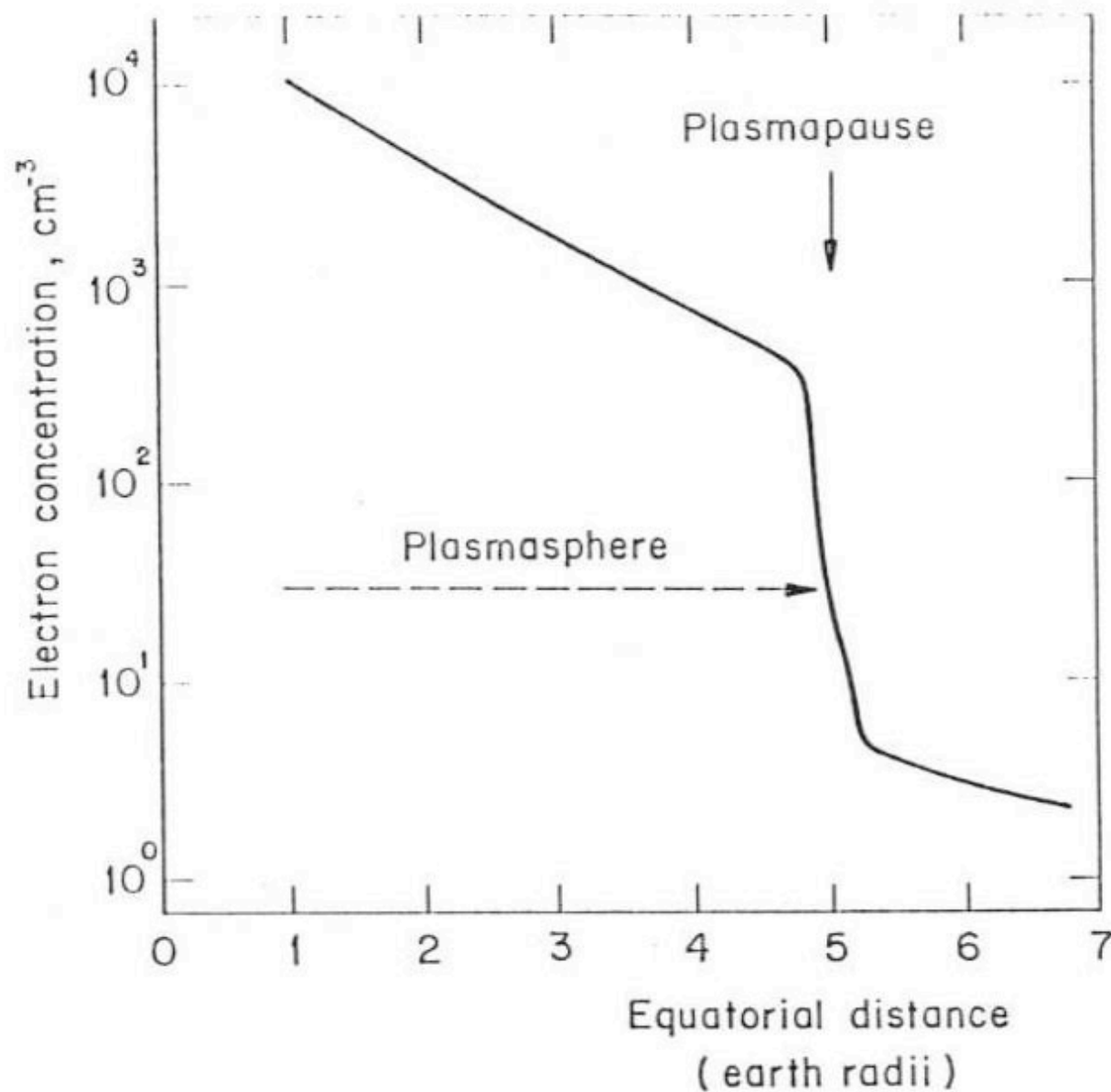
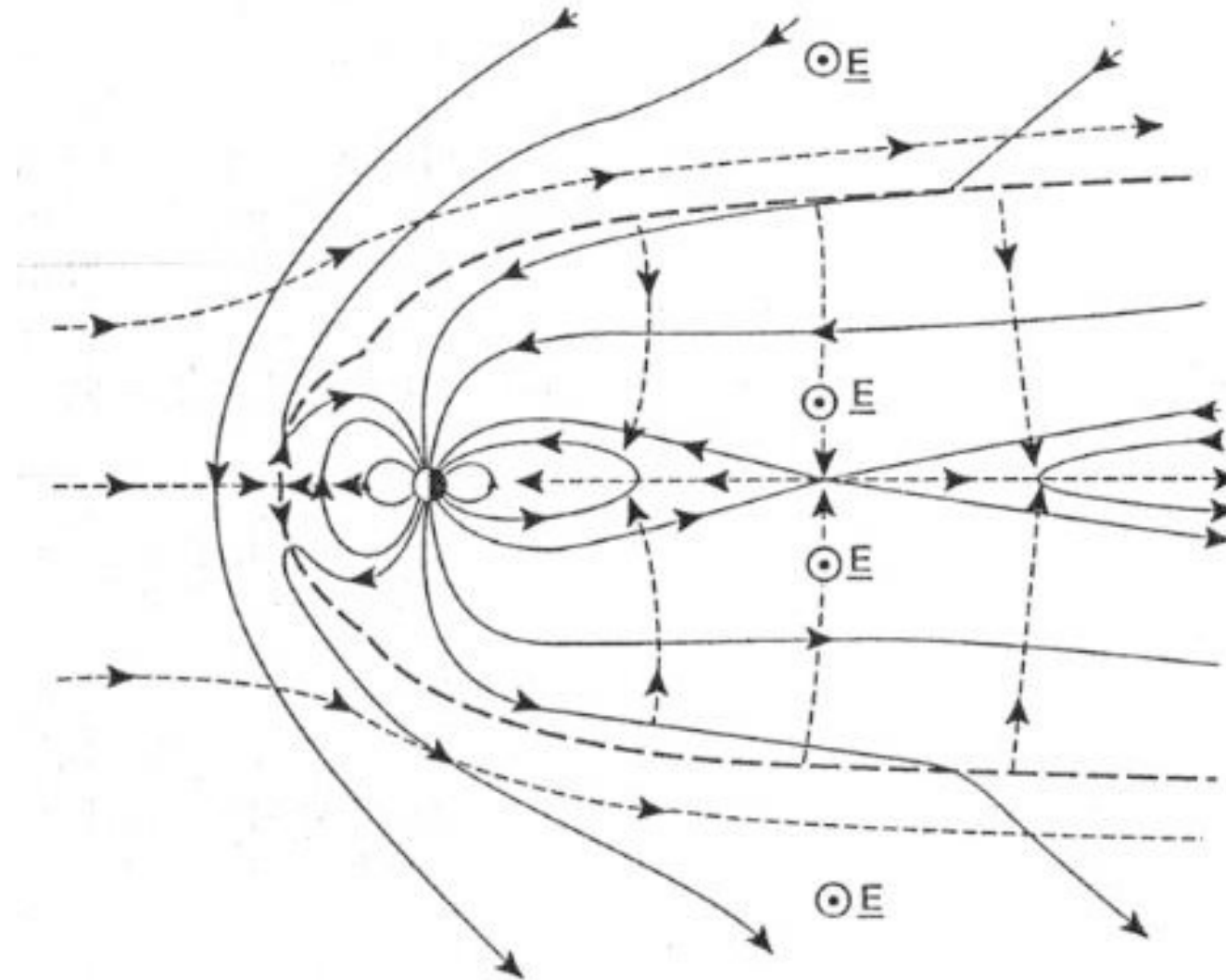


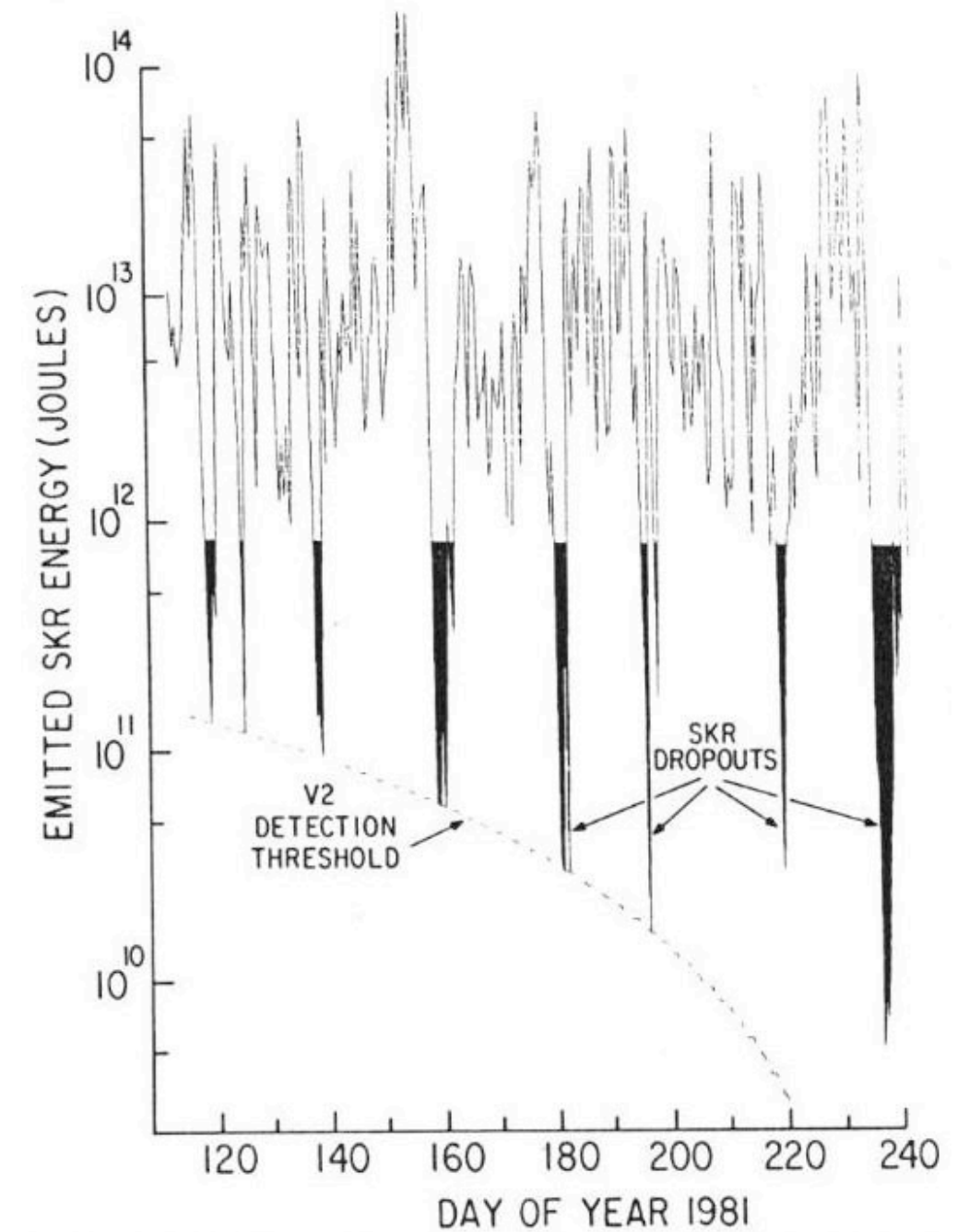
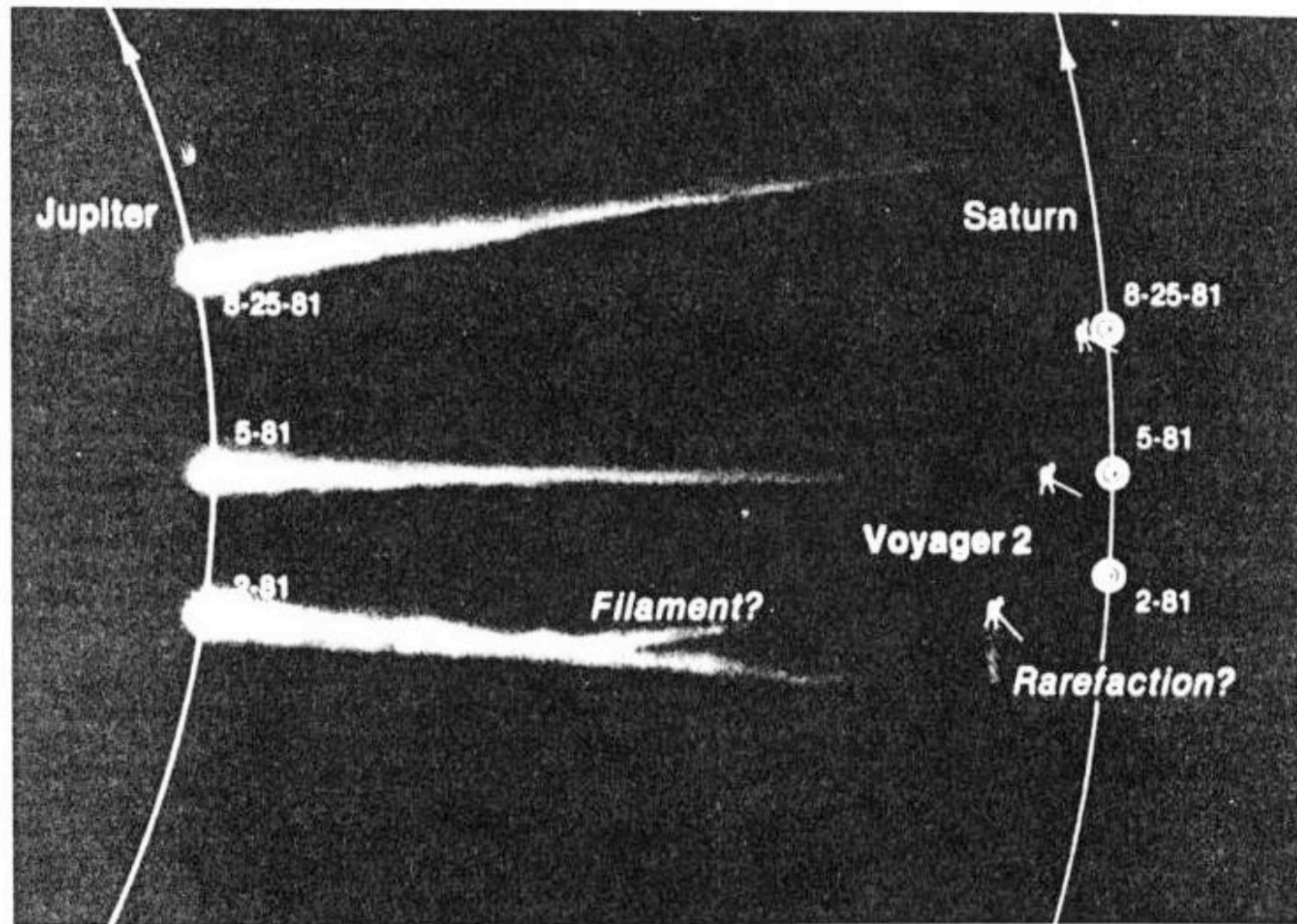
FIG. 10.15. Variation of the nightside plasmasphere to varying levels of geomagnetic activity as measured by OGO 5. (Adapted from Chappell, 1972.)

- La convection MS transporte le plasma du VS vers la queue, où il se concentre en un « **feuillet de plasma** ».
- Côté antisolaire, le calcul du modèle de Chapman-Ferraro ne s'applique pas, et les lignes de B sont fortement étirées par la convection du plasma du VS pour former la « **queue magnétosphérique** ».

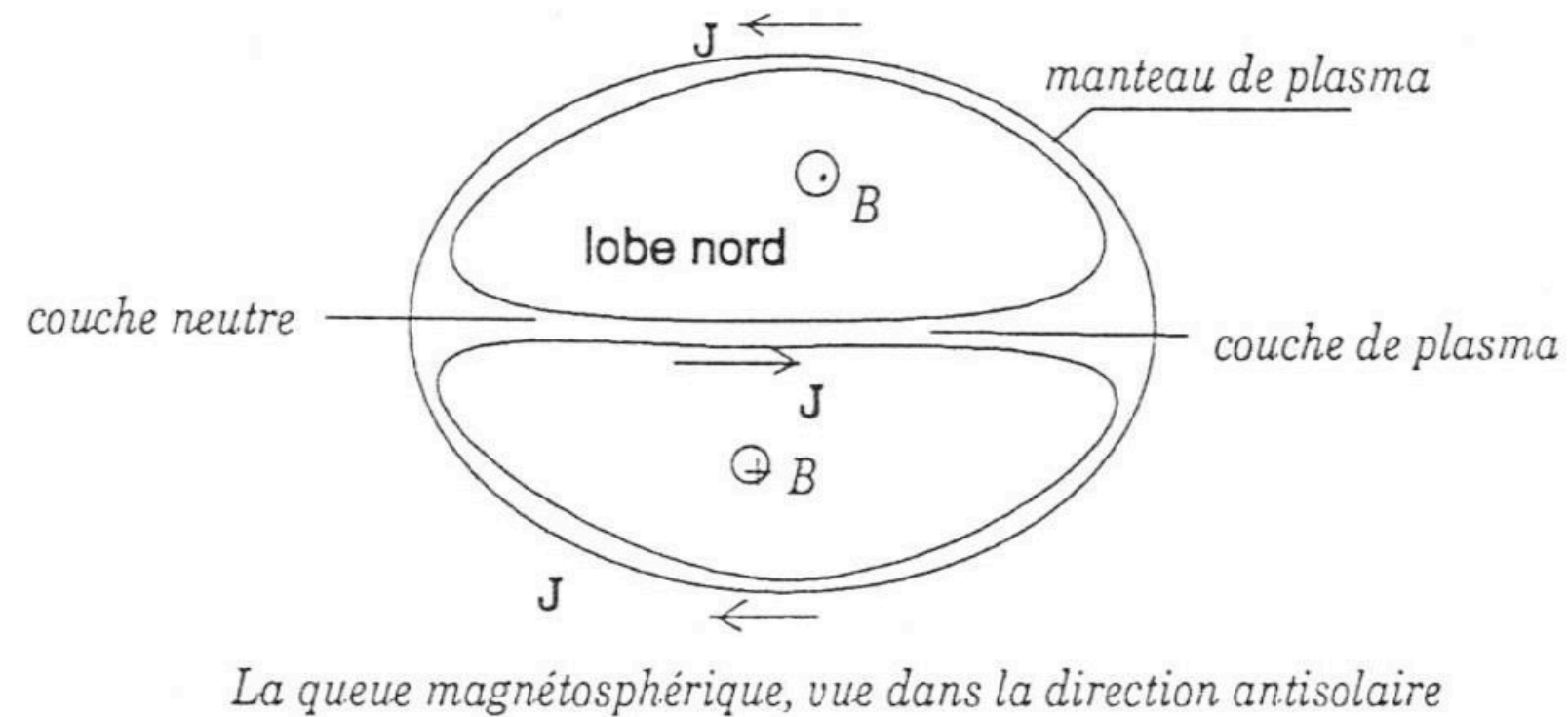
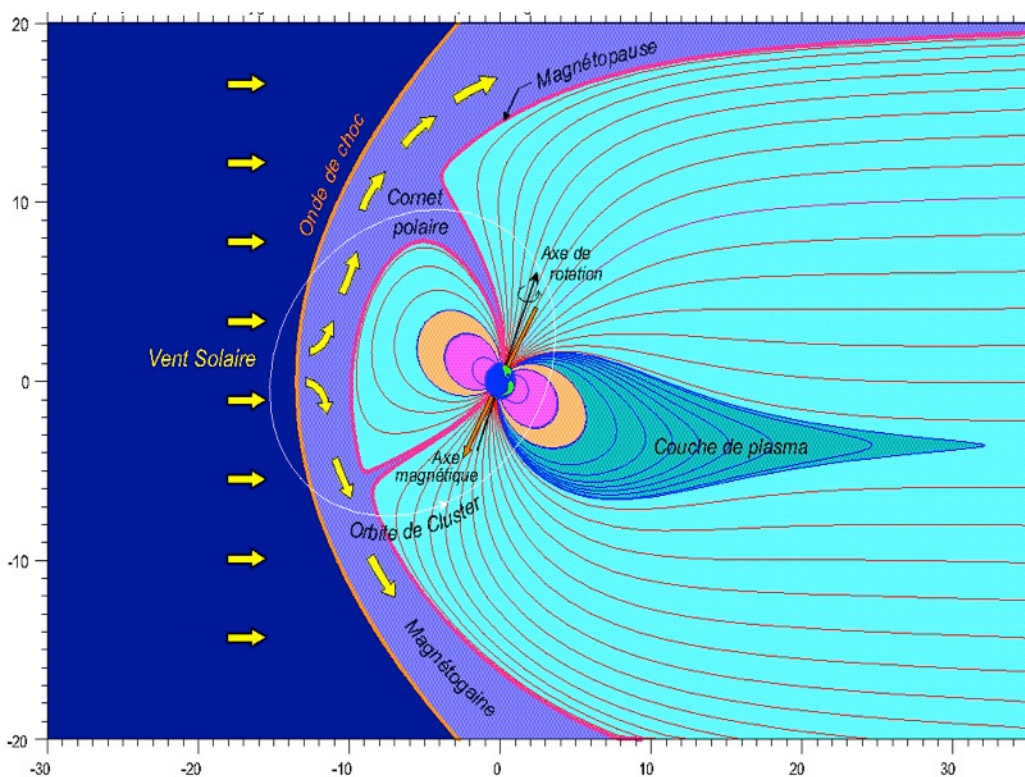


- Cycle de Dungey en ~ 12 h pour la Terre ; transport $\perp$ à ~ 10 km/s vers le feuillet de plasma sur lignes ouvertes en ~ 4 h ($\sim 20 R_T/10$ km/s) $\rightarrow$ longueur de la queue $\sim 4\text{h} \times V_{VS} \sim 1000 R_T$
- La ligne de reconnection en période calme est (?) vers $100\text{-}200 R_T$ en aval de la Terre.

- Jupiter : $\varnothing$ queue $\sim 400 R_J$
 $\rightarrow$ longueur de la queue $\sim (200 R_J / V_{\perp}) \times V_{VS} \sim 4 \text{ UA}$ (observée $\geq 5 \text{ UA}$!)
 avec $V_{\perp} \sim 10 \text{ km/s}$



- A grande distance de la Terre, les lignes de B sont // à l'axe Terre-Soleil
→ structure en 2 « lobes », N (B orienté « solaire ») & S (B antisolaire).
- Les 2 lobes sont séparés par une « couche neutre », région d'inversion du champ, dont l'équilibre (P totale) impose la présence d'un plasma plus dense (et/ou plus chaud) = « feuillet de plasma » (rempli par transport $\perp B$), parcouru par un courant matin → soir.



- Les « cornets polaires » séparent les lignes de B se refermant vers l'avant et vers l'arrière de la MS.
→ Régions magnétiquement « ouvertes » sur le VS = zones privilégiées d'entrée du plasma du VS (de la magnétogaine).

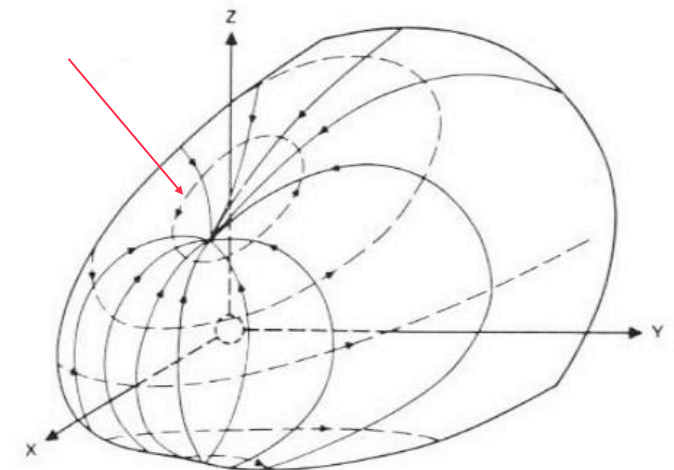


FIG. 6.2. Left: The magnetopause surface. Solid lines are magnetic-field lines. Dashed lines show the direction of currents on the boundary. (From Midgey and Davis, 1963.)

Uranus : - axe de rotation dans le plan de l'écliptique (vers le Soleil en 1986, $\perp$ en 2007)

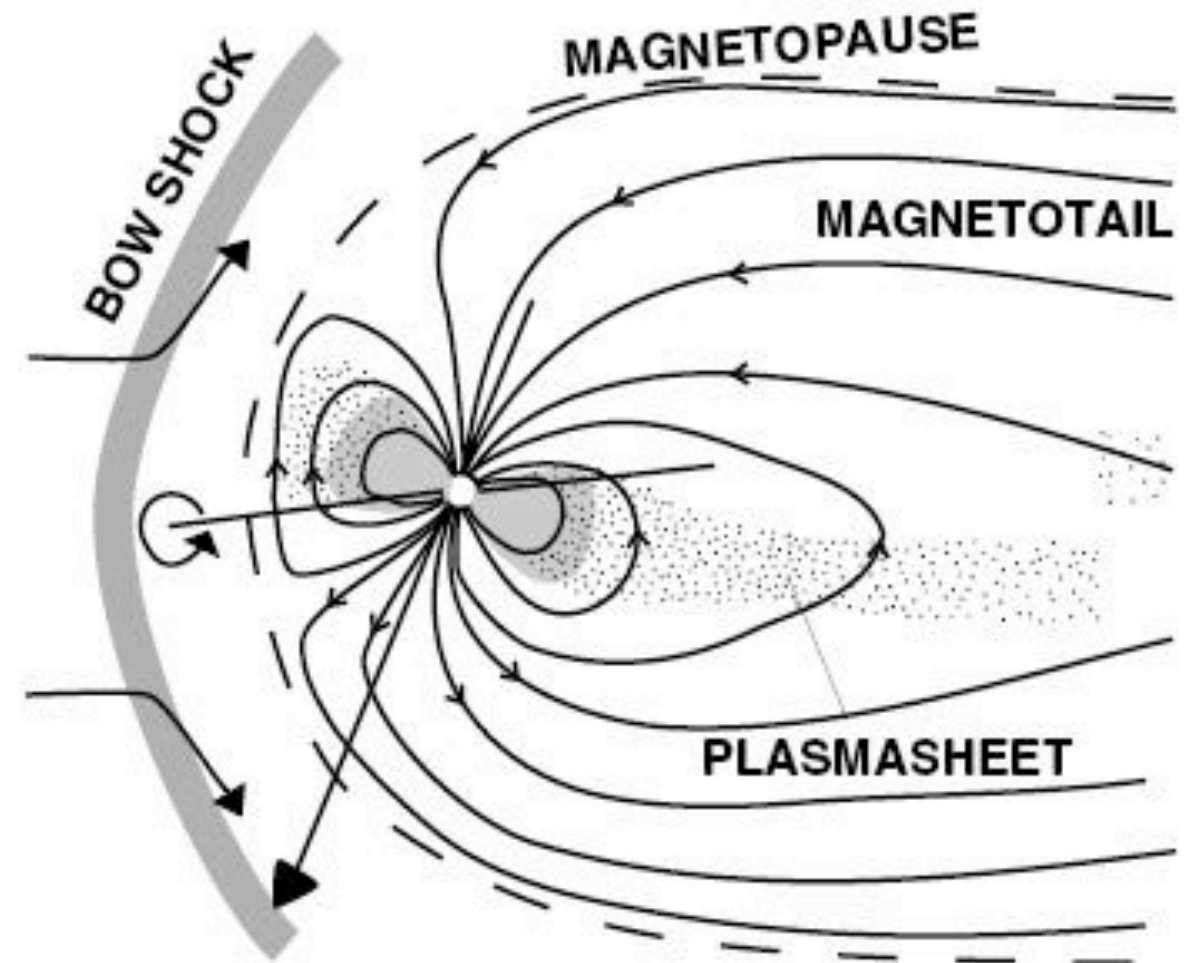
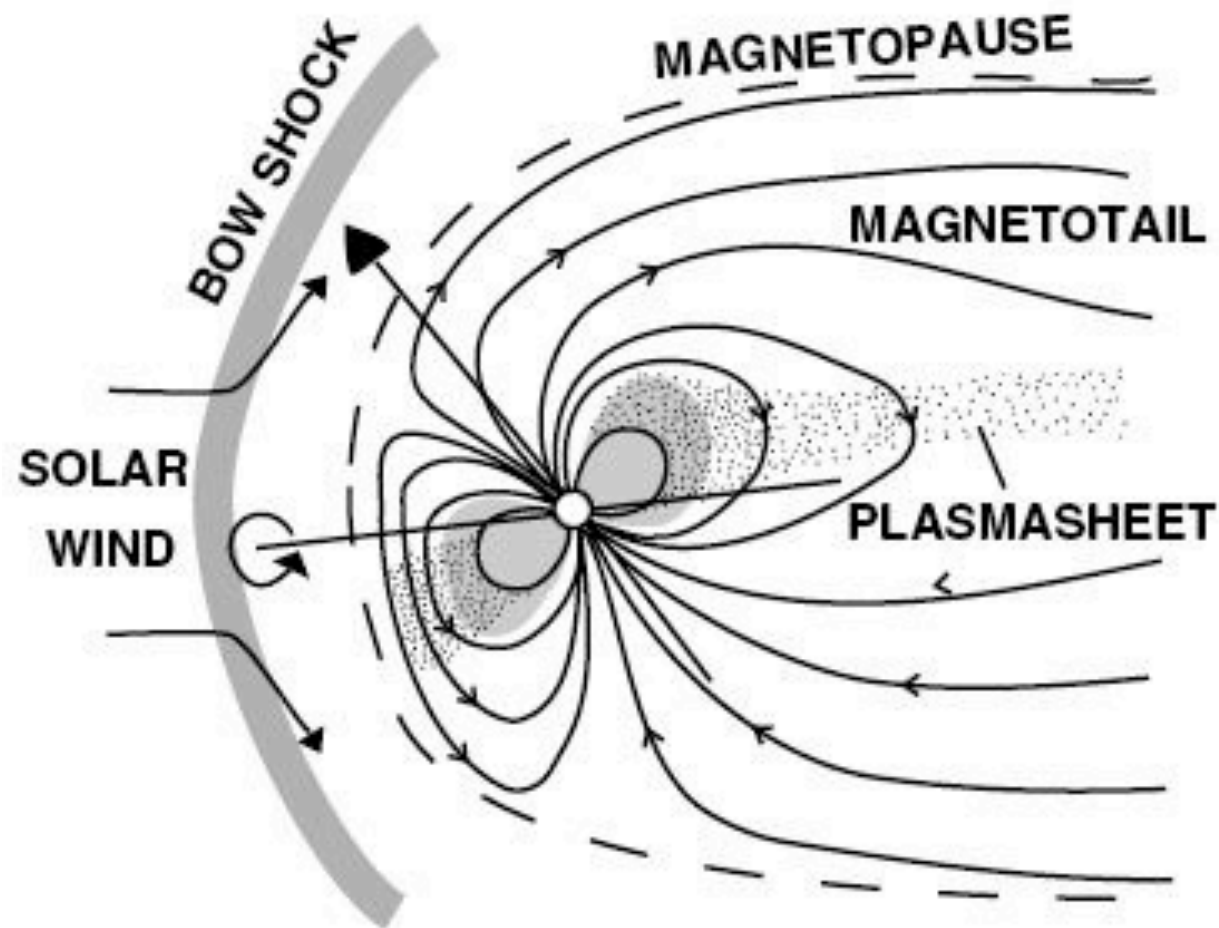
- axe magnétique à -59° de Ω

→ flux de convection et de corotation $\perp$

→ flux de convection stationnaire dans un repère en corotation ?

→ trajectoires hélicoïdales du plasma dans le référentiel inertiel ?

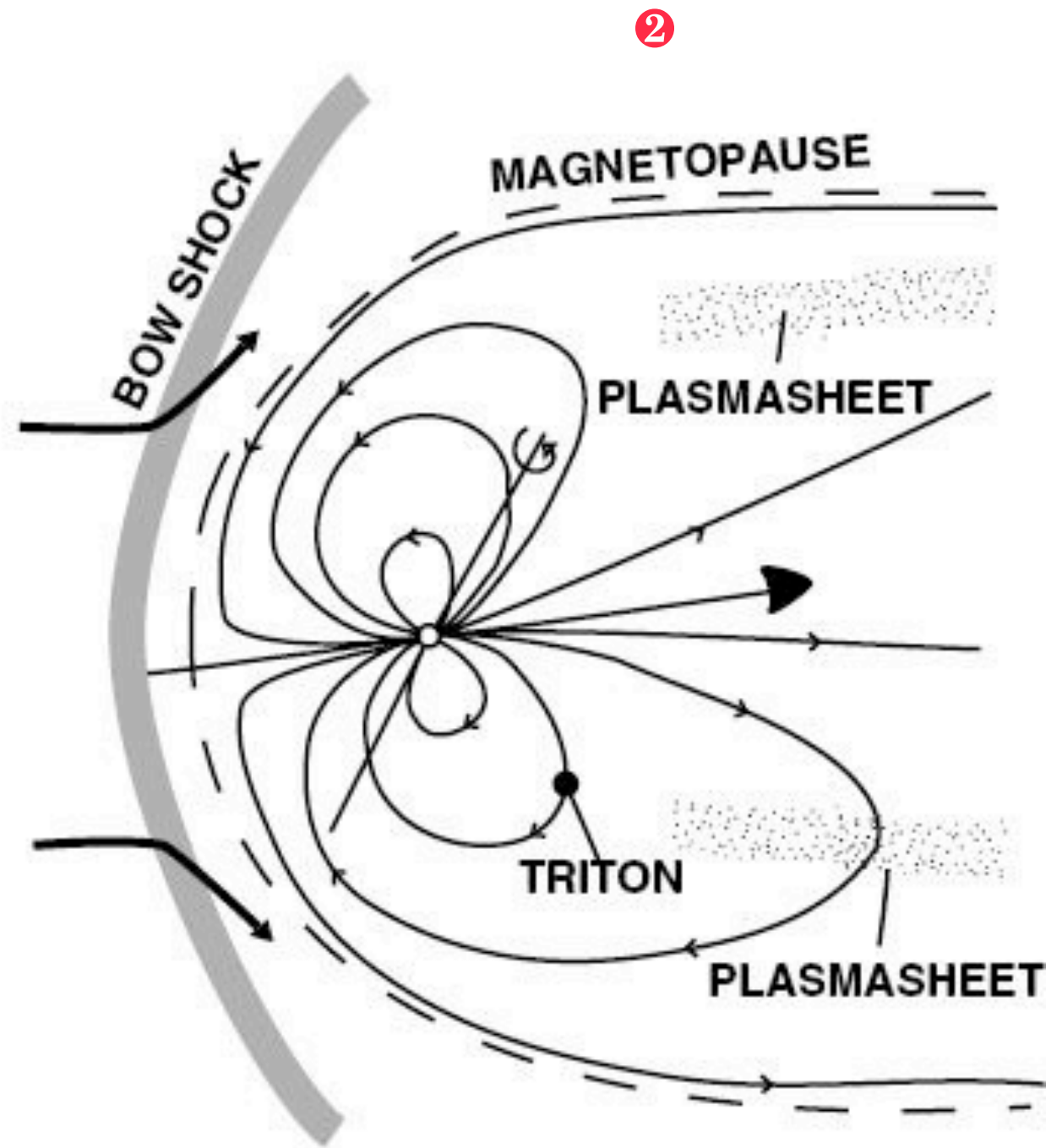
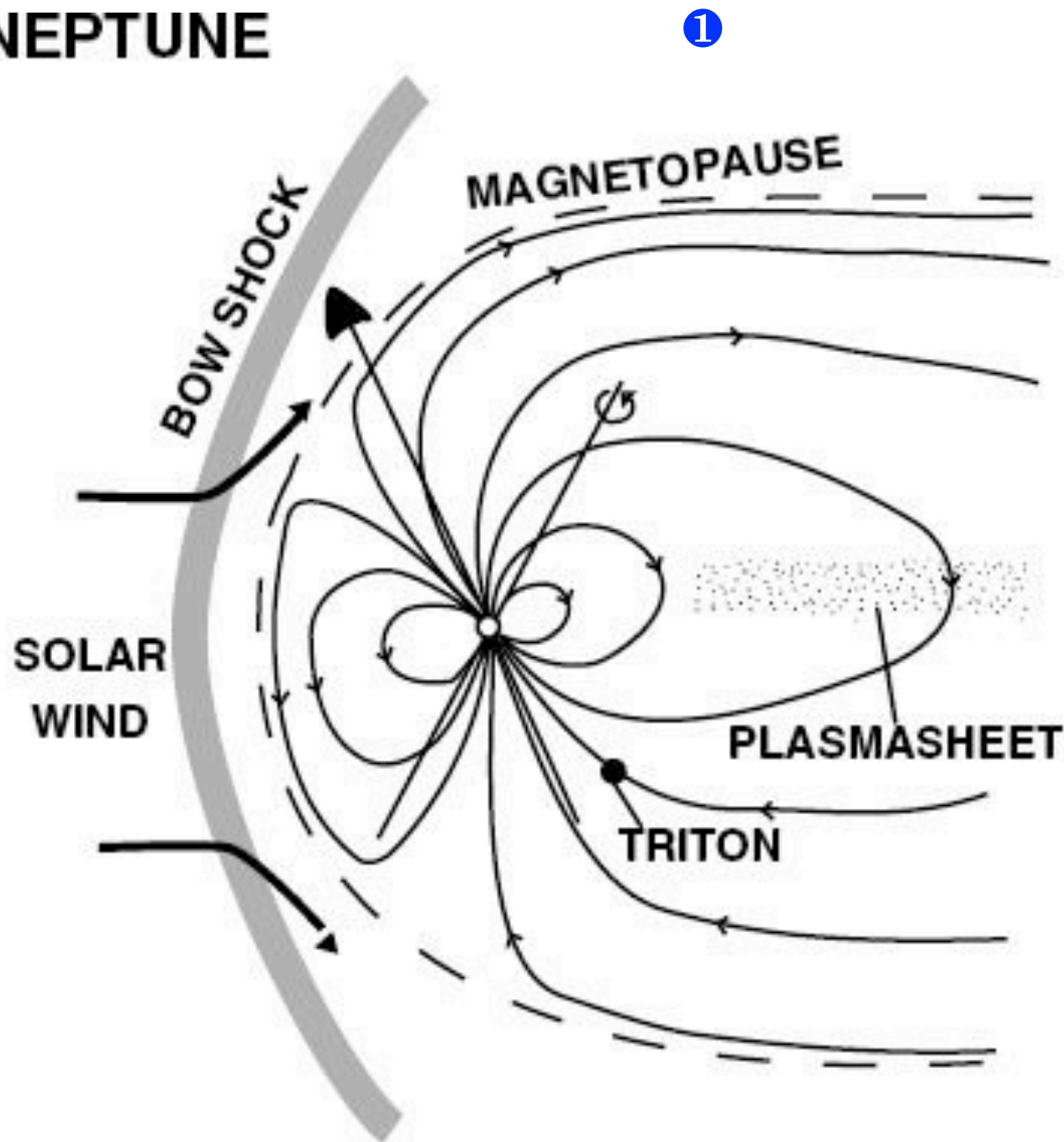
URANUS



Neptune : B à -47° de Ω , lui même à 29° de la normale à l'écliptique

- oscillation de la MS entre « terrestre » ① et « pole-on » ② toutes les 16.11h
- dynamique très complexe, absence constatée de plasmasphère dense, zones aurorales de forme irrégulière à moyenne latitude (reconnexion?)

NEPTUNE



**Les planètes magnétisées :
de Mercure aux planètes géantes**

Philippe Zarka

*LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr*

5. Sources et puits du plasma magnétosphérique, transport, accélération

5.1 Sources du plasma magnétosphérique

5.2 Réservoirs de plasma

5.3 Puits (pertes)

5.4 Transport

5.5 Accélération, Chauffage

5.1 Sources

- Vent solaire :

~1% du plasma de la magnétogaine franchit la magnétopause, par diffusion ou reconnection (à grande ou petite - FTE - échelle),
ou entrée directe dans les cornets

H^+ & He^{++} (toujours & e^-), $T \sim 100$ eV

→ Terre : $\sim 10^{26}$ ions/s (~ 200 g/s)

→ Jupiter : $\sim 10^{28}$ ions/s (~ 20 kg/s)

- Ionosphère/Plasmasphère :

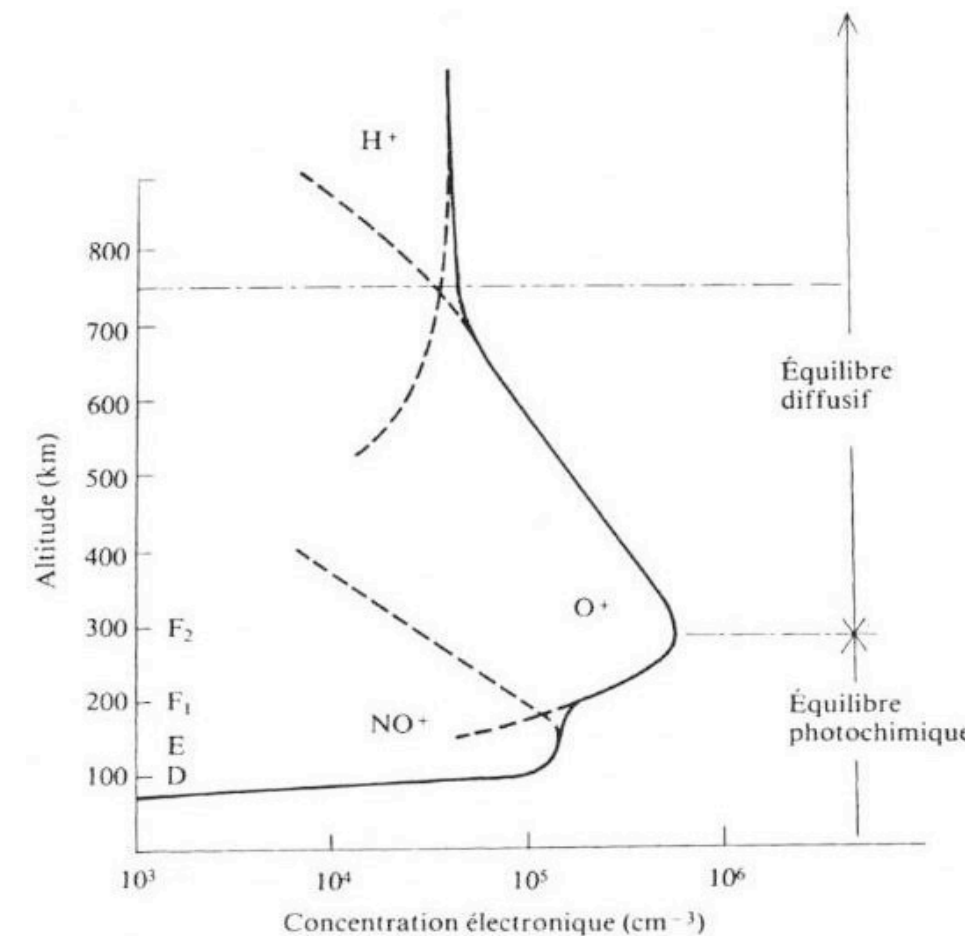
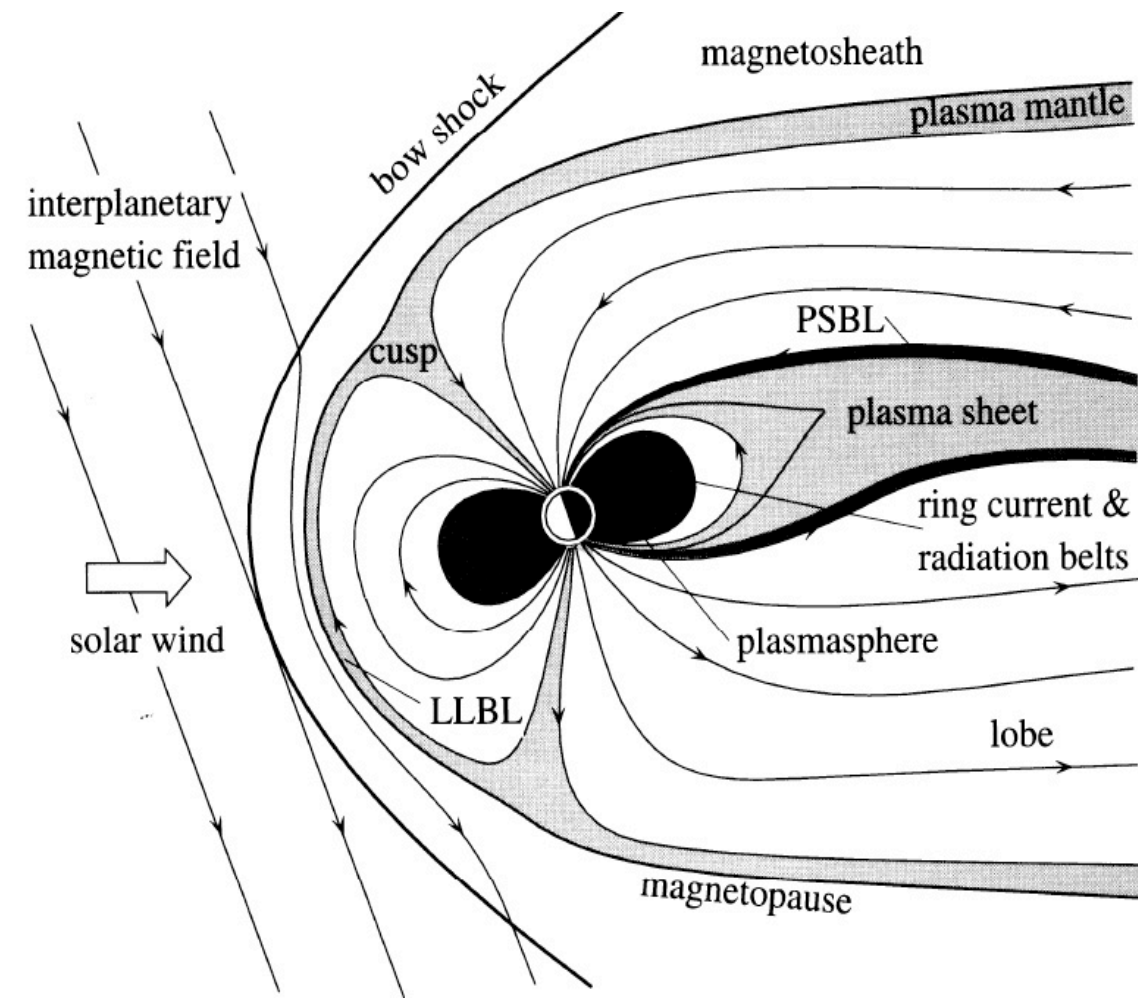
équilibre diffusif vertical ($\parallel B$) : $N = N_0 \exp(-(z - z_0)/2H_{\text{gaz neutre}})$

$T \sim 0.1 - 1$ eV

→ Terre : N^+ , O^+ , NO^+ , O_2^+ ... $\sim 10^{26}$ ions/s (~ 3 kg/s)

→ Jupiter : H^+ , H_2^+ , H_3^+ $\sim 10^{28}$ ions/s (~ 20 kg/s)

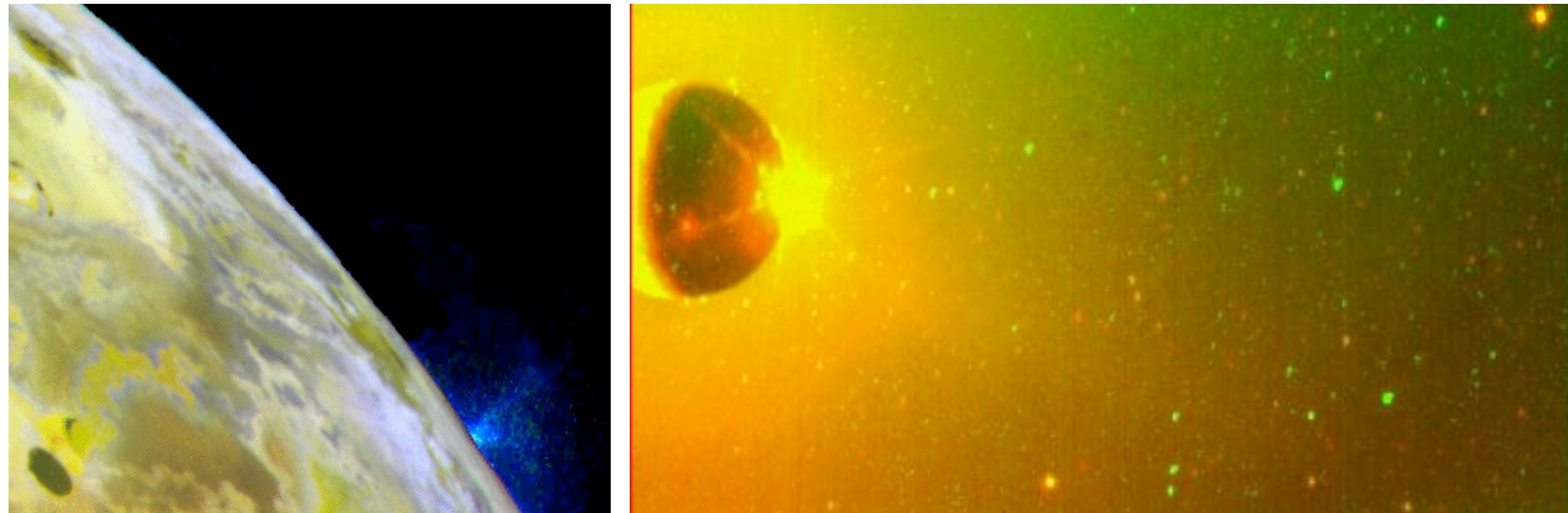
→ Uranus : halo d' H neutre du côté éclairé $\sim 10^{25}$ ions/s (H^+)



- Satellites :

→ Satellites galiléens de Jupiter = source dominante d'ions lourds de la MS

Volcanisme de Io : 10^3 kg/s de SO_2 (+ poussières & Na) + ionisation partielle par UV solaire
 + collisions avec particules MS énergétiques : S^+ , O^+ 3×10^{28} ions/s

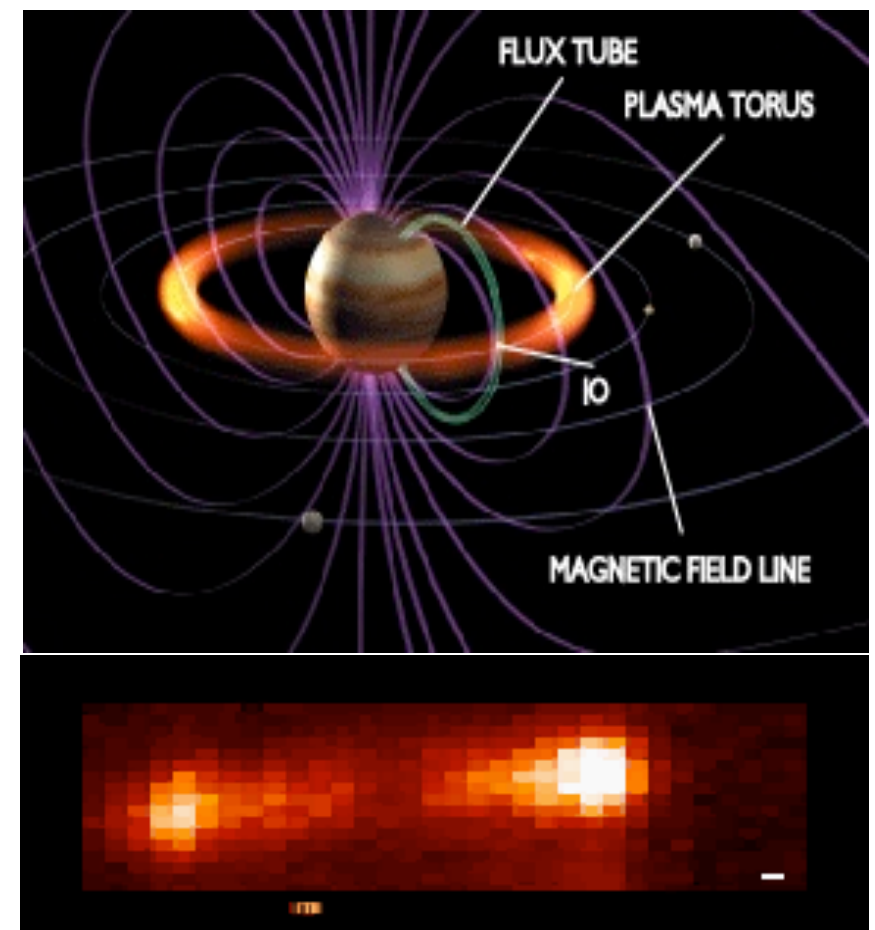
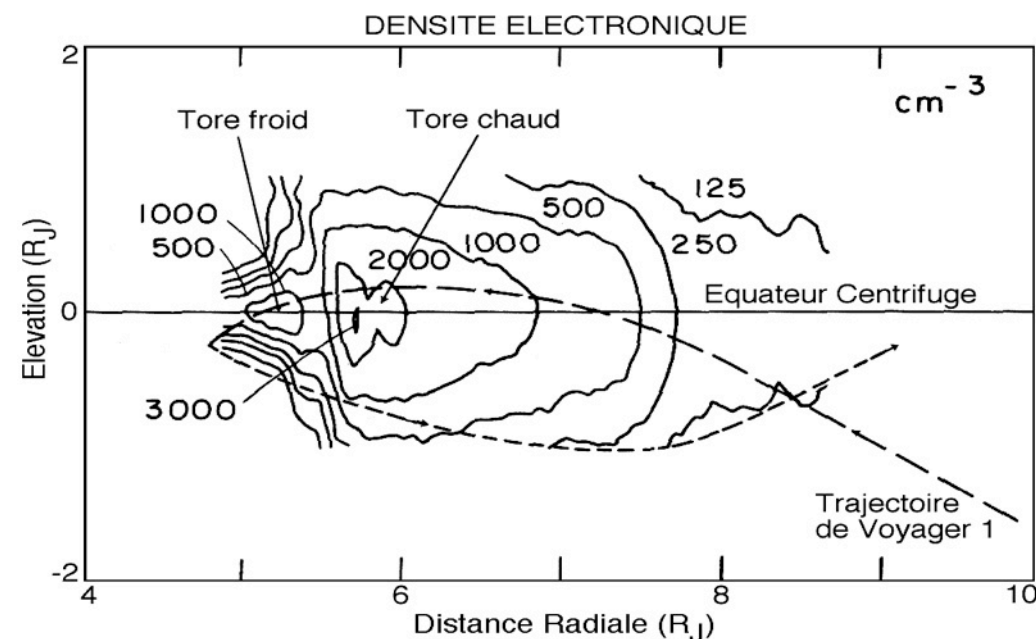


Matière éjectée par Io à $5.9 R_J$, $\sim @ V_{\text{orbitale Képlérienne}} = 18$ km/s

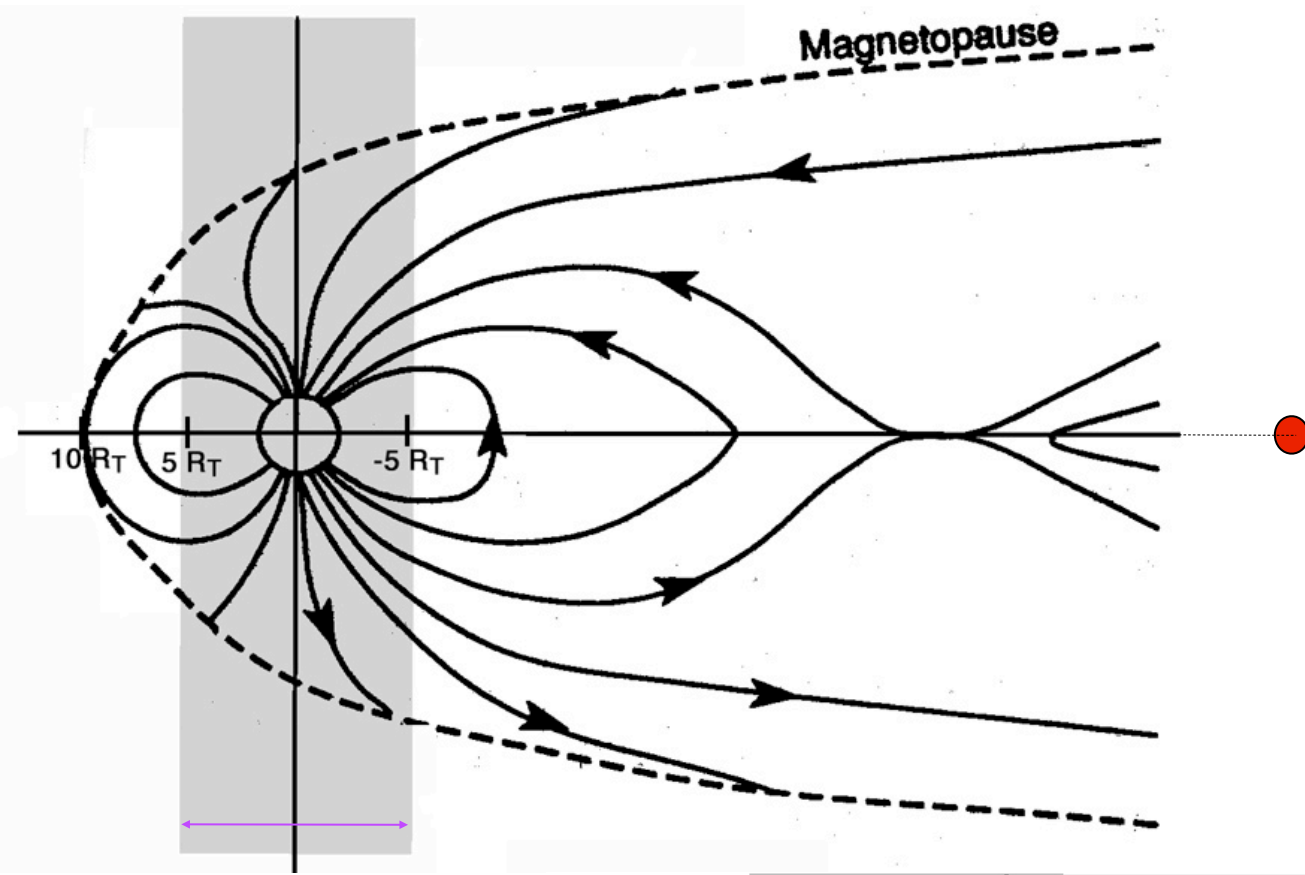
Ions S^+ , O^+ créés → entraînés par la corotation à 74 km/s

(= « pick-up ») → alimentent un tore de plasma $\sim 1 R_J$

d'épaisseur autour de l'orbite de Io, $N_{\text{max}} \sim 3000 \text{ cm}^{-3}$

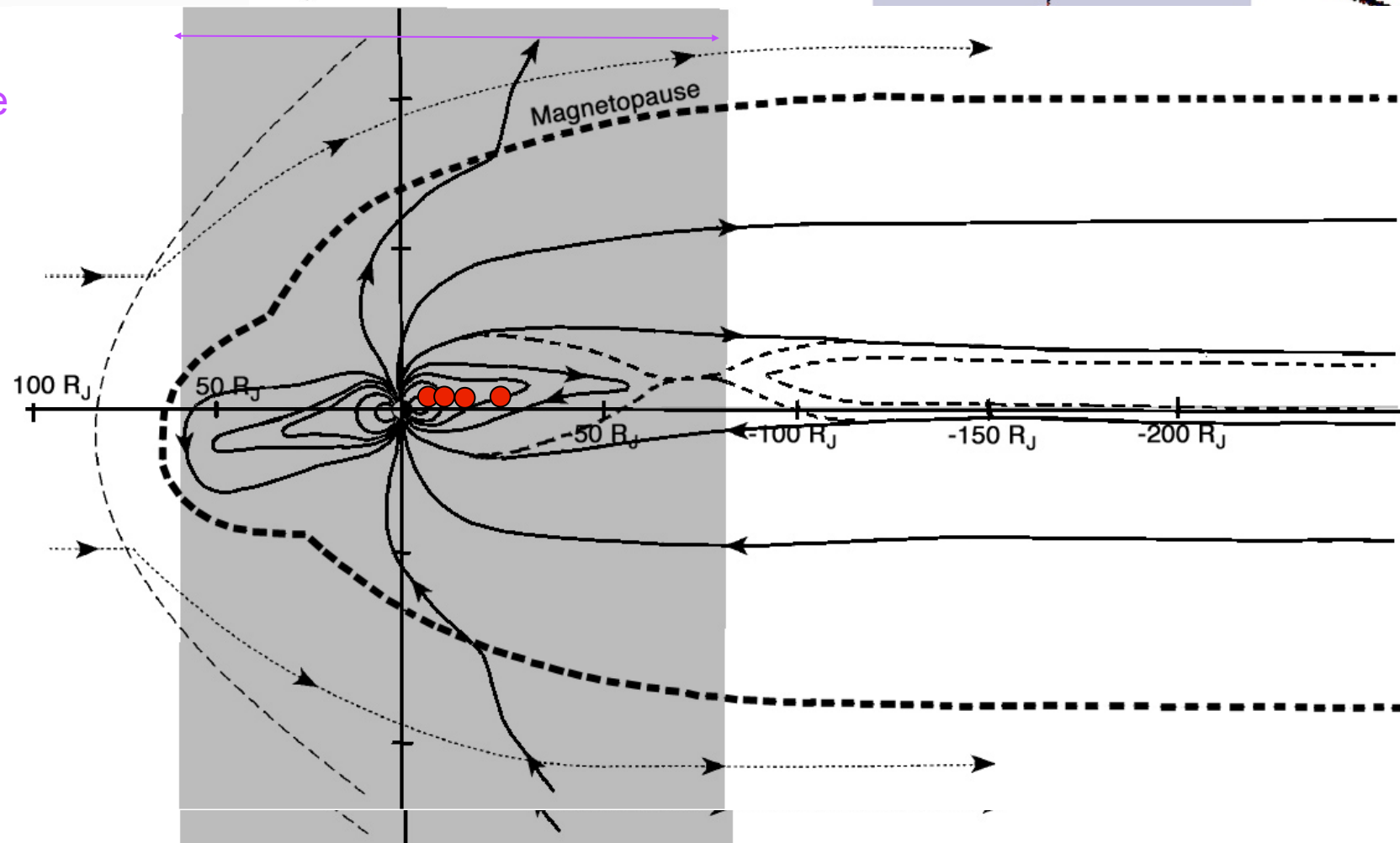
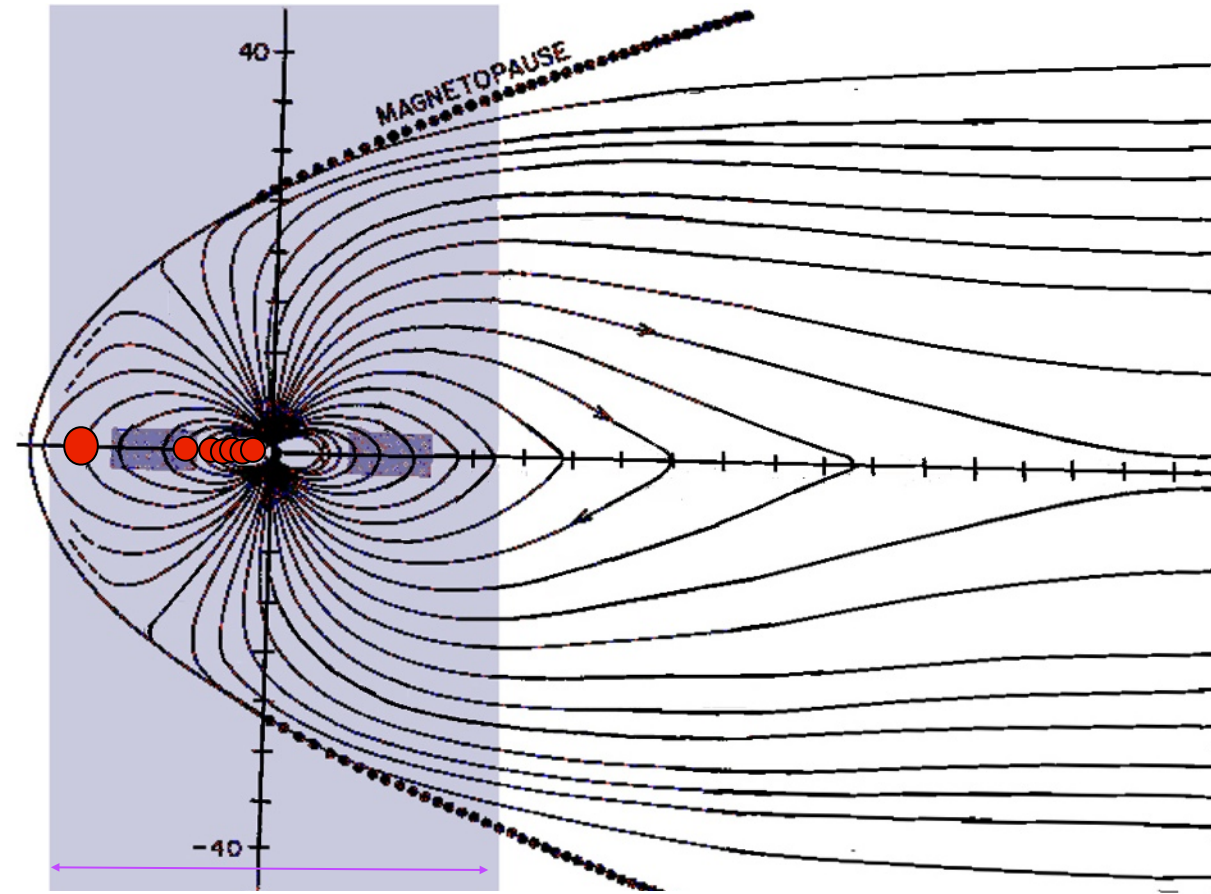


TERRE



corotation /
plasmasphère

SATURNE



JUPITER

Titan (échappement atmosphérique) :

→ tore de H & N à $20 R_S$

→ H^+ & N^+ (+C?) : $\sim 10^{26}$ ions/s (2-3 kg/sec)

[50-100 cm^{-3} , 10^{6-7} K]

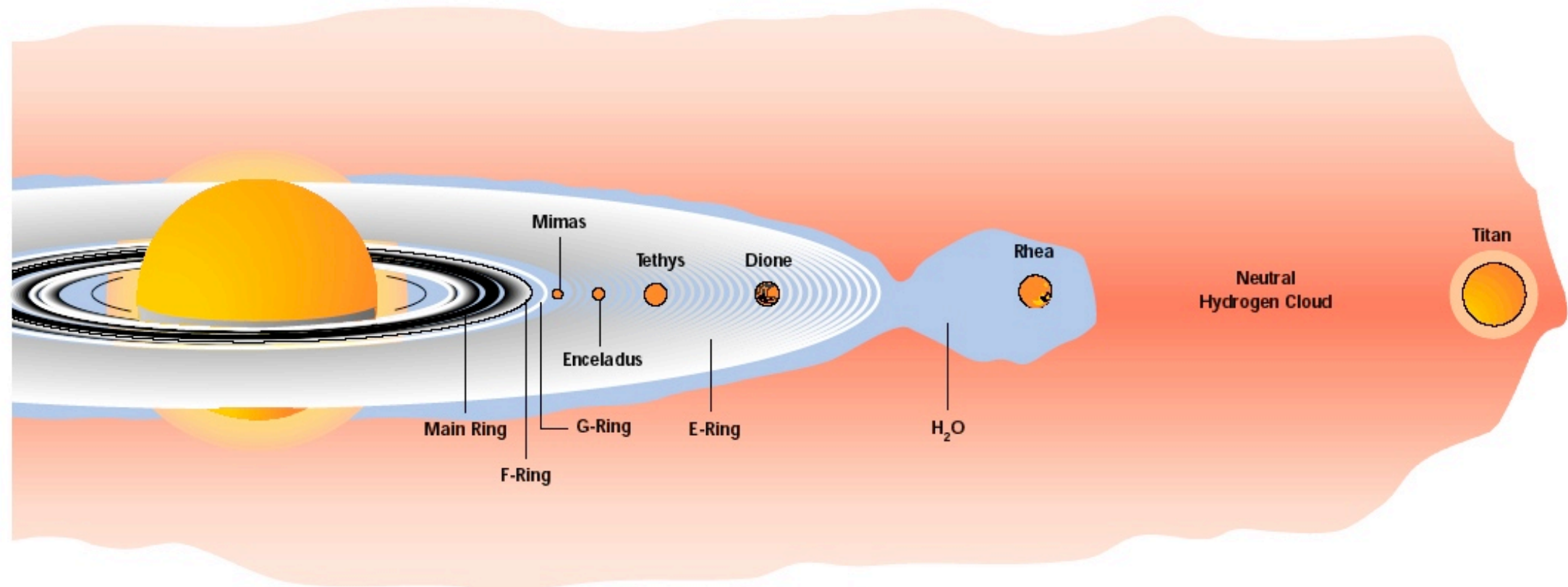
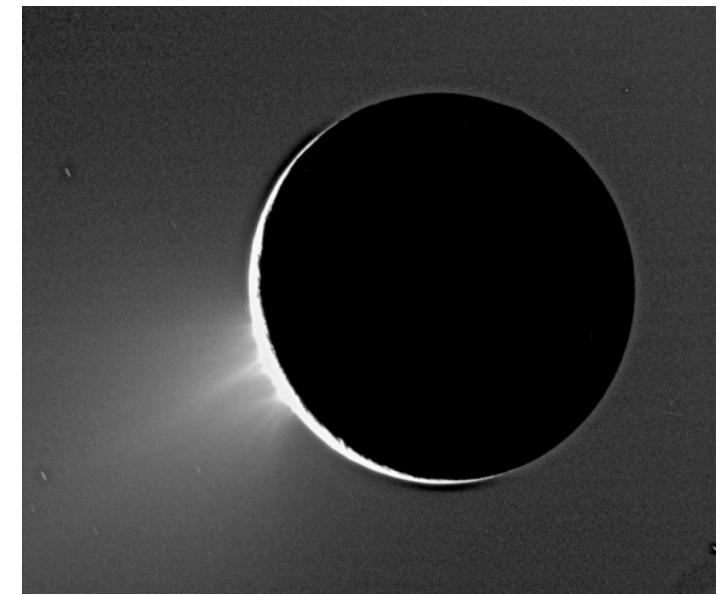
Encelade (exosphère, « panaches »)

Triton :

→ tore de H & N à $14.6 R_N$: $\sim 10^{25}$ ions/s (200 g/sec)

• Anneaux (Saturne) : criblage, photo-dissociation/ionisation

→ O^+ , O_2^+ , ions de H_2O : $\sim 10^{28}$ ions/sec (> 200 kg/s)



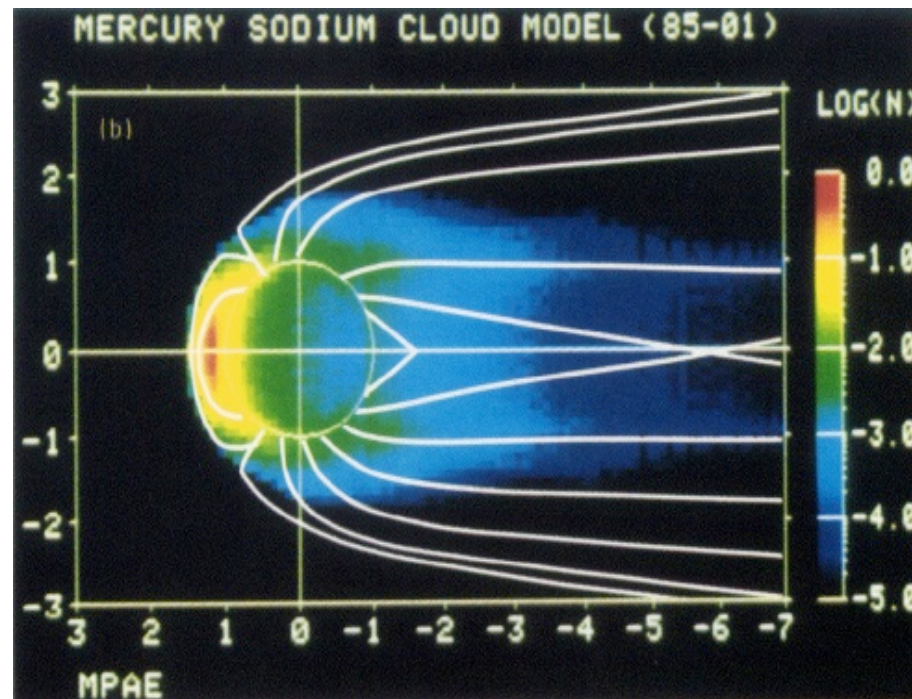
- Criblage des surfaces :

→ Criblage de la surface d'Europe (glace d'eau) par particules MS énergétiques :

O : $\sim 2 \times 10^{27}$ ions/s (~ 50 kg/s)

→ Satellites glacés de Saturne (Encelade !)

→ Surface de Mercure ?



- Sources Jupiter >> Saturne, Uranus, Neptune

- $N_{neutres}/N_{plasma} = 100$ @ Saturne, 0.003 @ Jupiter

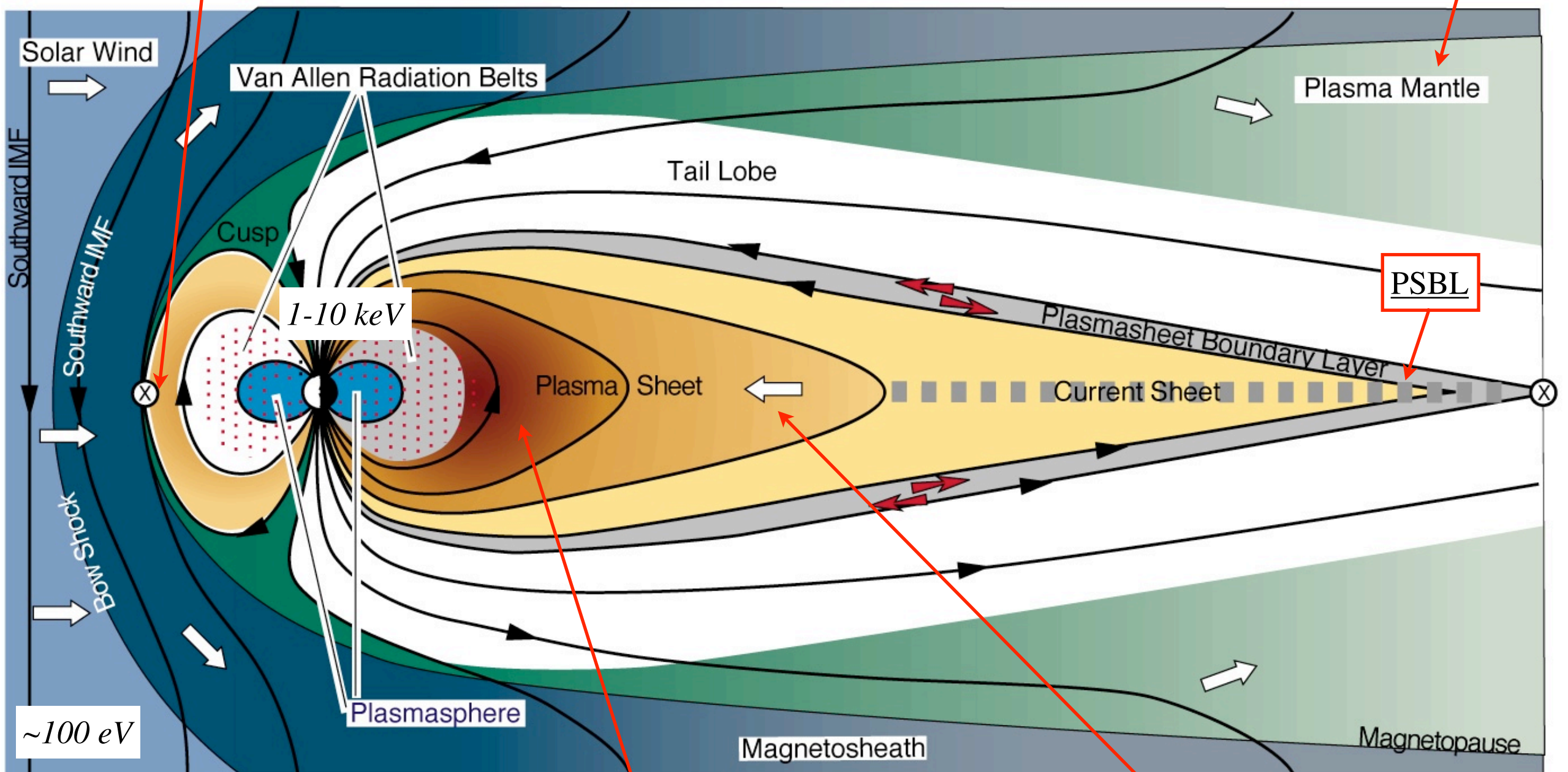
- Masse du plasma stockée $\sim 10^7$ kg @ Terre, $\sim 10^{10}$ kg @ Jupiter

5.2 Réservoirs de plasma

LLBL (Low Latitude Boundary Layer) :
 $T_{\text{plasma}} \sim 10^6 - 10^7 \text{ K}$ (*qq* 100 eV), $N = 1 - 10 \text{ cm}^{-3}$

Manteau :

$T_{\text{plasma}} \sim T_{\text{Magnétogaine}} \sim 10^6 \text{ K}$ (100 eV)
 $N = 0.01 - 10 \text{ cm}^{-3}$



Courant annulaire

(injections + chauffage depuis le feuillet de plasma en période de sous-orages, + intense côté nuit)
 $T = 20 - 100 \text{ keV}$, $N \sim 1 \text{ cm}^{-3}$

Feuillet de plasma :

$T = 5 \text{ keV}$ (ions) - 1 keV (e^-)
 $N \sim \text{qq cm}^{-3}$

- Courant annulaire

Pour les particules de faible énergie, $W \ll \rightarrow \mathbf{u}_C \ \& \ \mathbf{u}_G \ll \rightarrow$ dérive dominante = en champs croisés
 $\rightarrow$ le plasma « thermique » ou de faible énergie ($W < 100 \text{ eV}$, $\mu B \ll q\Phi$) suit les équipotentielles électriques ($\Phi = c^{te}$)

Pour les particules énergétiques les dérives de courbure et de gradient de B s'ajoutent à la dérive en $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$: $\mathbf{u}_C = f(W_{//})$ & $\mathbf{u}_G = f(W_{\perp})$

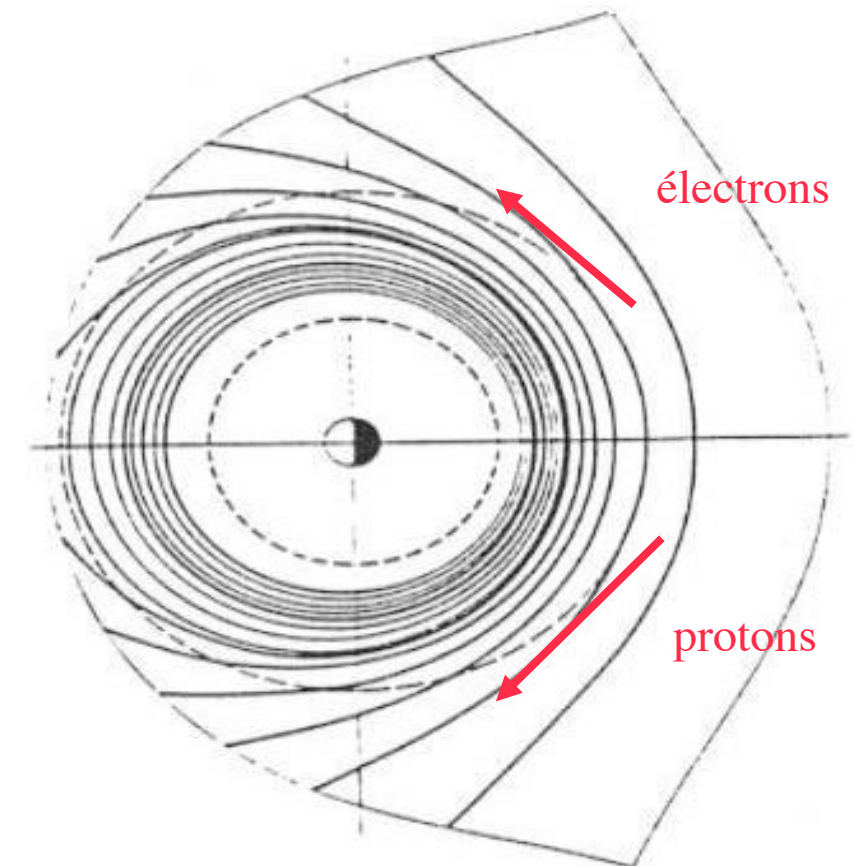
$\rightarrow$ trajectoire $\neq$, déterminée par conservation de l'énergie totale de ces particules (la force $\mathbf{F}$ ne travaille jamais dans la dérive) : $W = E_{cin} + q\Phi = c^{te}$ avec $E_{cin} = E_{cin, //} + E_{cin, \perp}$
 et $E_{cin, \perp} = \mu B = mV_{\perp}^2/2 \rightarrow$ Pour des particules équatoriales ($E_{cin, //} = 0$) : $\mu B + q\Phi = c^{te}$

$\rightarrow$ les particules très énergétiques ($W > 100 \text{ keV}$ pour des protons, $\mu B \gg q\Phi$) suivent les lignes $B = c^{te}$

$\rightarrow$ dérive circulaire en longitude dans un champ dipolaire (électrons vers l'Est, protons vers l'Ouest)

= Origine du **courant annulaire** dans la magnétosphère terrestre

Effet de cet anneau de courant = B opposé à $B_{\text{terrestre}} \rightarrow$ jusqu'à -100 nT au niveau du sol.



- Disque / feuillet de courant

Orbite synchrone où $F_{\text{centrifuge}} = F_{\text{gravitation}} : \Omega^2 r = GM/r^2 \Rightarrow r = r_{\text{lim}} \sim (GMP^2/4\pi^2)^{1/3}$

Planet	R_p [km]	Ω [rads/s]	G_{surf} [ms ⁻²]	$R_{\text{synch}}/R_{\text{planet}}$	Plasma sources
Mercury	2440	1.24×10^{-6}	3.3	96	None
Earth	6371	7.29×10^{-5}	9.8	6.6	Ionosphere
Jupiter	70000	1.77×10^{-4}	25.6	2.3	Io
Saturn	60000	1.71×10^{-4}	10.8	1.8	Rings, moons
Uranus	25500	1.01×10^{-4}	8.6	3.2	Moons
Neptune	24830	1.01×10^{-4}	10.1	3.4	Moons

→ pour la Terre : $r_{\text{lim}} \sim 7 R_E$: pas de source de plasma dans la MS $> r_{\text{lim}}$

→ pour Jupiter & Saturne : $r_{\text{lim}} \sim 2 R_J$: source de plasma principale (interne à la MS),
à l'extérieur de l'orbite synchrone : Io à $6 R_J$, anneaux → effet centrifuge très important

Plasma magnétosphérique en corotation

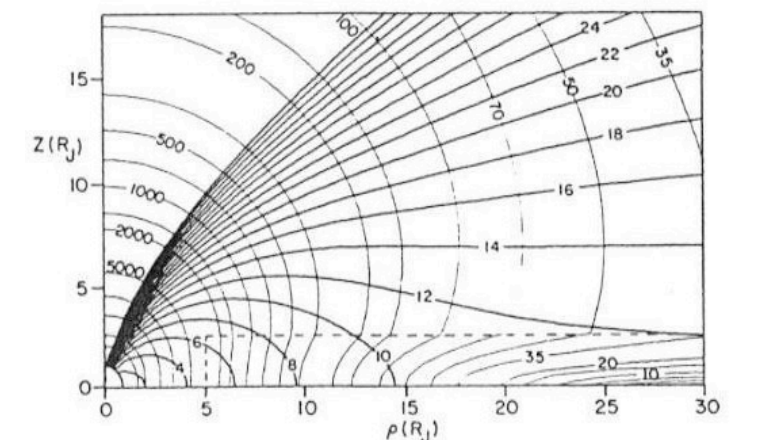
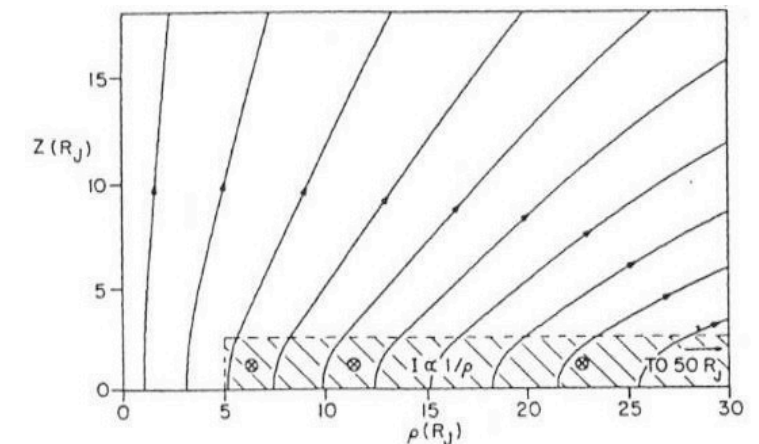
→ disque de courant équatorial (magnétodisque),

5-50 R_J , étire radialement $\mathbf{B}$ //^t équateur

→ équilibre la force centrifuge par une force e.m. $\mathbf{F}=\mathbf{j} \times \mathbf{B}$

→ génère B radial $\propto \sim R^{-3/2}$ ($> B$ dipôle au delà de 15 R_J)

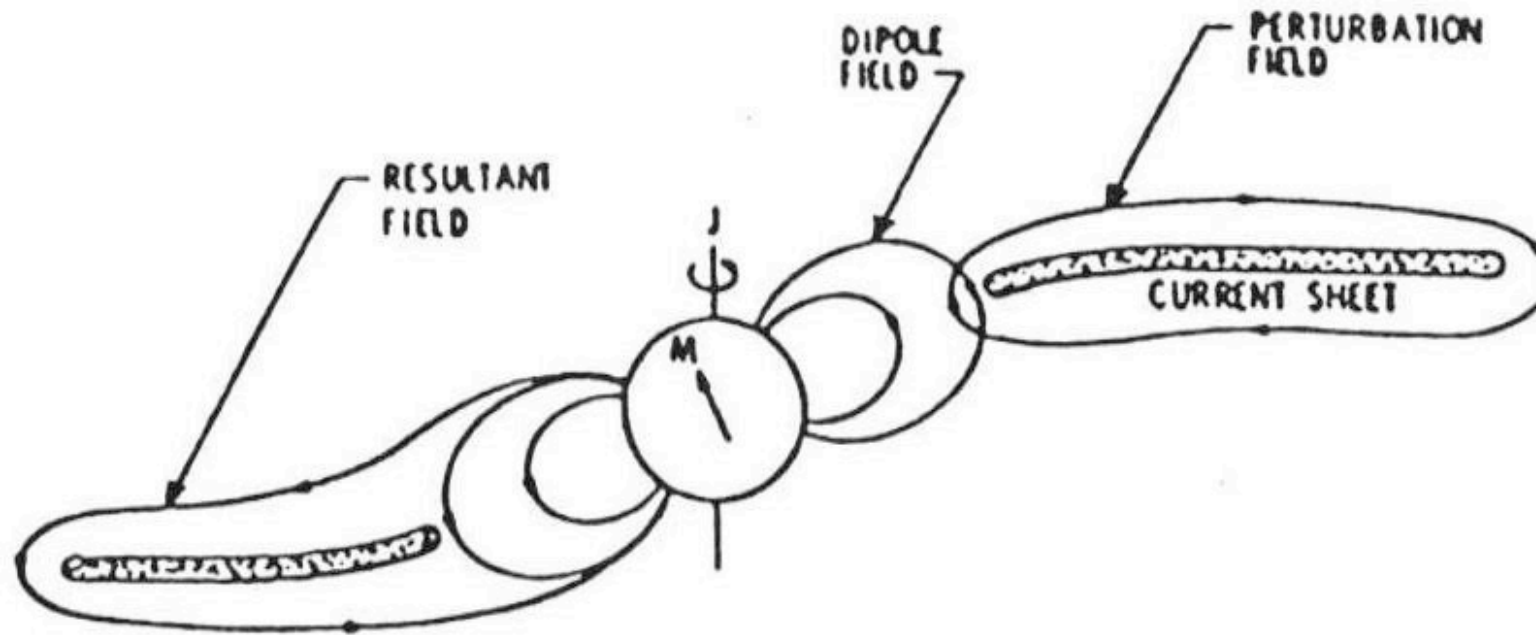
Dans le disque, $B \sim B_Z$ sud, faible



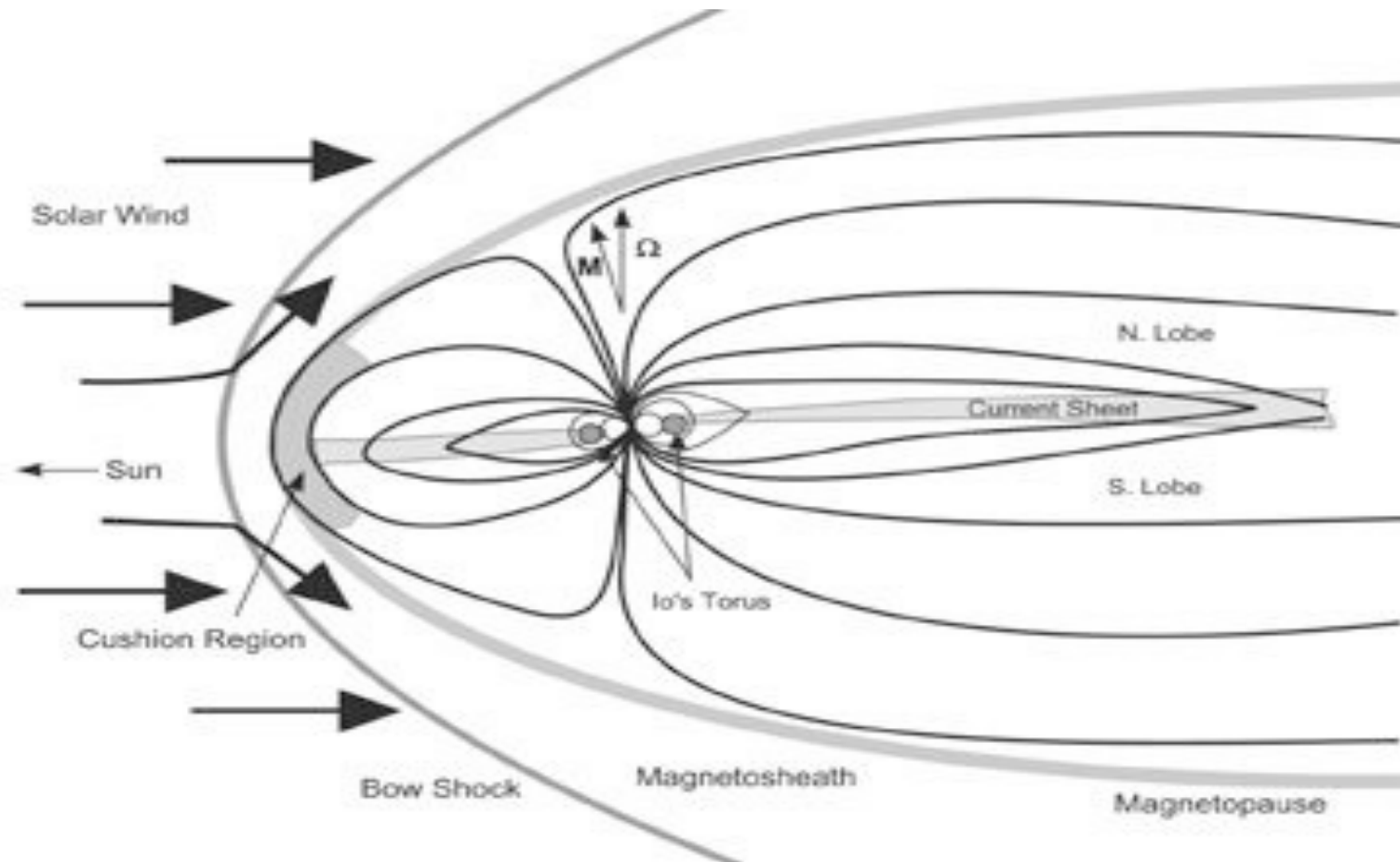
Disque de courant non plan

(dans l'éq. centrifuge $\leq 30 R_J$ – où la corotation domine –, // flot VS $\geq 35 R_J$ – convection)

+ ondulation azimuthale en jupe de ballerine car δB dû à la rotation de l'éq. centrifuge se propage à $V_A \sim 40 R_J/h$



Feuillet de courant = extension du disque de courant vers la queue.

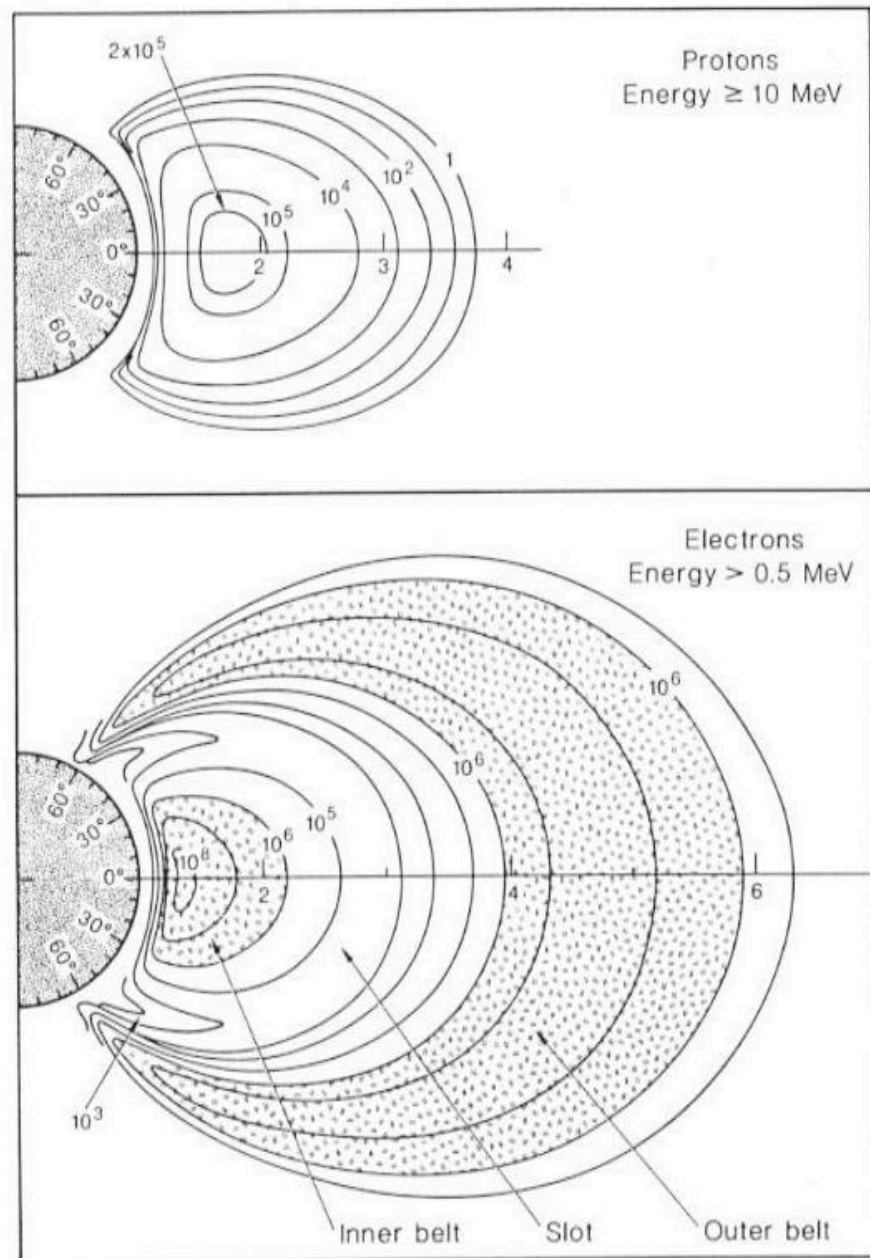


- Ceintures de radiations (de Van Allen)

→ Détectées par saturation des premiers détecteurs de particules embarqués (1958)

Particules au MeV, $L = 1.2$ à 4-6, piégées entre les points miroirs

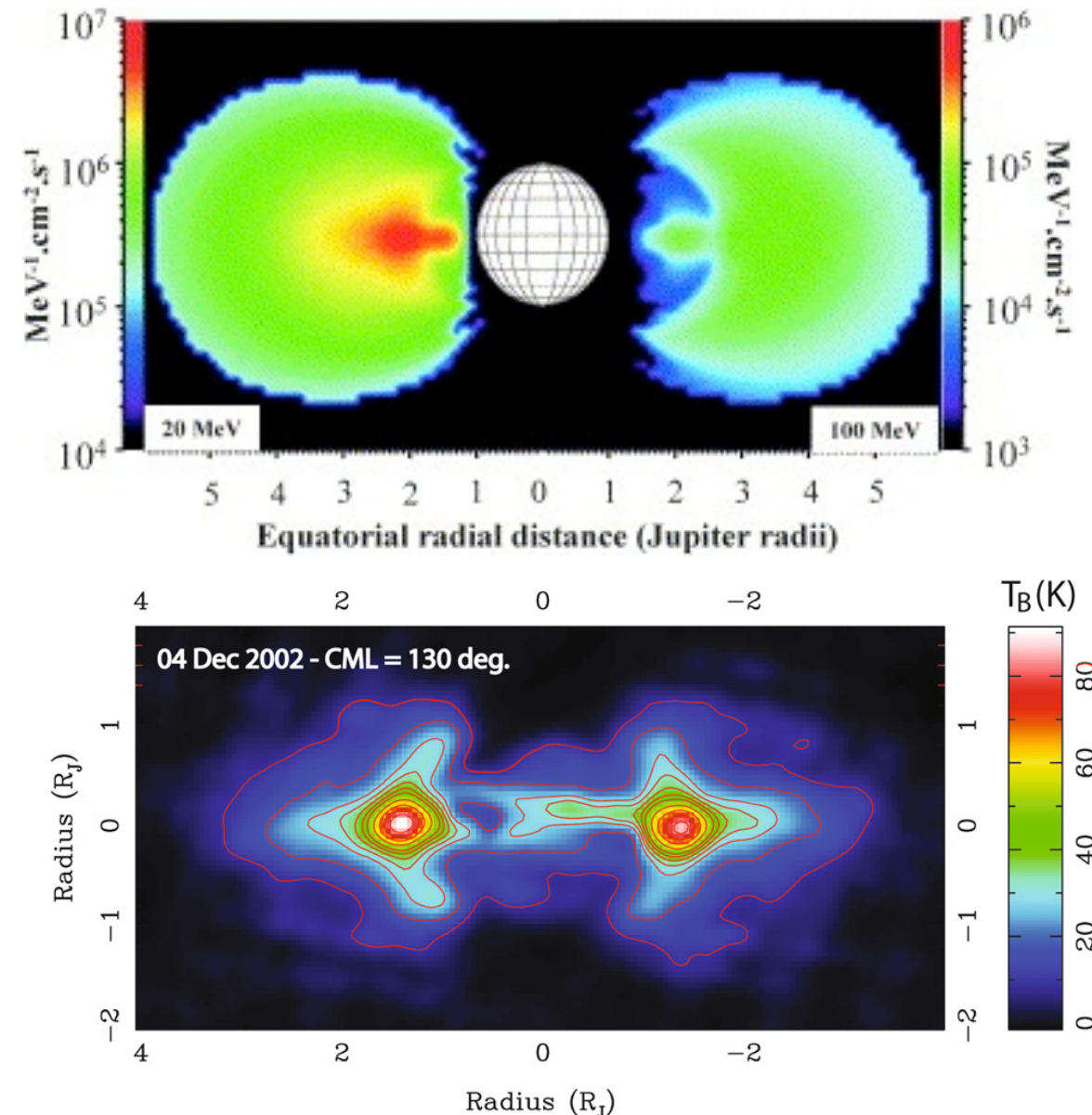
Diffusion radiale vers l'intérieur des particules du courant annulaire sous l'effet de δB par ex. dû à des ondes (violation du 3^{ème} invariant adiabatique)



Terre

FIG. 1.20. Earth's radiation belts. The top panel shows the contours of the omnidirectional flux (particles per square centimeter per second) of protons with energies greater than 10 MeV. The bottom panel shows the contours of the omnidirectional flux of electrons with energies greater than 0.5 MeV.

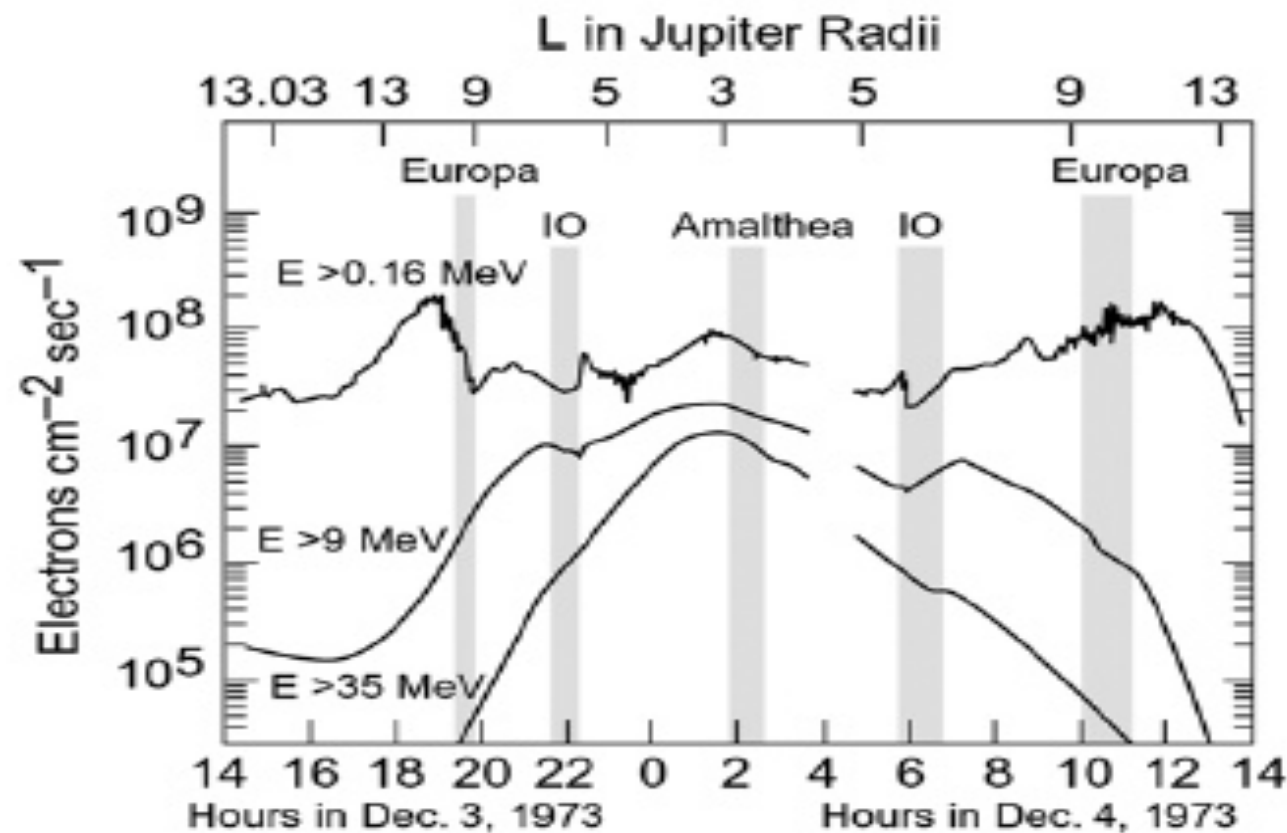
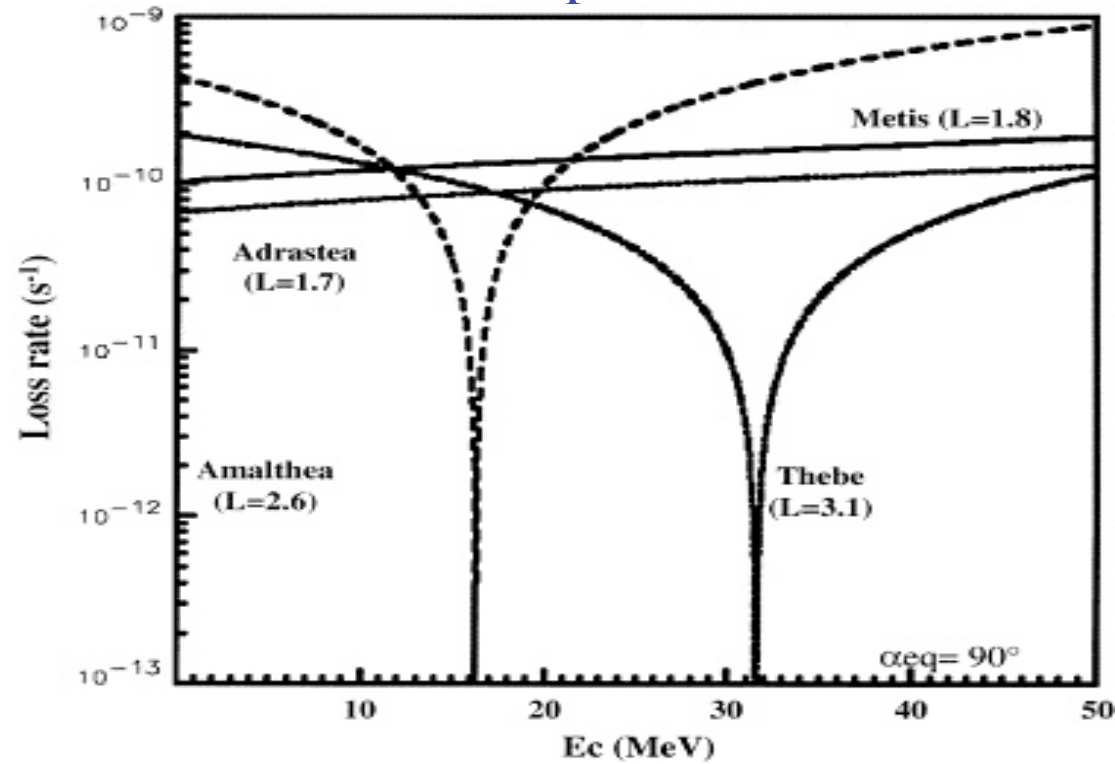
A Jupiter, e^- de dizaines de MeV
⇒ rayonnement synchrotron



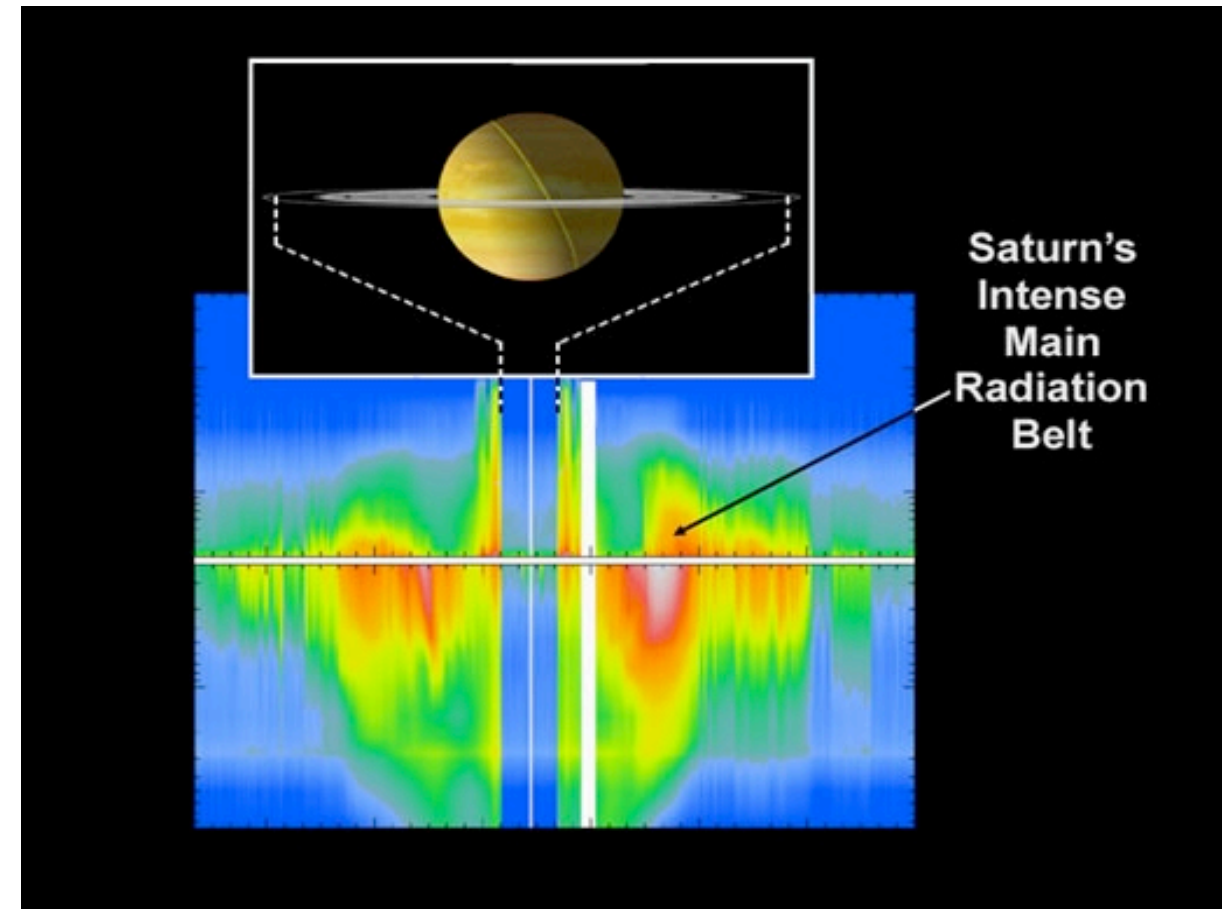
5.3 Puits (pertes)

- Absorption par lunes & anneaux

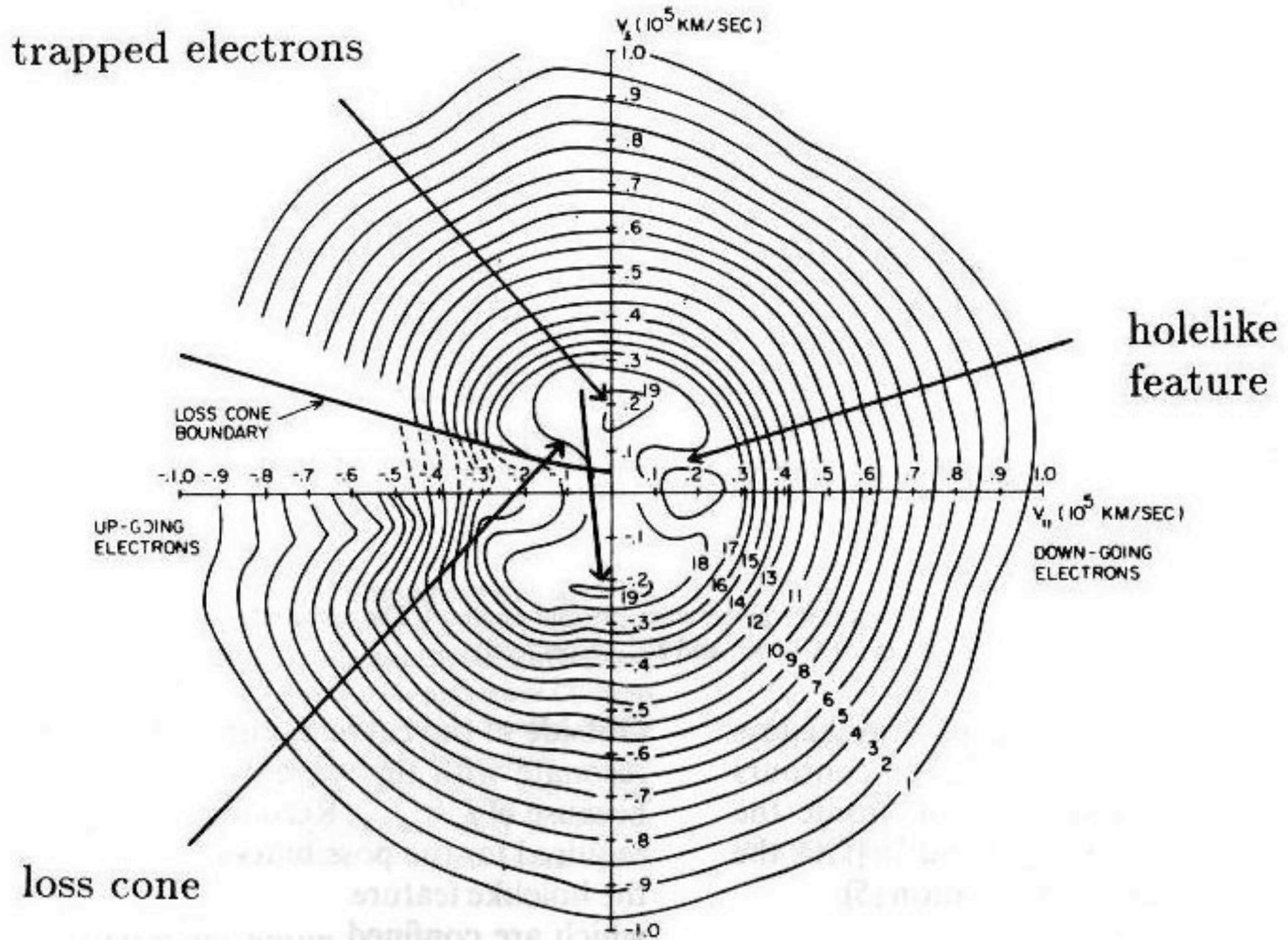
Jupiter



Saturne



- Interactions ondes-particules (ex: whistlers) : $\delta E, \delta B \rightarrow$ diffusion dans le « cône de perte » atmosphérique $\rightarrow$ aurores

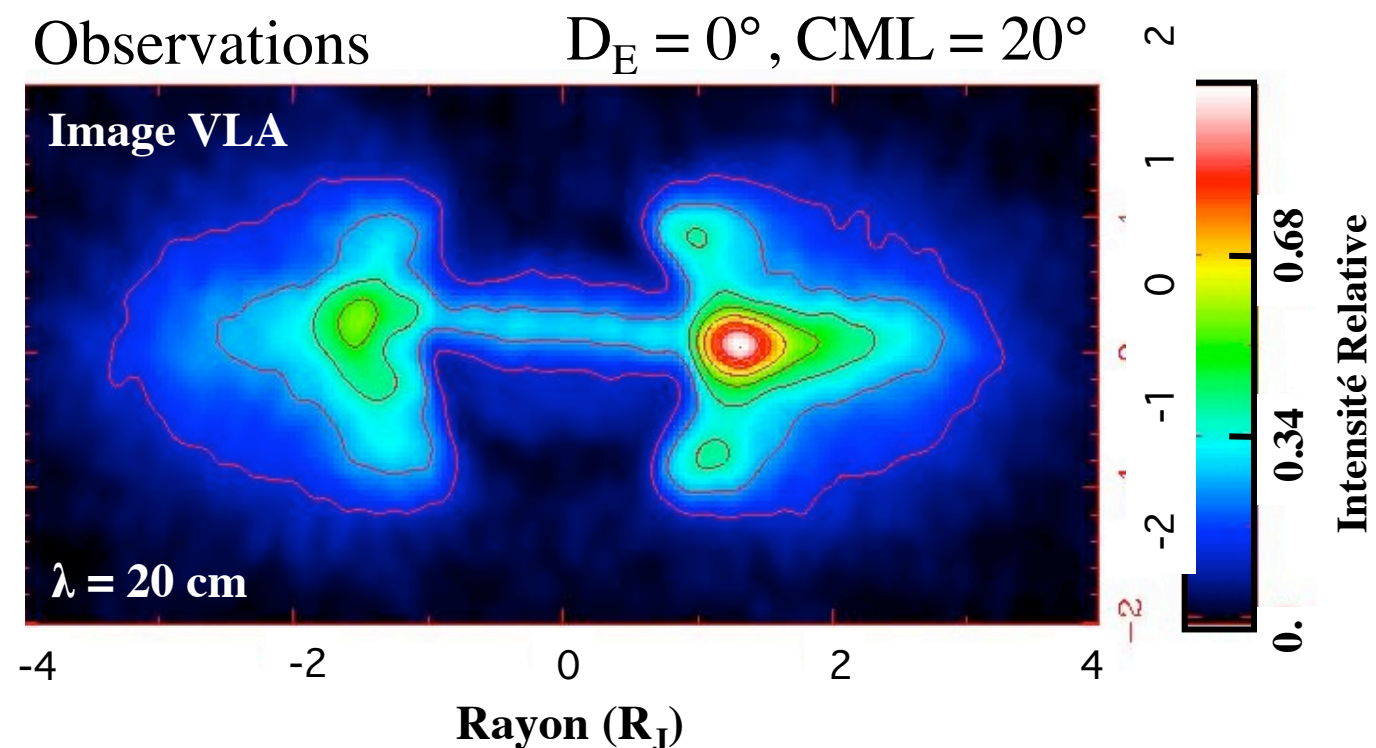
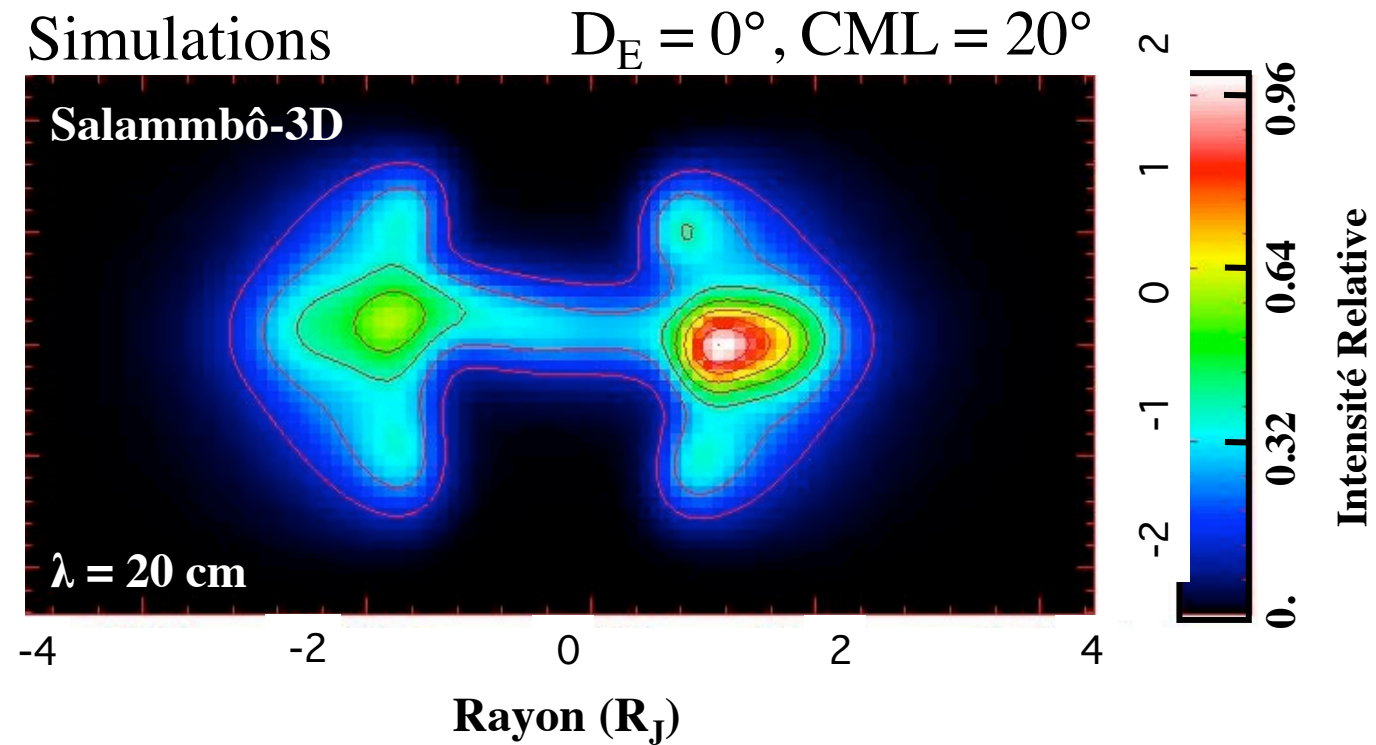


- Pertes synchrotron (Jupiter) :

Rayonnement incohérent d'électrons énergétiques (~ 10 MeV), de <100 MHz à qq GHz

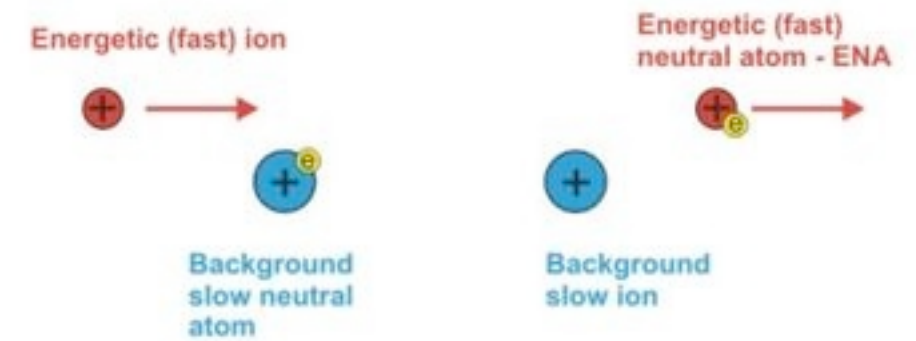
Emission maximum à l'équateur (population piégée) et près des pôles (points miroir)

→ contraintes sur la topologie de **B**,



- Échange de charge :
ion énergétique + H (géocouronne ou haute atmosphère planétaire) $\rightarrow$ H⁺ + ENA

Charge Exchange Collisions

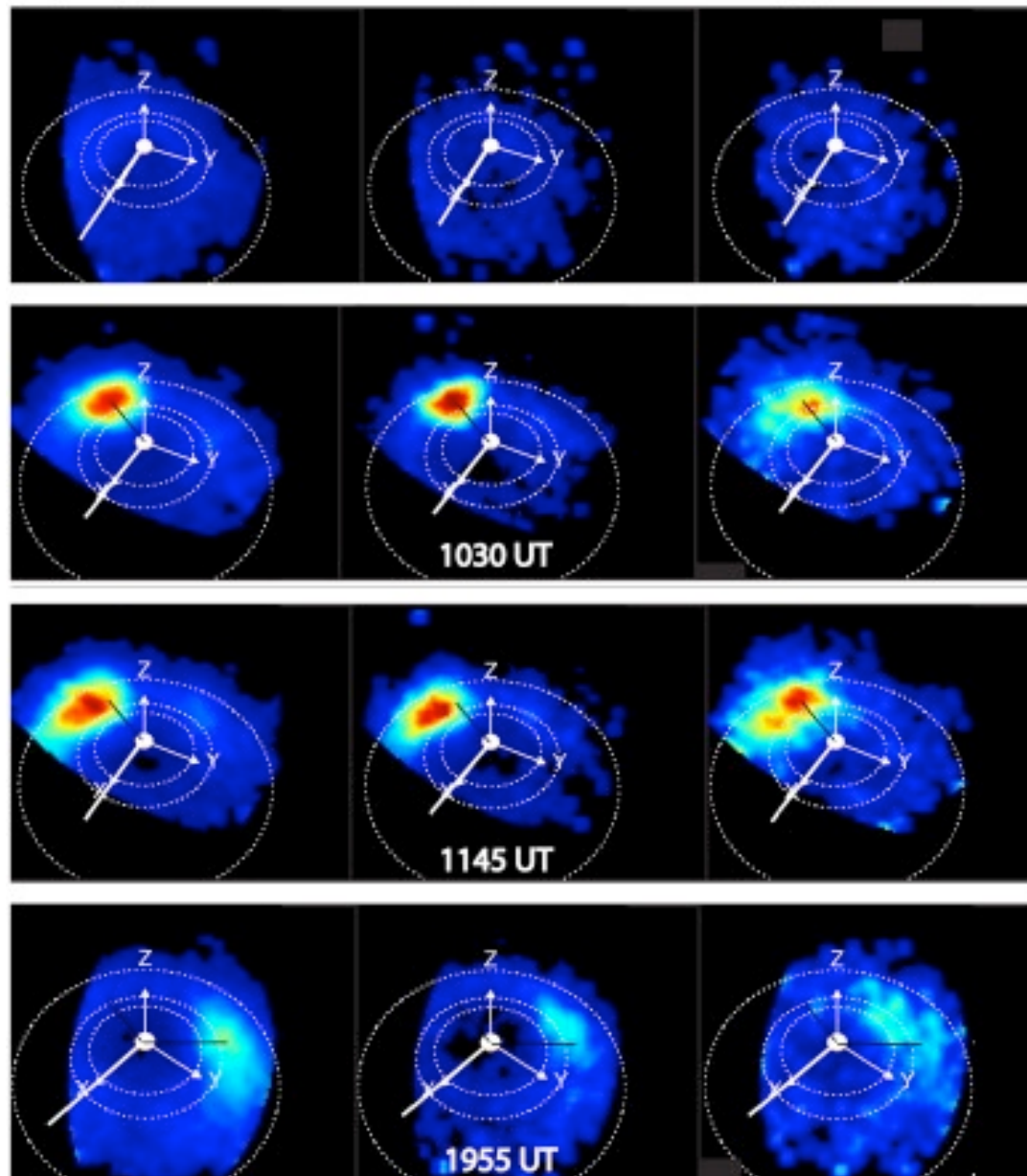


Day 129, 2008 (First Intensification at 0945 UT)

Hydrogen 20-50 keV

Hydrogen 50-80 keV

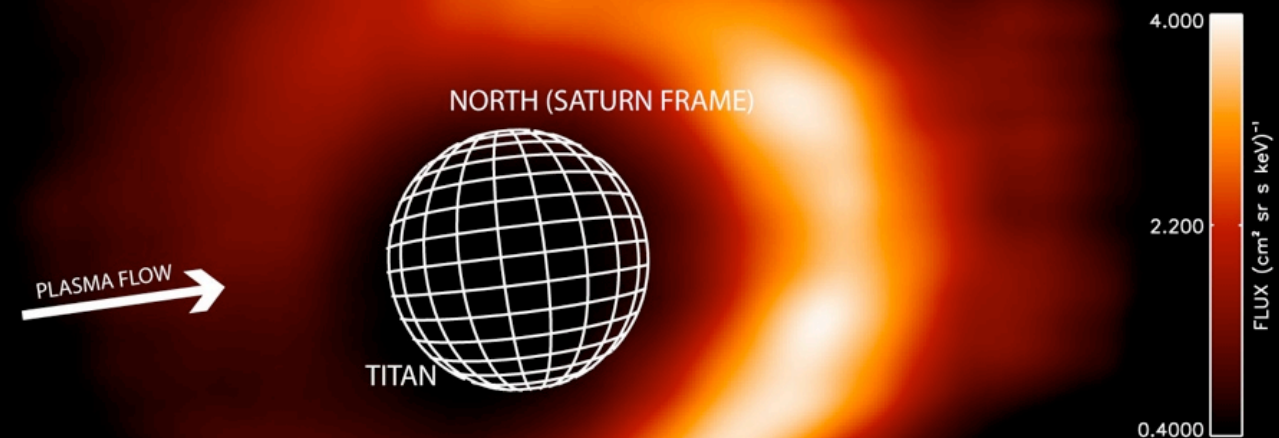
Oxygen 64-144 keV



ENERGETIC IONS IMPACTING TITAN'S ATMOSPHERE

15:01-15:09 UTC 30 October 2004

Hydrogen 20-50 keV



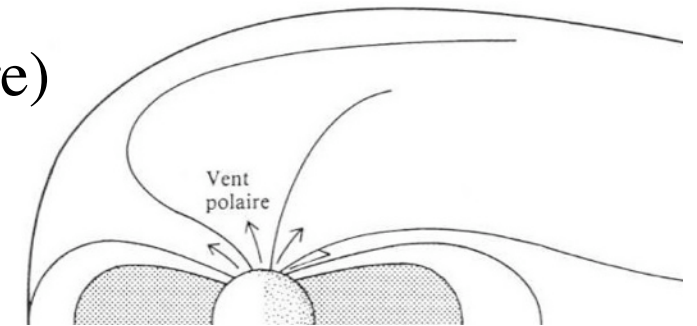
MIMI/INCA Team
JOHNS HOPKINS
UNIVERSITY
Applied Physics Laboratory

Titan is immersed in a flow of plasma moving at approximately 200 km/s. The plasma flows left to right in the image. The energetic ions of the plasma flow have gyro radii larger than Titan itself, which leads to the counter-intuitive intensification of ENA emissions on the trailing side of Titan. The strongest ENA emissions are located at about 2500 km altitude.

5.4 Transport

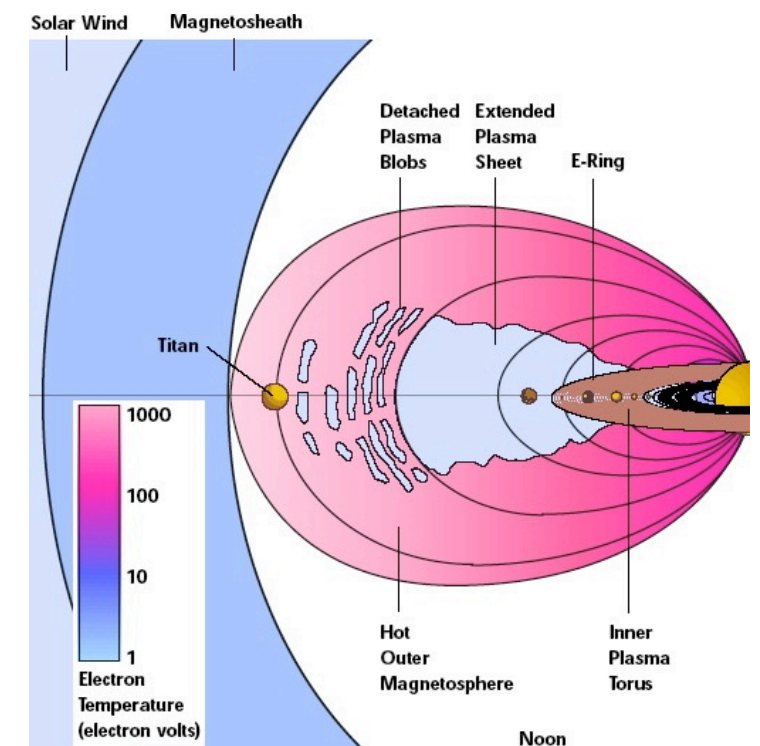
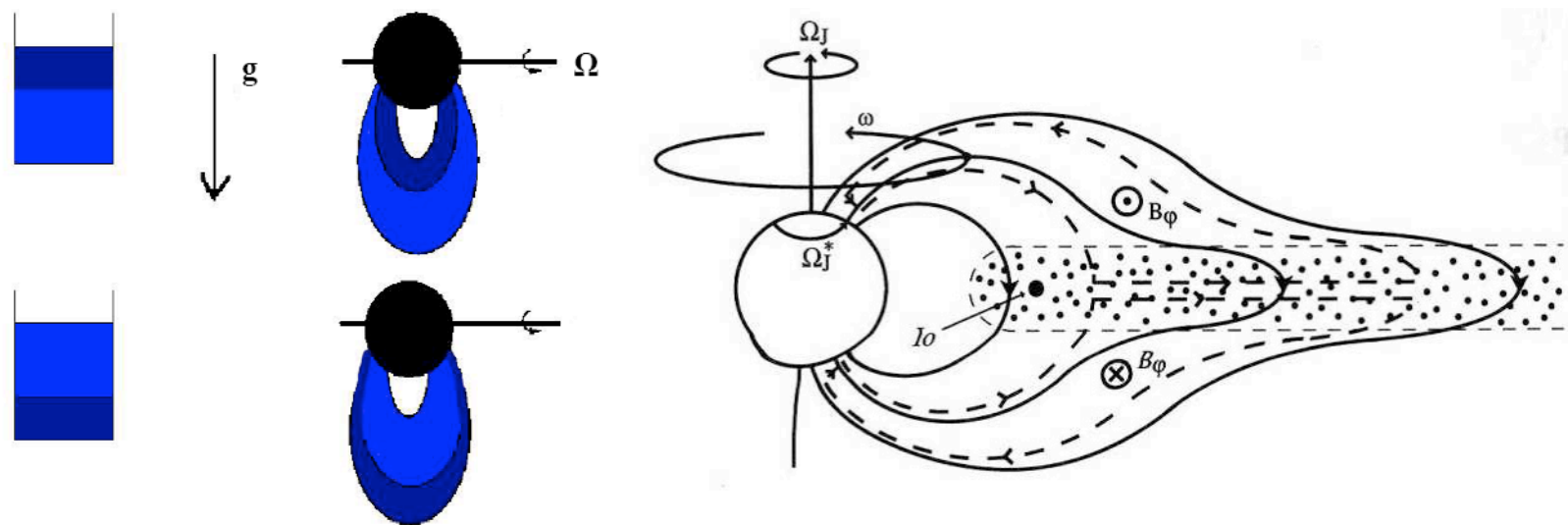
Transport parallèle à $\mathbf{B}$:

- $\lambda_m < 50^\circ\text{-}60^\circ$, sur lignes fermées : diffusion ambipolaire ionosphère $\rightarrow$ plasmasphère
- $50^\circ\text{-}60^\circ < \lambda_m < 70^\circ\text{-}75^\circ$: lignes alternativement fermées / ouvertes $\rightarrow$ échanges MS externe - vent solaire
- $\lambda_m > 70^\circ\text{-}75^\circ$: lignes ouvertes : calotte & vent polaire (effet de tuyère)

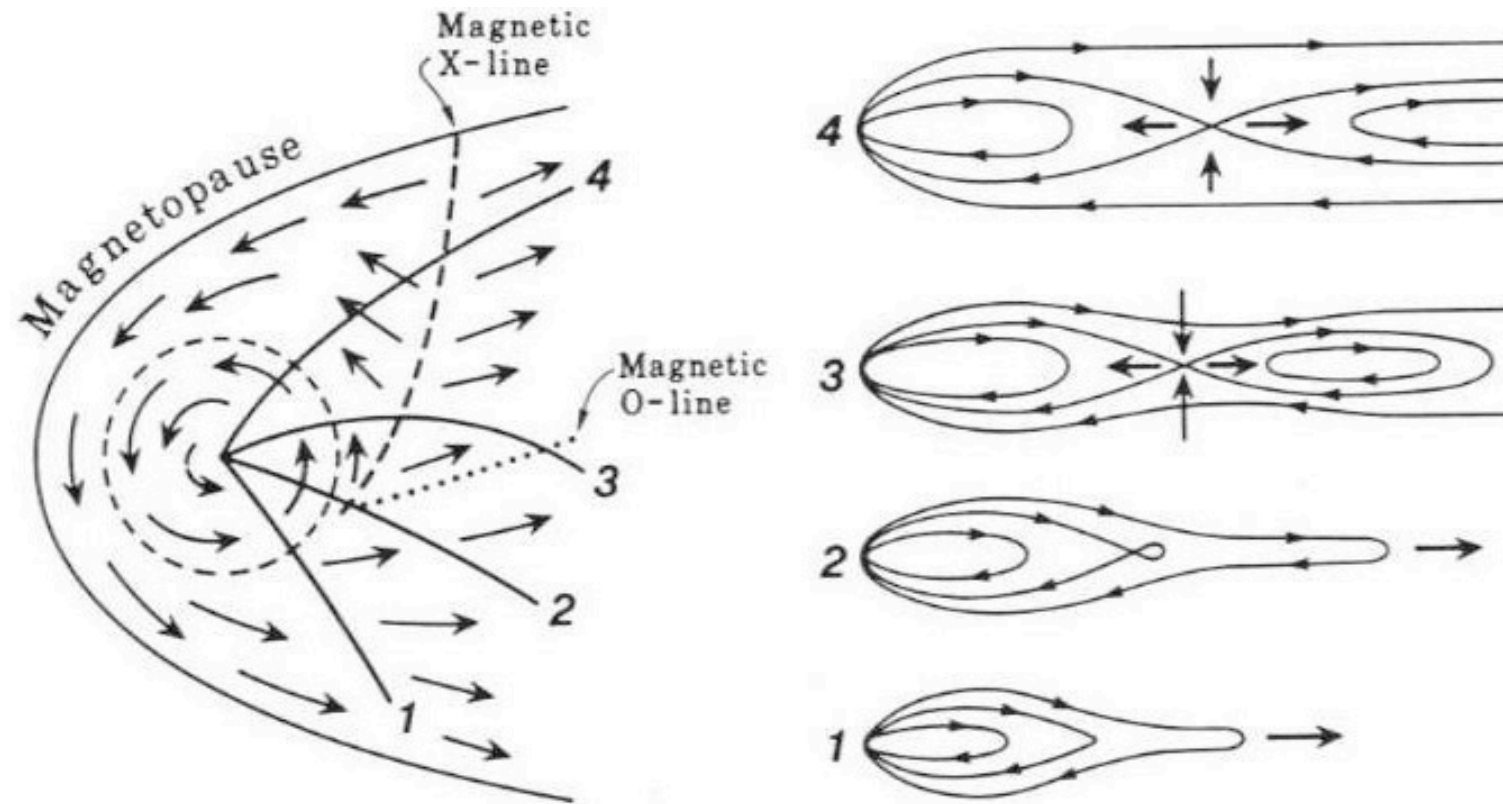


Transport perpendiculaire à $\mathbf{B}$ vers l'extérieur

- Echange de charge ion énergétique + neutre $\rightarrow$ ENA $\rightarrow$ + échange de charge dans la MS externe $\rightarrow$ transport des ions énergétiques
- Interchange de tubes de flux (« tombent vers l'extérieur », se vident dans la MS externe) = instabilité du tore de plasma / des disques de courant et éjections de matière vers l'extérieur...



- Transport radial du plasma à Jupiter par instabilité d'interchange
 ⇒ Circulation & reconnexion contrôlées par la rotation = cycle de Vasyliunas (= variante du cycle de Dungey contrôlé par la rotation)
 ⇒ Formation de point X et de plasmoïde par étirement dû à la force centrifuge



- Circulation à Saturne intermédiaire entre Terre & Jupiter ? (influence du Vent Solaire sur l'activité aurorale)

Transport perpendiculaire à **B** vers l'intérieur

- Diffusion $\perp$ sous l'effet de la pression du plasma + chaud dans la MS externe
- δE aléatoires (turbulence, vents thermosphériques $\Rightarrow \delta V \Rightarrow \delta E = \delta V \times B$)
- Convection à grande échelle suite à compressions MS (« orages » magnétosphériques)

5.5 Accélération, Chauffage

A l'énergie de corotation

- « Pick-up » des ions nouvellement créés: corotation $\Rightarrow$ gain de vitesse $\Omega \times R - V_K$ ($= 56 \text{ km/s}$ dans le cas de Io) pour le mouvement d'ensemble & le mouvement de giration / B
(gain total d'énergie $\sim 2 \times$ l'énergie de corotation : 250-500 eV pour les ions, 0.02 eV pour les e-)

A une énergie $\gg$ corotation

- Transport $\perp$ vers l'intérieur $\Rightarrow$ compression $\sim$ adiabatique $\Rightarrow$ chauffage bêtatron & Fermi

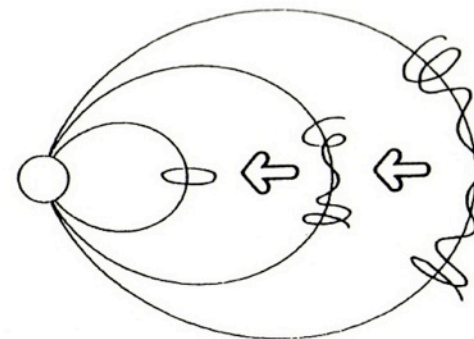
Bêtatron : conservation du 1^{er} invariant $\Rightarrow v_{\perp}^2 \propto B \propto R^{-3}$

Fermi : conservation du 2^{ème} invariant $\Rightarrow v_{\parallel} \propto l^{-1} \Rightarrow v_{\parallel}^2 \propto l^{-2} \propto R^{-2}$

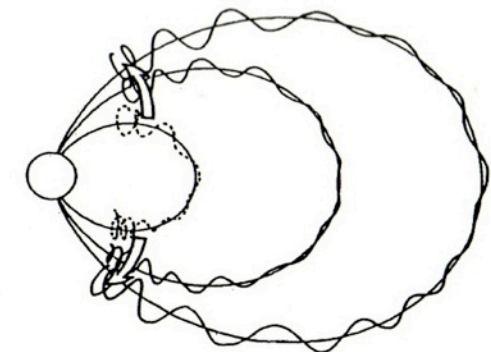
Si une diffusion en angle d'attaque (v, B) isotropise le chauffage $\Rightarrow E \propto v^2 \propto R^{-8/3}$

- « Recirculation » possible des particules $\Rightarrow$ cycles d'accélération successifs $\Rightarrow$ accélération au MeV en quelques dizaines d'heures pour la Terre $\Rightarrow$ ceintures de radiation de la MS interne

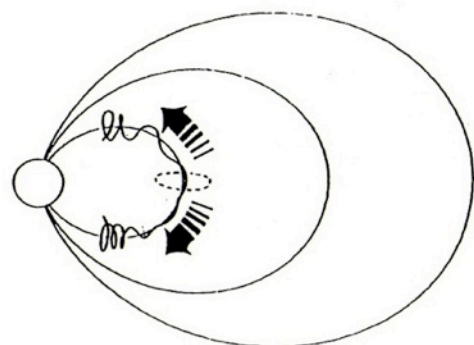
1) CLASSICAL RADIAL DIFFUSION



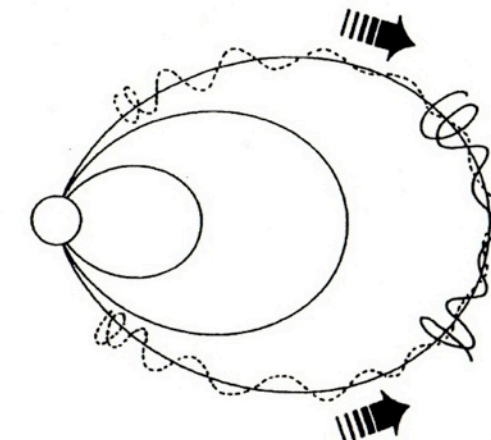
3) LOW ALTITUDE CROSS L DIFFUSION



2) PITCH ANGLE SCATTERING



4) ISOTROPIZATION



Processus rapides (non-adiabatiques) d'accélération (keV - 10s keV)

- Reconnection dans la queue à la ligne neutre:
 $B \sim 10 \text{ nT}, N \sim 0.1 \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \text{la reconnection libère } 2B^2/2\mu_0 N \sim 5 \text{ keV par particule}$
- Reconnection à la magnétopause diurne ?
- Compressions de la MS diurne externe/moyenne ? (*particulièrement efficace à Jupiter*)
- Interactions ondes-particules (ondes TBF, ondes d'Alfvén → $E_{\parallel}$ transitoires)
- $E_{\parallel}$ à grande échelle ? (stationnaires ?)

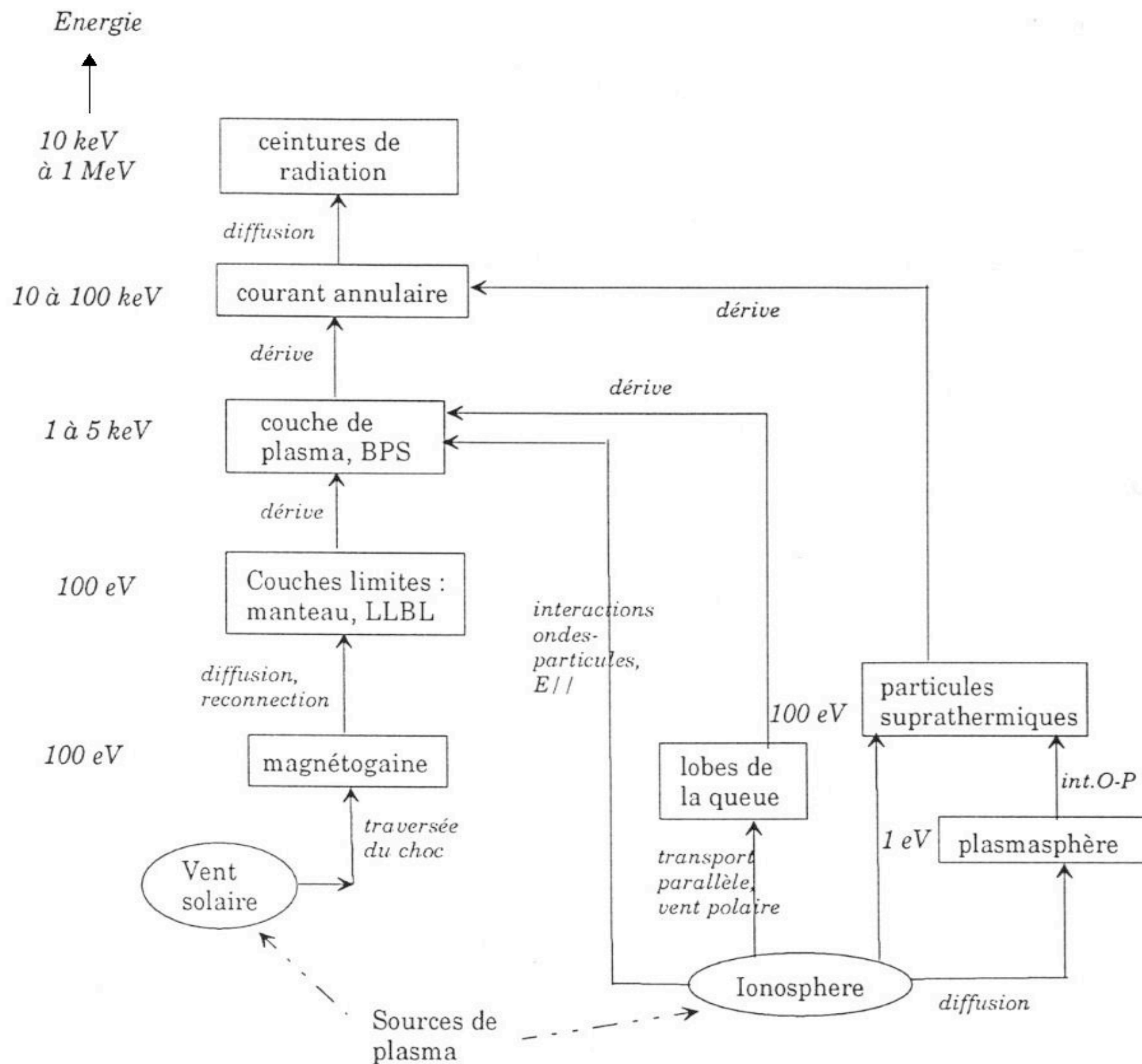


Schéma synoptique illustrant les mécanismes en jeu et le transport du plasma entre les différentes régions de la magnétosphère terrestre.

**Les planètes magnétisées :
de Mercure aux planètes géantes**

Philippe Zarka

*LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr*

6. Electrodynamique du système ionosphère-magnétosphère-vent solaire

6.1 Dynamo et courants ionosphériques

6.2 L'électrojet auroral

6.3 Générateurs et courants magnétosphériques

6.4 Courants dans la magnétosphère de Jupiter

- Equations de continuité / constituant :

$$\partial N_i / \partial t + \nabla \cdot N_i \mathbf{V}_i = Q_i - L_i$$

$$\begin{aligned}
 e \times [(\Sigma \text{ions}) - e^-] &\rightarrow \partial(\Sigma e N_i - N_e) / \partial t + \nabla \cdot (\Sigma N_i e \mathbf{V}_i - N_e e \mathbf{V}_e) = \Sigma Q_i - Q_e + L_e - \Sigma L_i \\
 &\rightarrow \partial \rho_c / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (\text{quasi-neutralité} \rightarrow \partial \rho_c / \partial t = 0 \text{ dans la MS}) \\
 &\rightarrow \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \\
 &\rightarrow \text{les courants forment des circuits fermés}
 \end{aligned}$$

- Conductivités intégrées :

A l'échelle de la MS, l'ionosphère ~ plaque conductrice ∞^t mince

→ E horizontaux ~ indépendants de z

→ on intègre les courants horizontaux sur l'épaisseur de l'ionosphère

→ conductivités intégrées : $\Sigma_{P,H} = \int_{\text{ionosphère}} \sigma_{P,H} dz$ (avec $\Sigma_H \gg \Sigma_P$)

6.1 Dynamo et courants ionosphériques

$$\int \mathbf{j} \, dz = \Sigma_{//} \mathbf{E}'_{//} + \Sigma_P \mathbf{E}'_{\perp} + \Sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{E}'_{\perp} \quad \text{dans le repère de l'atmosphère neutre}$$

($\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{V}_n \times \mathbf{B}$, $\mathbf{V}_n$ = vitesse du vent neutre)

- Dans la couche D (<90 km), plasma-neutres fortement couplés (collisions $\uparrow \uparrow$) $\rightarrow \mathbf{j} = 0$
- Dans la couche E (90-130 km) : e- gelés / B, ions couplés aux neutres (entraînement par collisions) $\rightarrow$ mouvement différentiel $\rightarrow$ courant $\mathbf{j}_{\perp}$ = **dynamo ionosphérique** (principale source de courant dans l'ionosphère)

Du fait de $\Sigma_H \gg \Sigma_P$ l'apparition d'un courant $\mathbf{j}_{\perp}$ induit $\mathbf{E}_{\perp} \sim \mathbf{j}_{\perp} / \Sigma_P$ qui induit $\mathbf{j}_H \sim \Sigma_H \mathbf{E}_{\perp}$ perpendiculaire $\mathbf{j}_{\perp}$ d'où création d'un vortex de $\mathbf{j}_{\perp}$ (où $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$)

$\mathbf{B}$ opposé dans les 2 hémisphères $\rightarrow$ les circuits de courants horizontaux s'organisent en 2 vortex, principalement côté jour (conductivité ionosphérique + faible de nuit)

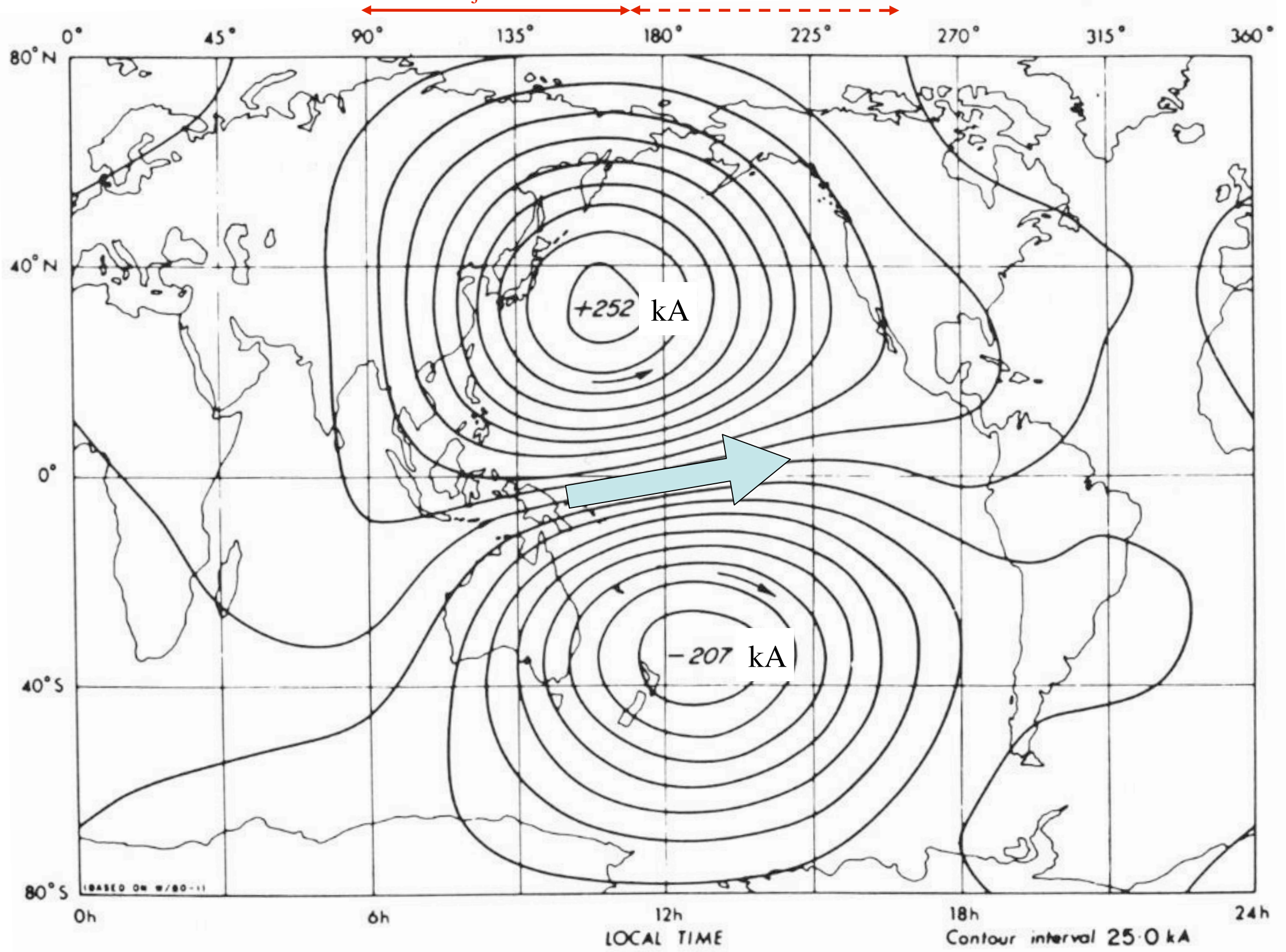
« électrojet équatorial » entre les 2 

$I_{\text{tot}} \sim 150 \text{ kA}$ / vortex (fonction de la saison, du cycle solaire) $\rightarrow \delta \mathbf{B}$ au sol

$\Phi_{\text{jour-nuit}} \sim 5 \text{ kV}$

$\sigma_{//}$ élevée $\rightarrow$ court circuité $\Phi_{//} \rightarrow \mathbf{j}_{//}$ s'écoulent entre les 2 hémisphères pour symétriser les $\Phi_{\perp}$ (et les circuits de $\mathbf{j}_{\perp}$)

$\Phi_{\text{jour-nuit}}$



6.2 L'électrojet auroral

- Ionisation par précipitations, chauffage joule
→ $\Sigma_{P,H}$ (ionosphère aurorale) élevées, surtout côté nuit (précipitations $\geq \text{keV}$)
(faible conductivité sur la calotte polaire)

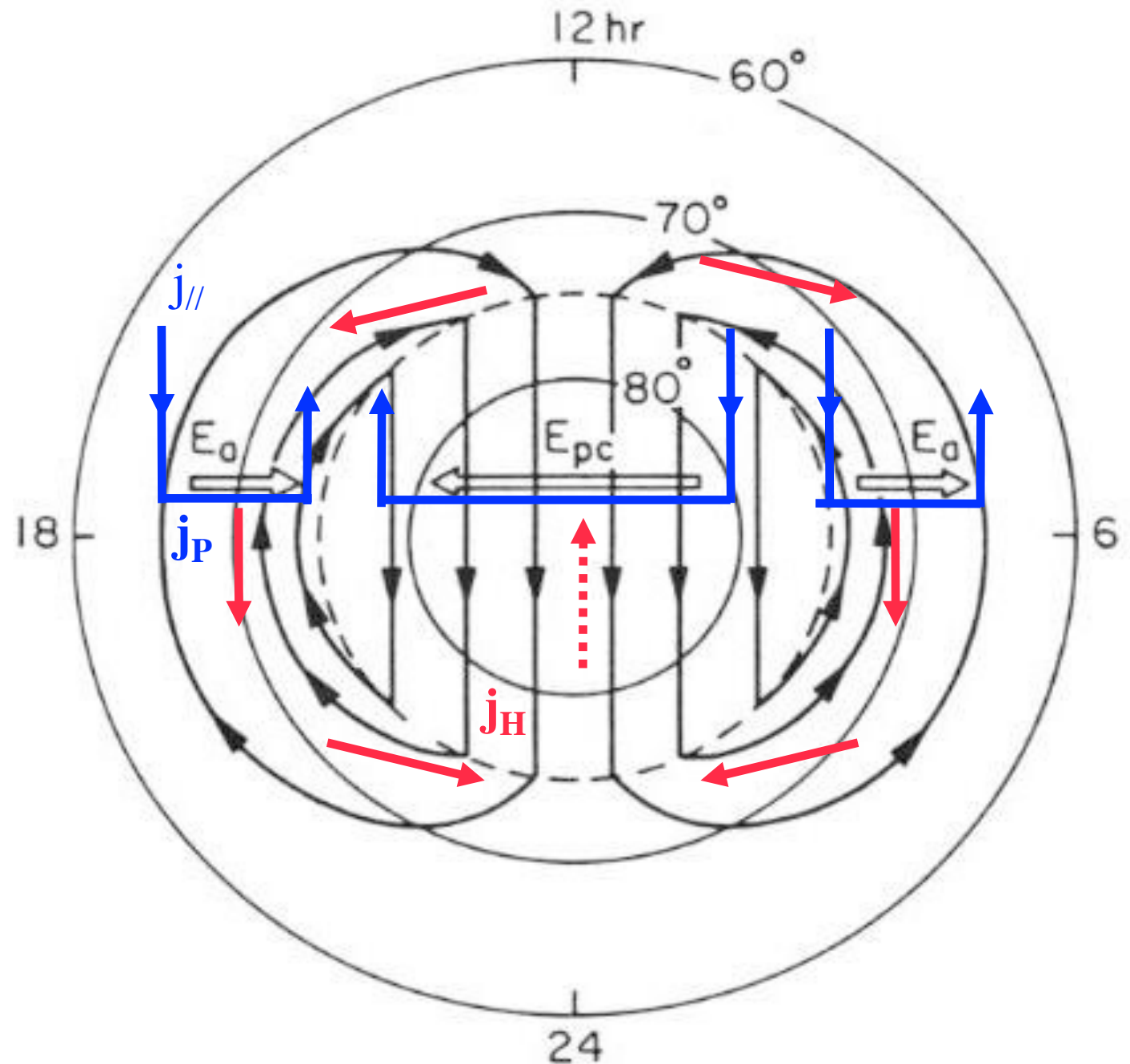
$$E_{\text{conv}}(\text{ionosphère}) = -E_{\text{conv}}(\text{MS})$$

→ vers le pôle à 18h TL

→ vers l'équateur à 06h TL

- $\Sigma_H \gg \Sigma_P \rightarrow$ courants de Hall ionosphériques ($\perp$ à $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$) = électrojets auroraux

alimentés par $j_{\parallel}$ sur les bords polaire et équatorial de l'ovale auroral (cf. 6.3)



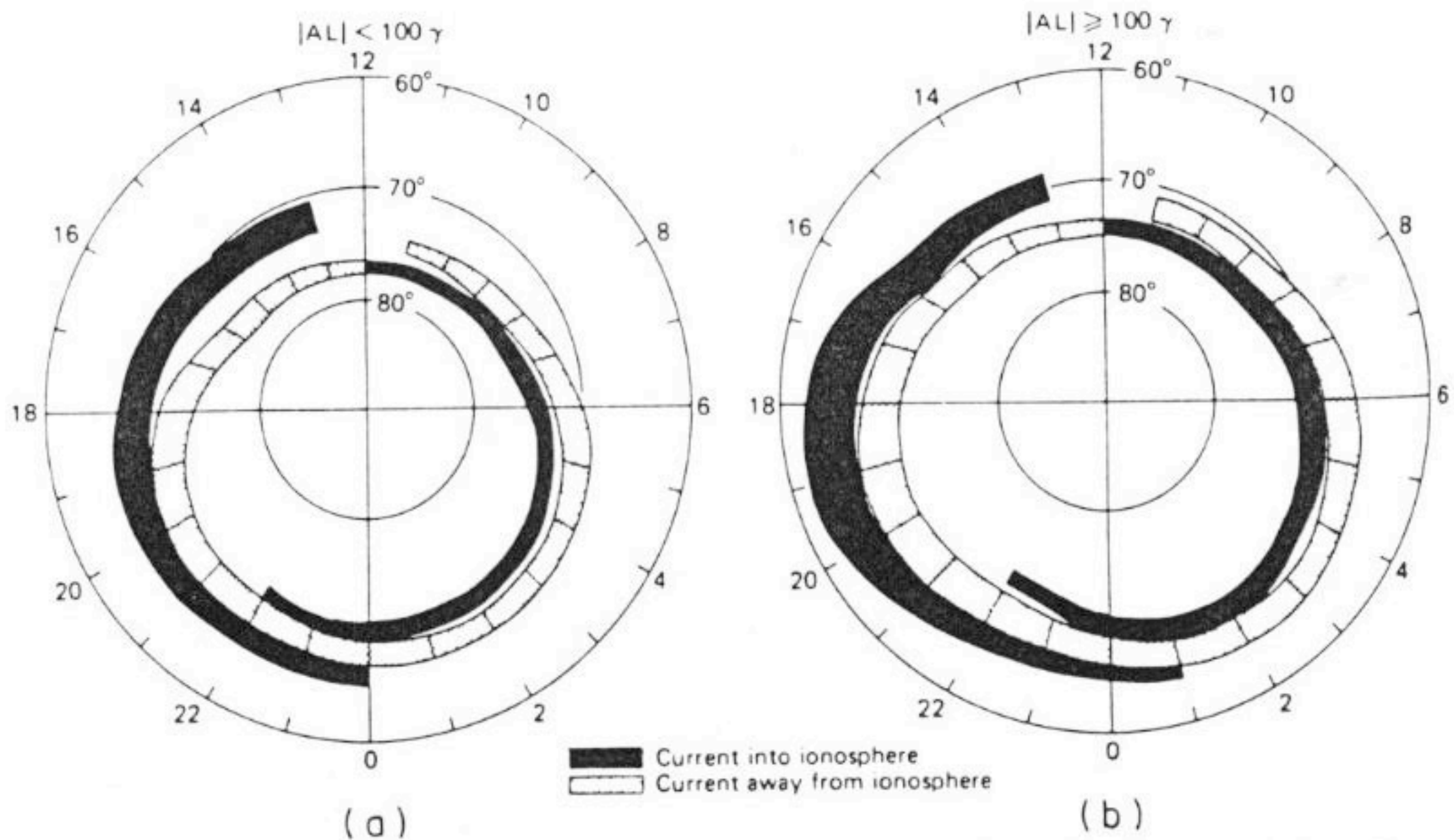


Fig. 6.23. Two overlapping rings of field-aligned currents always exist at high latitudes. They occur at higher latitudes and have smaller latitudinal extent during quiet times. The inner ring is termed region 1 current and the outer ring region 2. [After Iijima and Potemra (1978). Reproduced with permission of the American Geophysical Union.]

6.3 Générateurs et courants magnétosphériques

- $\sigma_{//}$ élevée $\rightarrow$ court circuité $\Phi_{//} \rightarrow \Phi_{\perp}(\text{IS}) = \Phi_{\perp}(\text{MS})$
- Bilan d'un circuit de courant MS $\longleftrightarrow$ IS : $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$
 - $\rightarrow \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j} \, d\tau = 0 \rightarrow \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j} \, d\mathbf{S} \times d\mathbf{s} = 0 \rightarrow \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j} / B \, ds = 0$
avec $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \rightarrow \mathbf{B} \times d\mathbf{S} = \text{cte le long d'une ligne de champ}$
 - $\rightarrow \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{\perp} / B \, dS + \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{//} / B \, ds = 0$

Dans la magnétosphère : $\mathbf{j}_{\perp} = 0$

Dans l'ionosphère (couche dynamo) : $\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\perp}$ ($\mathbf{j}_{//} = 0$)

$$\rightarrow \int_{\text{ionosphère}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{\perp} / B \, ds = - \int_{\text{magnétosphère}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{//} / B \, ds$$

$$\text{avec } \nabla \cdot \mathbf{j}_{//} = \nabla \cdot (j_{//} \mathbf{B} / B) = \mathbf{B} \cdot \nabla (j_{//} / B) + j_{//} / B \nabla \cdot \mathbf{B} = B \partial(j_{//} / B) / \partial s$$

$$\text{d'où } \int_{\text{ligne de B}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{//} / B \, ds = \int_{\text{ligne de B}} \partial(j_{//} / B) / \partial s \, ds = j_{//} / B$$

Pour un circuit ionosphère - magnétosphère, on a donc :

$$\rightarrow \int_{\text{ionosphère}} \nabla \cdot \mathbf{j}_{\perp} / B \, ds = - (j_{//} / B)_{\text{magnétosphère}}$$

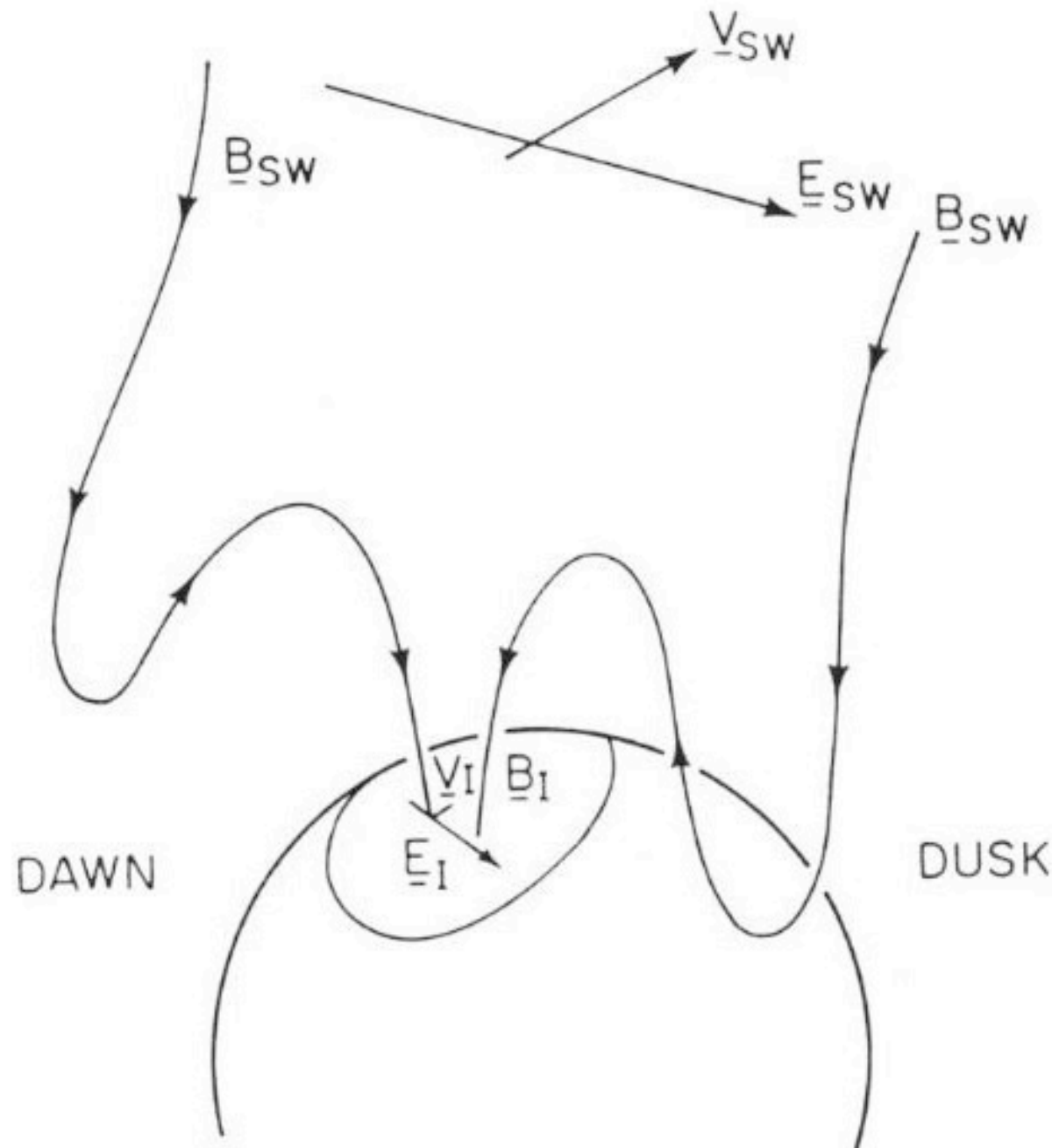
La divergence des courants ionosphériques est liée aux courants magnétosphériques.

- Sources de courant dans la MS :

→ Sur les lignes de B ouvertes :

Dynamo VS-MS : $\mathbf{V}_{VS} \times \mathbf{B}_{VS} \rightarrow \Phi_{\text{aube-crépuscule}} \ \& \ E_{\text{conv}} \rightarrow \mathbf{j}_{\perp} \rightarrow$ se referme dans l'ionosphère via $j_{\parallel}$ sur lignes ouvertes (courants dits de « **région 1** »)

→ haute latitude : frontière des lignes ouvertes/fermées = frontière de la calotte polaire.

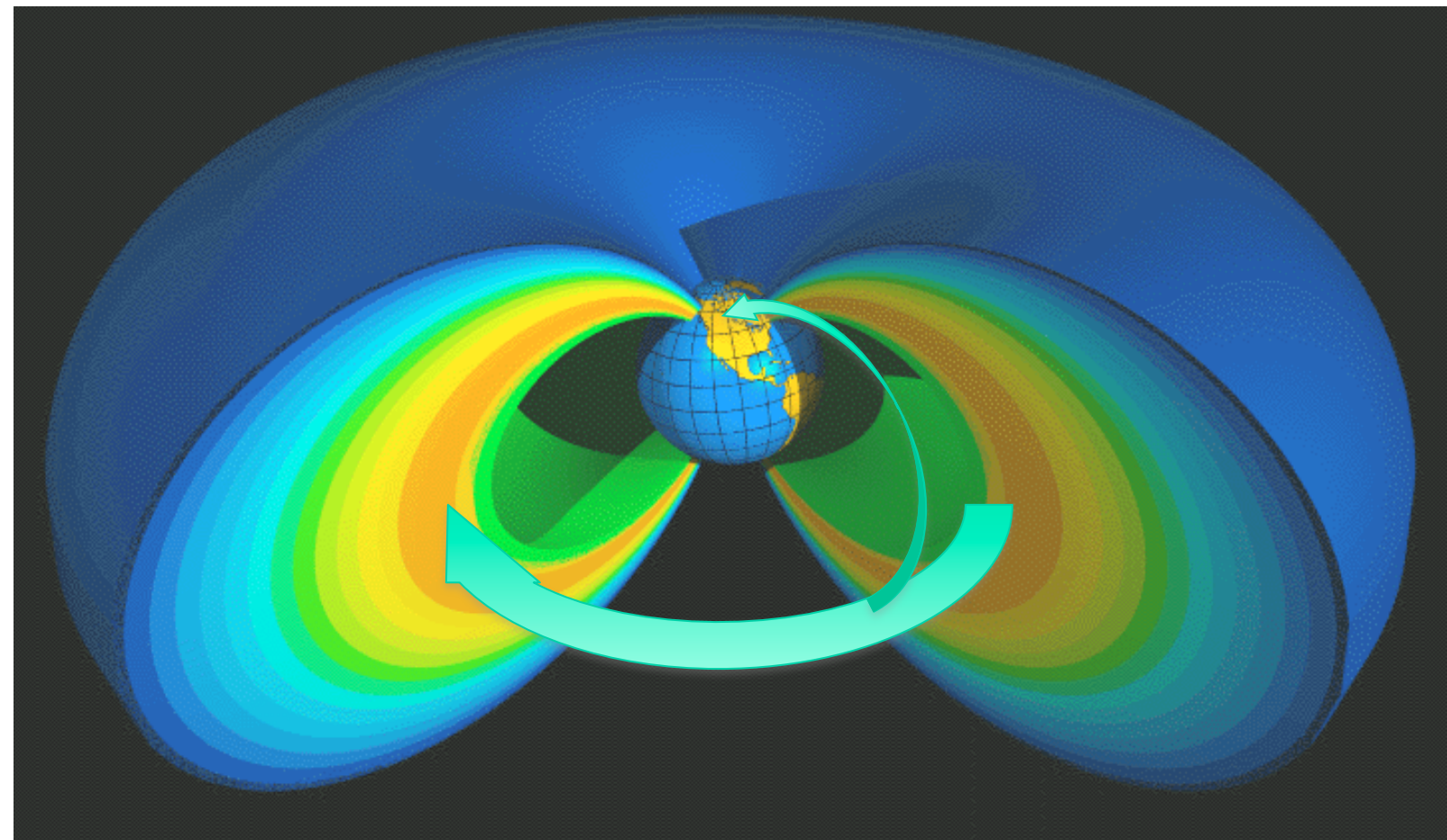
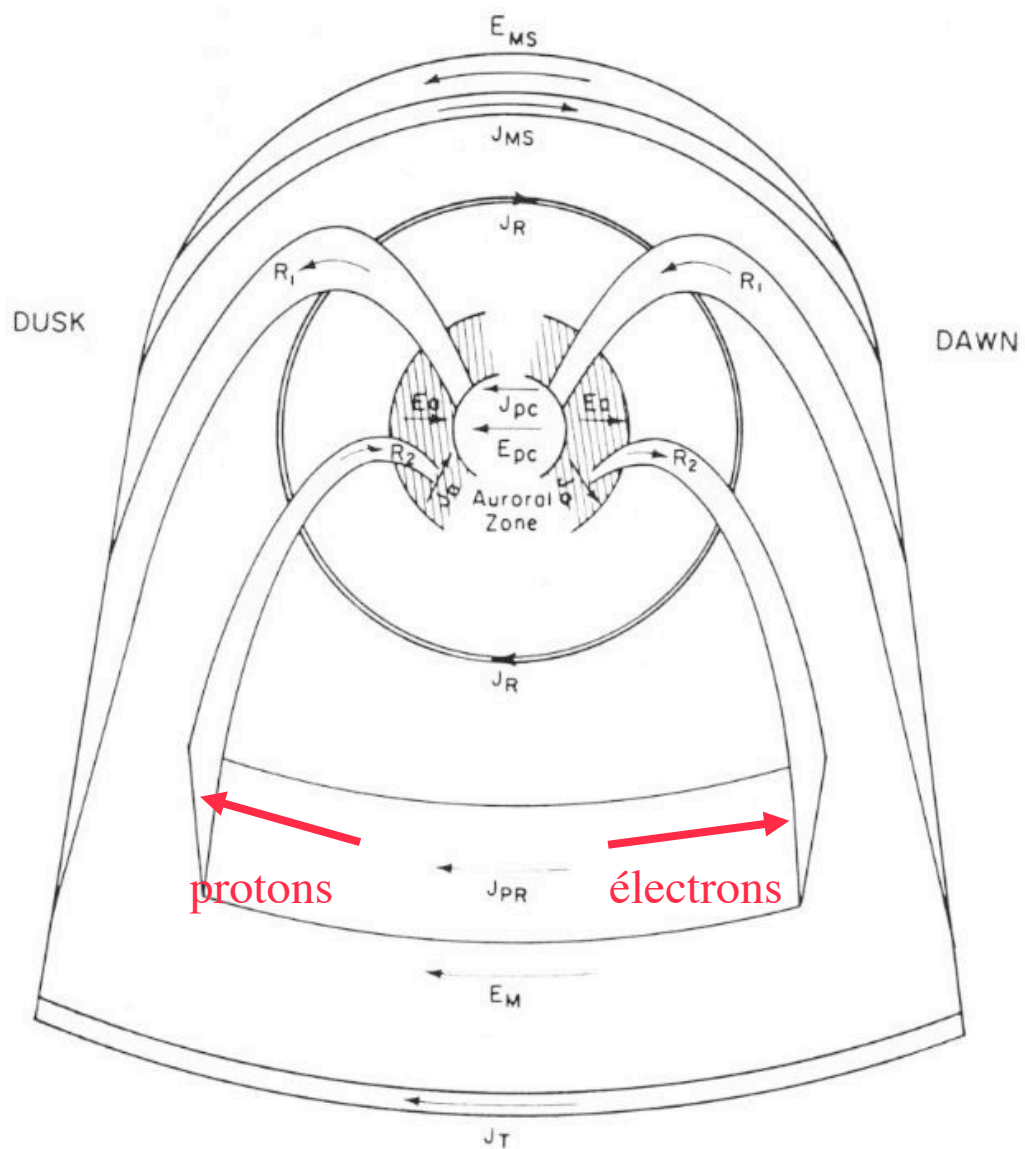


→ Sur les lignes de B fermées :

$\exists j_{\perp}$ (mouvement différentiel ions / e-), par ex. courant annulaire = boucle partielle côté nuit

→ se referme dans l'ionosphère matin & soir via des $j_{\parallel}$ (dits de « région 2 »)

→ plus basse latitude que région 1 & sens inverse



$\nabla \cdot \mathbf{j}_\perp$ ionosphérique associée au renversement de $\mathbf{E}_{conv}$ à la frontière de la calotte polaire :

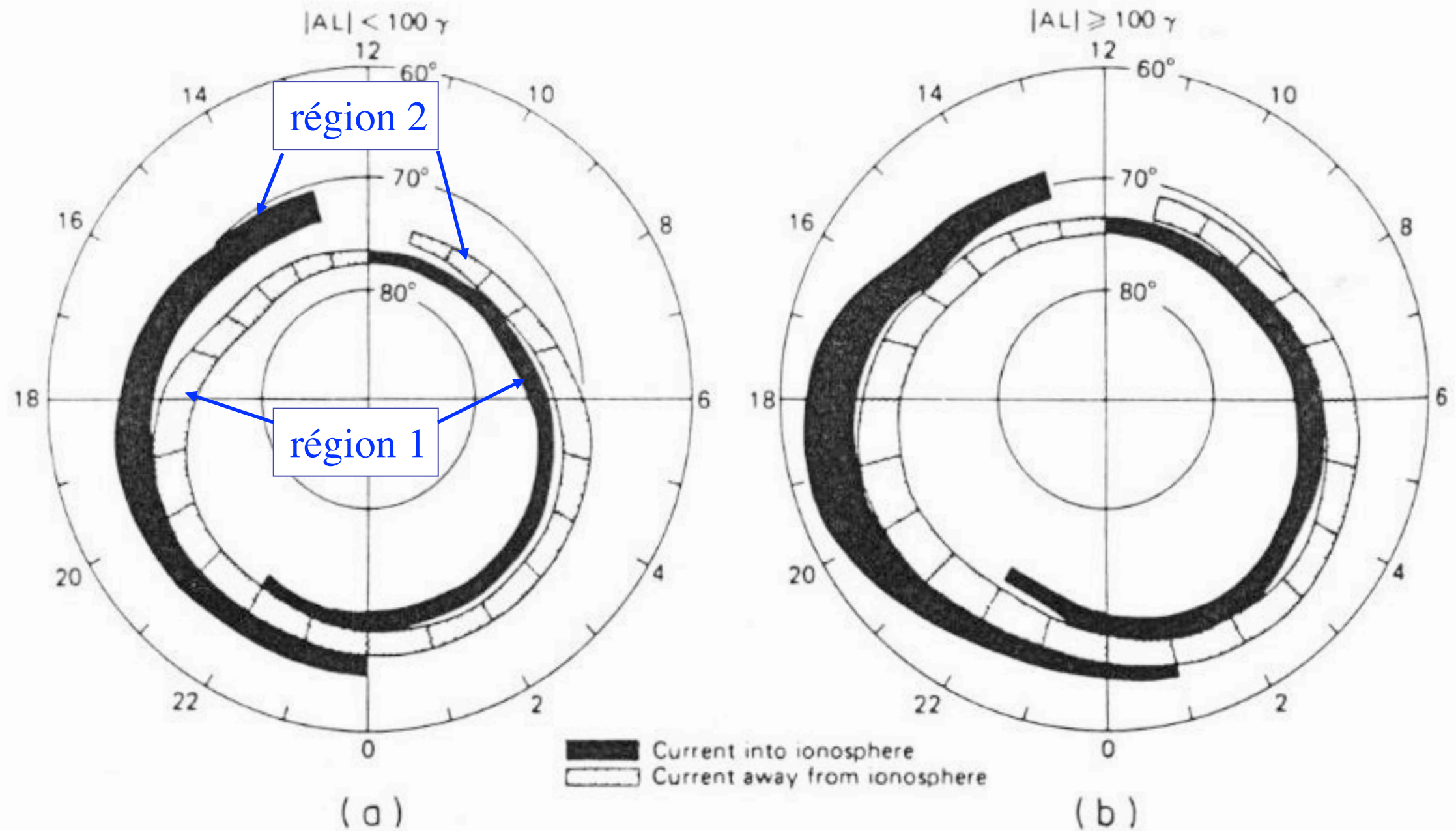
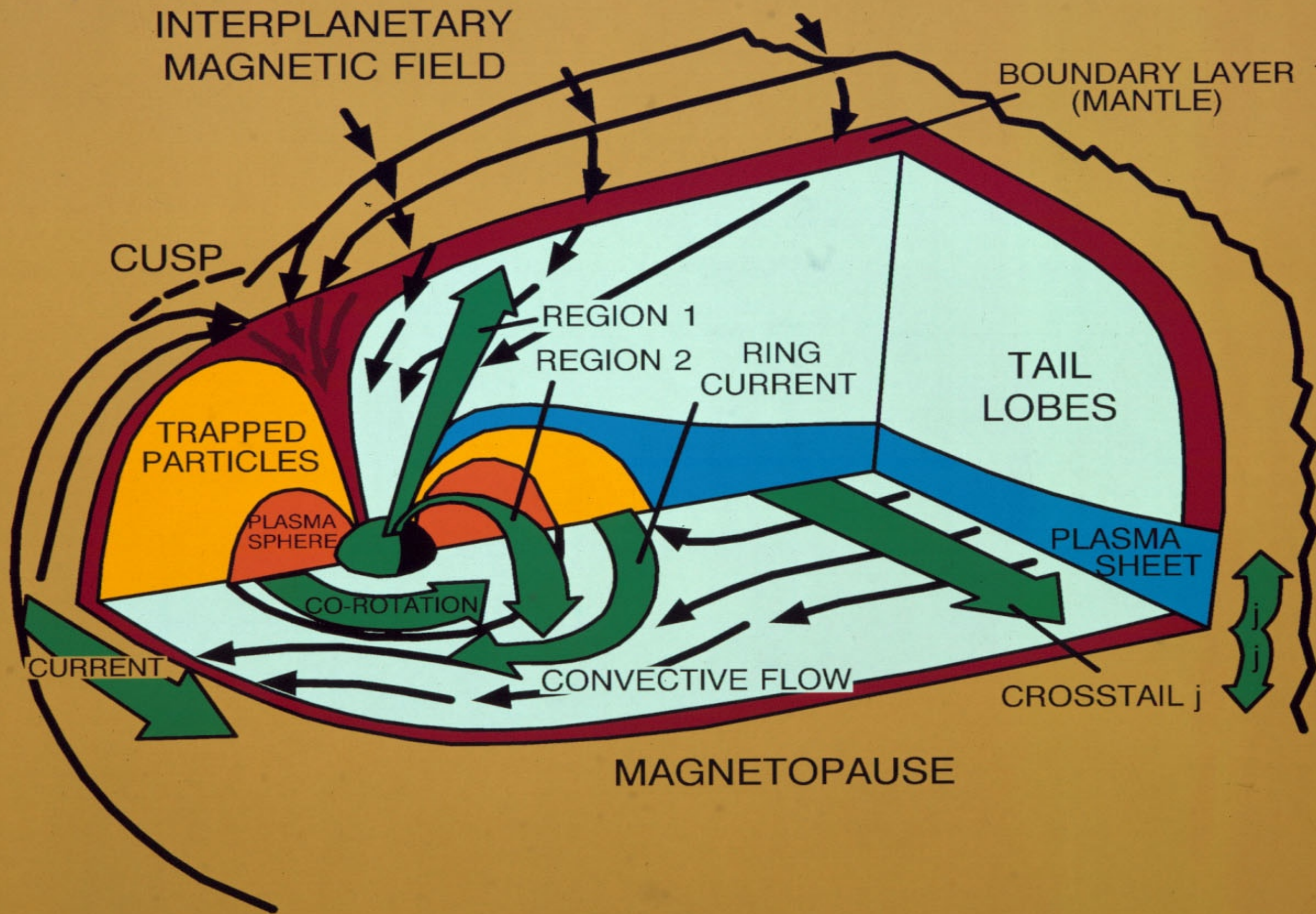


Fig. 6.23. Two overlapping rings of field-aligned currents always exist at high latitudes. They occur at higher latitudes and have smaller latitudinal extent during quiet times. The inner ring is termed region 1 current and the outer ring region 2. [After Iijima and Potemra (1978). Reproduced with permission of the American Geophysical Union.]

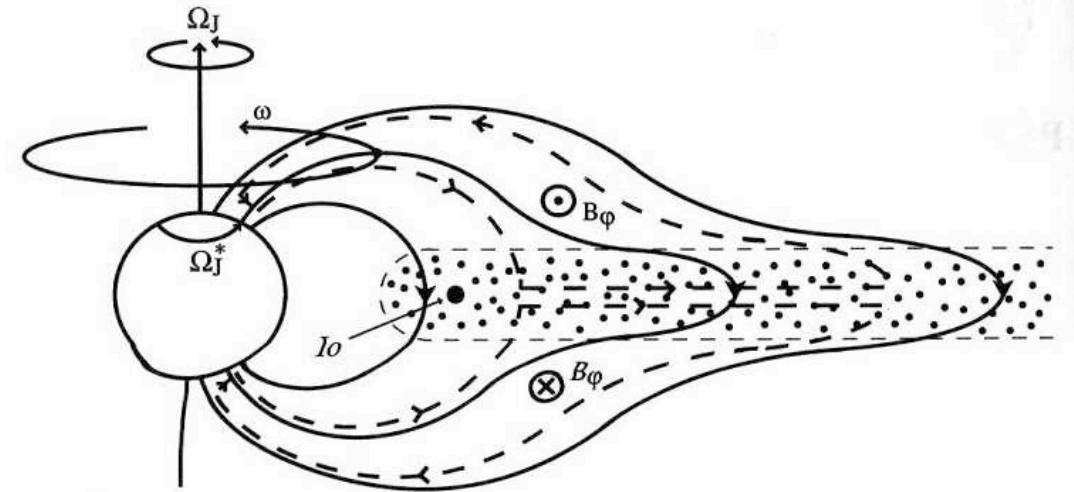


6.3 Courants dans la magnétosphère de Jupiter

Plasma injecté dans la magnétosphère interne, près de l'équateur à $V < \text{corotation}$

Diffusion / transport radial du plasma

sous l'effet de la force centrifuge $>$ gravitation (cf. 5.4)



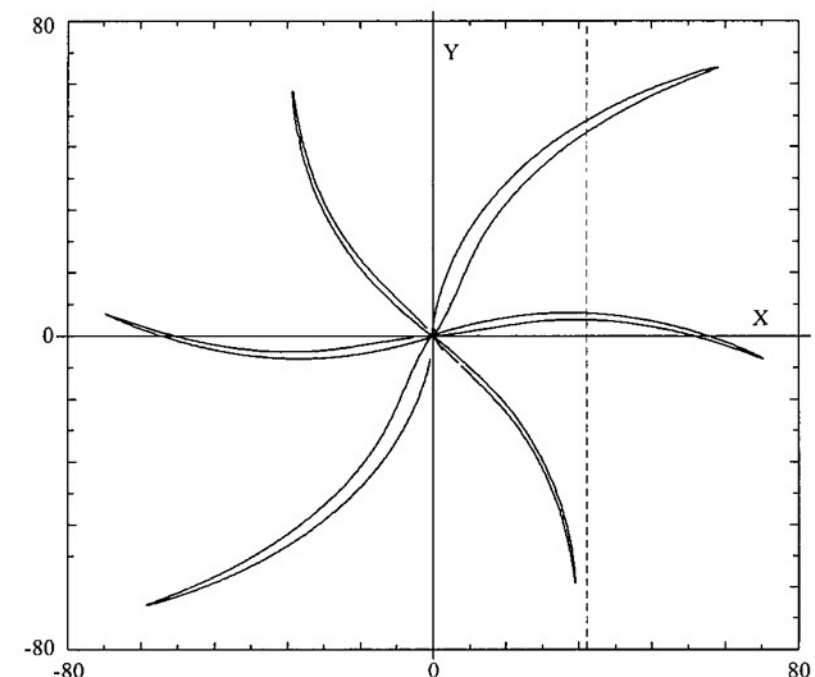
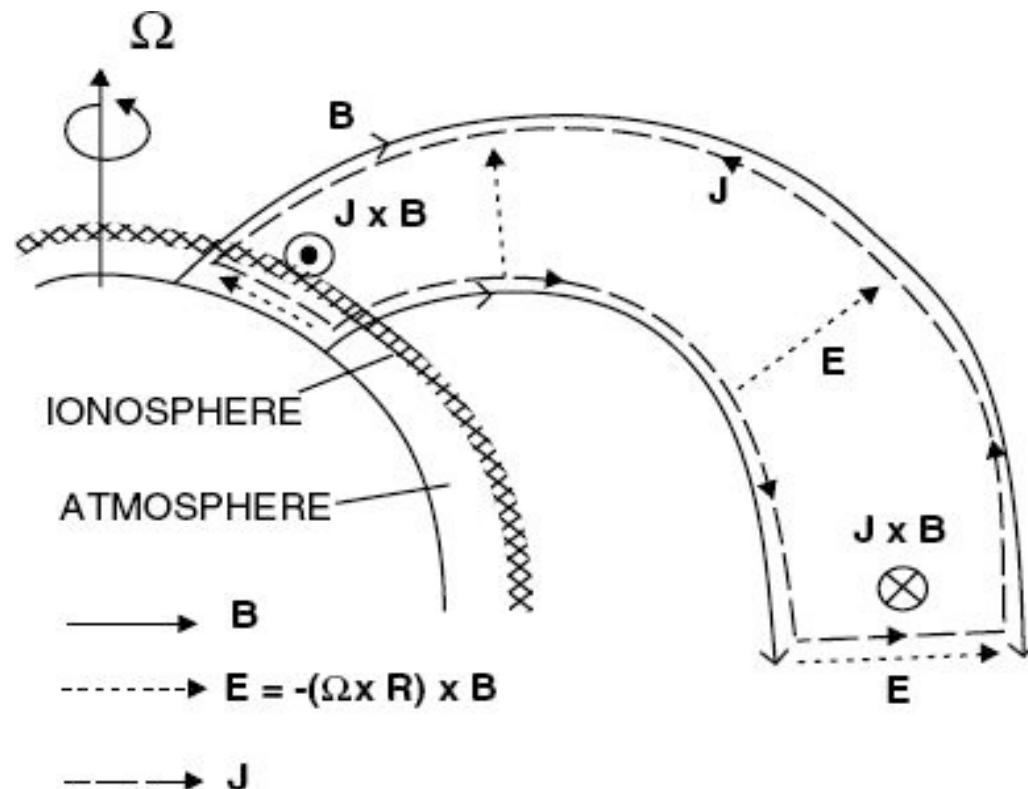
→ $\exists \mathbf{j}_r (= \mathbf{j}_{\perp m}) \ll \mathbf{j}_{\text{azimuthal}}$ du disque

→ accélération du plasma via $\mathbf{j}_{\perp m} \times \mathbf{B}_m$, ralentit le flot MS à $\sim 5\% < \text{corotation}$ (= « mass-loading »)

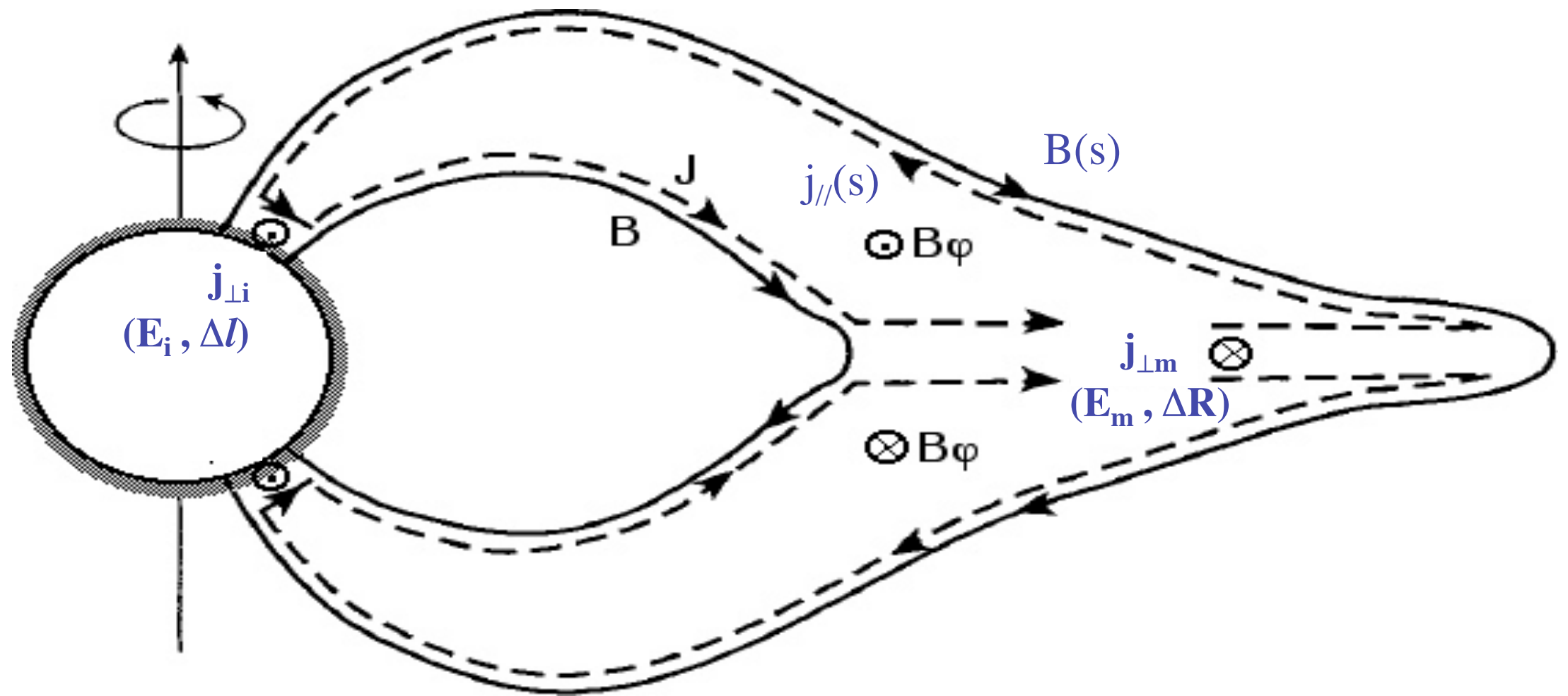
→ $\mathbf{j}_{\perp m}$ se referme dans l'ionosphère via $\mathbf{j}_{\parallel} \rightarrow \mathbf{j}_{\perp i}$

→ plasma ionosphérique ralenti par $\mathbf{j}_{\perp i} \times \mathbf{B}_i \rightarrow$ = transfert d'impulsion de IS vers MS

→ *gauchissement de la ligne de B ($\neq$ plan méridien)*



- Divergence des courants pour un circuit fermé simplifié IS-MS : $|\mathbf{j}_{\perp i} / B_i| = |\mathbf{j}_{\perp m} / B_m| = |\mathbf{j}_{//}(s) / B(s)|$



Diffusion radiale du plasma vers l'extérieur : $R \uparrow \rightarrow V_{\text{corotation}} (= \Omega \times R) \uparrow$

$\rightarrow$ la force accélératrice $\mathbf{j}_{\perp m} \times \mathbf{B}_m$ doit $\uparrow$, et $B_m \downarrow \rightarrow \mathbf{j}_{\perp m} \uparrow \uparrow$

$\rightarrow \mathbf{j}_{\perp i} = \mathbf{j}_{\perp m} B_i / B_m \sim \mathbf{j}_{\perp m} \times 2R^3 \quad \uparrow \uparrow \text{ avec } R$

$\mathbf{j}_{\perp i} \sim \sigma_P \mathbf{E}_i$ (le terme de Hall n'intervient pas pour cette géométrie de circuit)

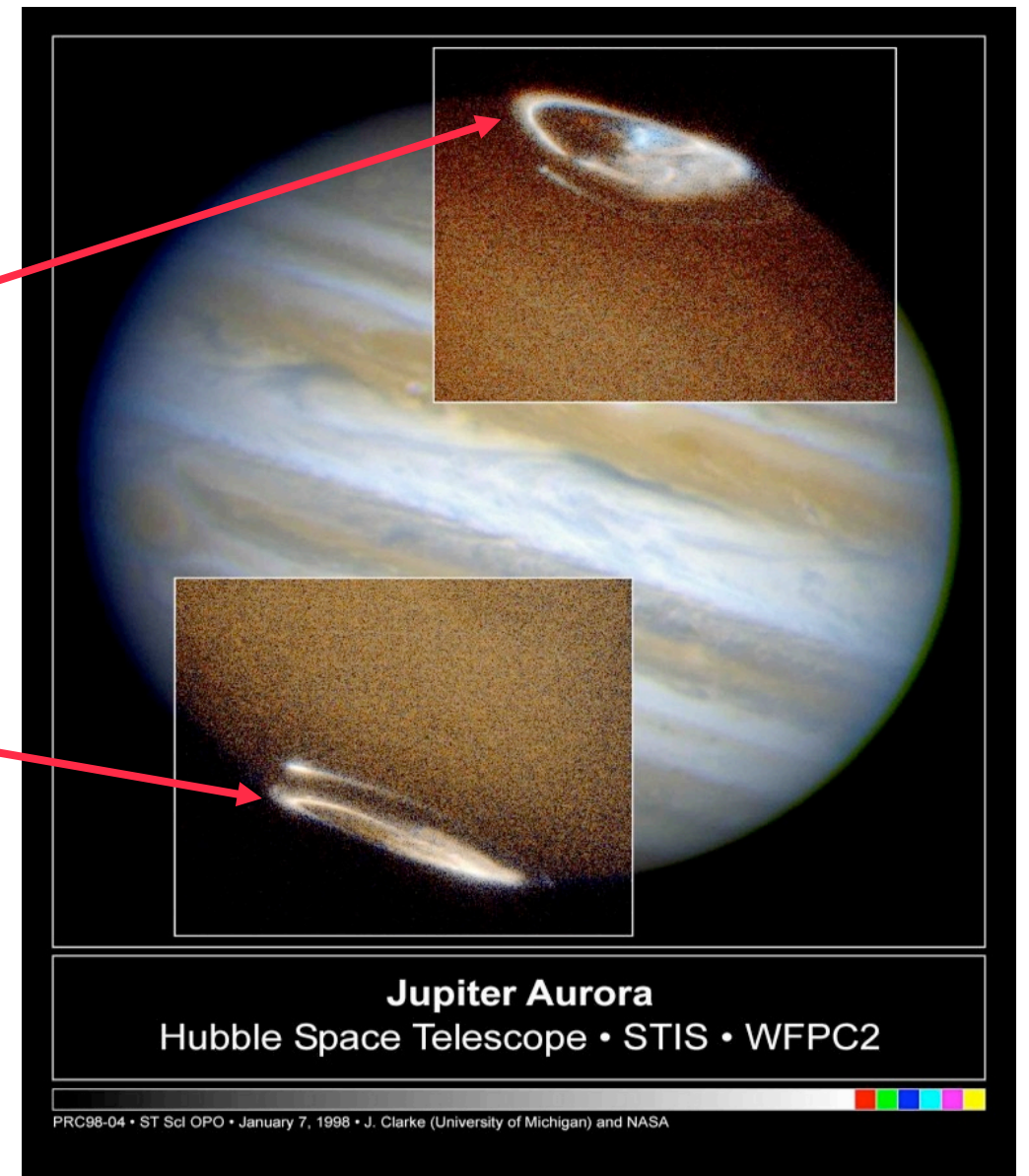
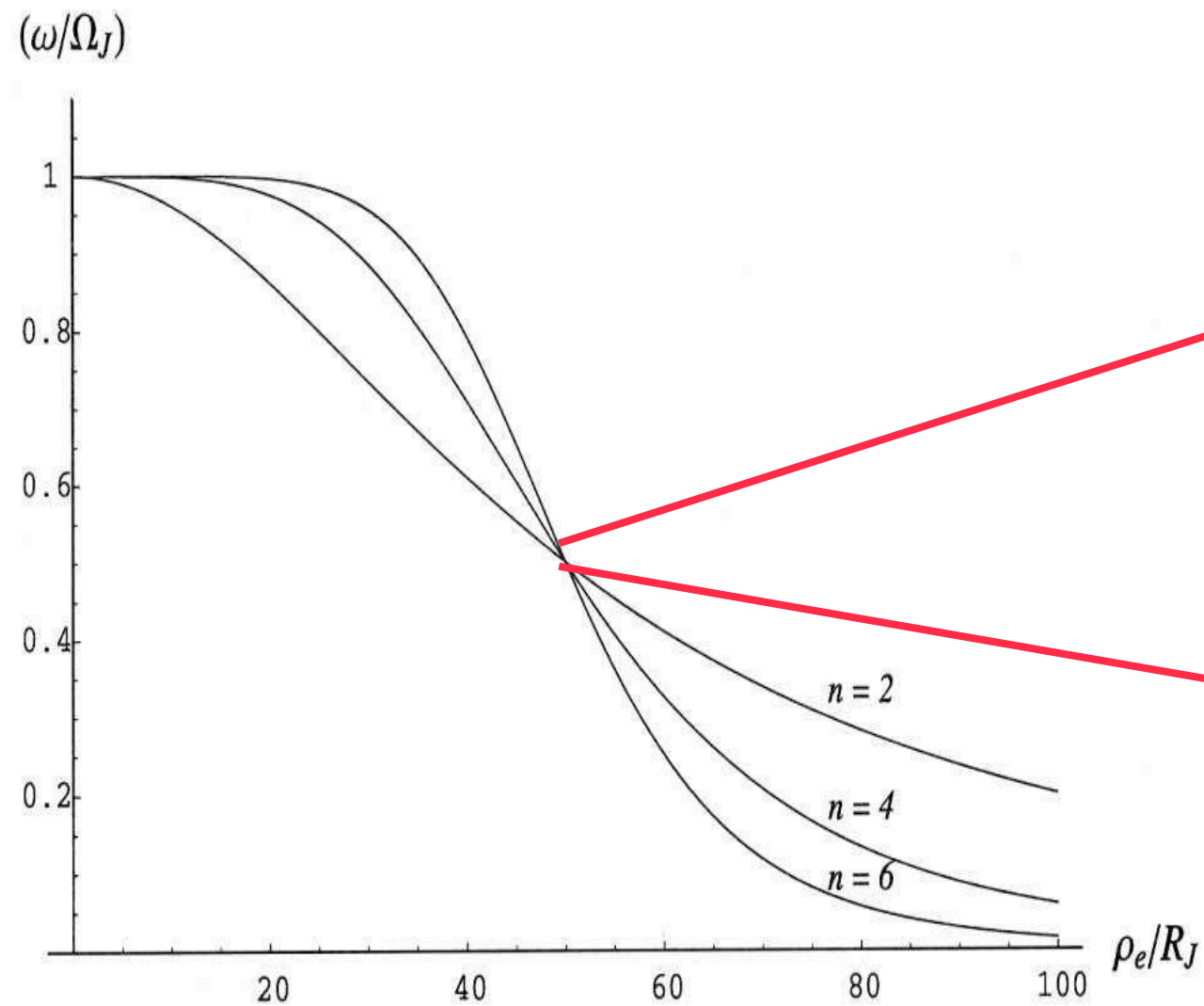
$\Delta\Phi_i = E_i \Delta l \sim E_i \Delta R / R^{3/2}$ (avec $B \times \Delta R^2 = \text{cte}$ et en négligeant la variation de B / θ)

$= \Delta\Phi_m = E_m \Delta R = \Omega R B_m \Delta R = \Omega R B_e / R^3 \Delta R$

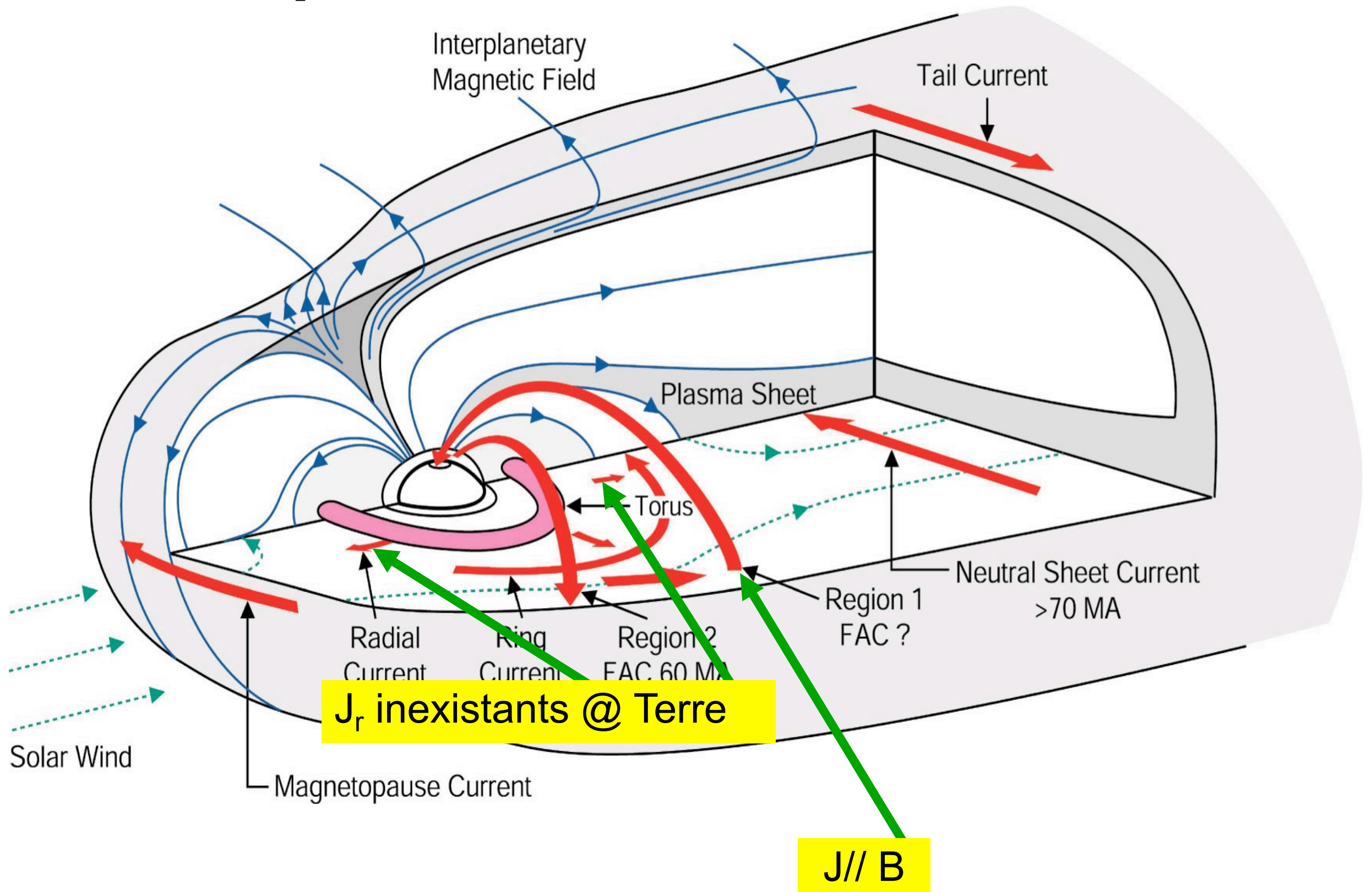
$\rightarrow E_i \sim \Omega B_e / R^{1/2} \quad \downarrow \text{ quand } R \uparrow$

$\rightarrow$ existence d'un courant max $\mathbf{j}_{\perp m, \text{max}} = \sigma_P \Omega B_e / 2R^{7/2}$ qui $\downarrow$ avec R , au delà duquel ($\mathbf{j}_{\perp m} > \mathbf{j}_{\perp m, \text{max}}$) l'ionosphère ne peut plus fournir l'impulsion requise pour accélérer le plasma MS à la corotation

- passage de corotation à **sous-corotation** à partir de $\sim 20 R_J$ ($V_{\text{corot}}=200 \text{ km/s}$)
avec $j_{\parallel}$ max dans la région 20-50 R_J
- origine de l'ovale auroral principal de Jupiter



Jupiter (étirement de $\mathbf{B}$ sous-estimé)



Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

*LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr*

7. Electrodynamique d'un système magnétosphère-satellite

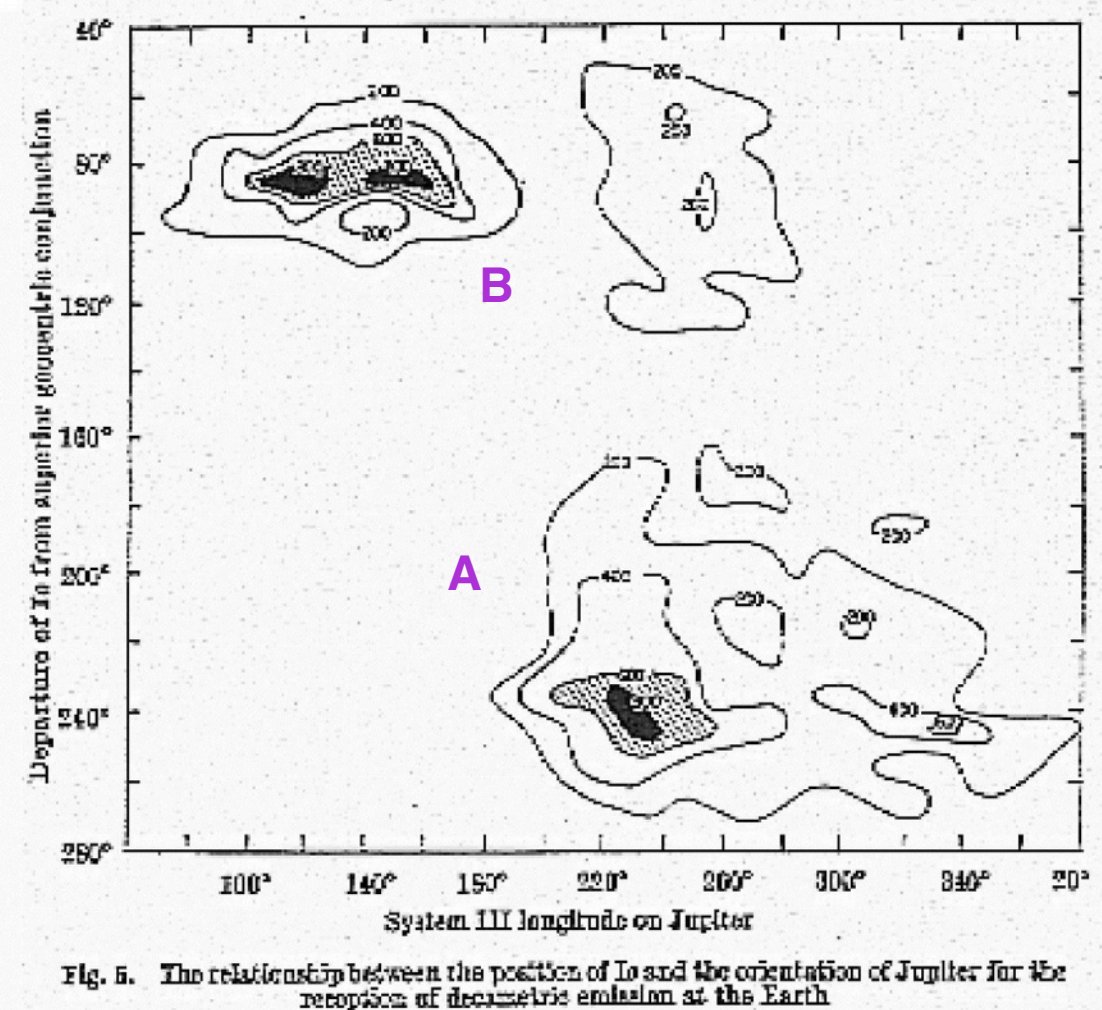
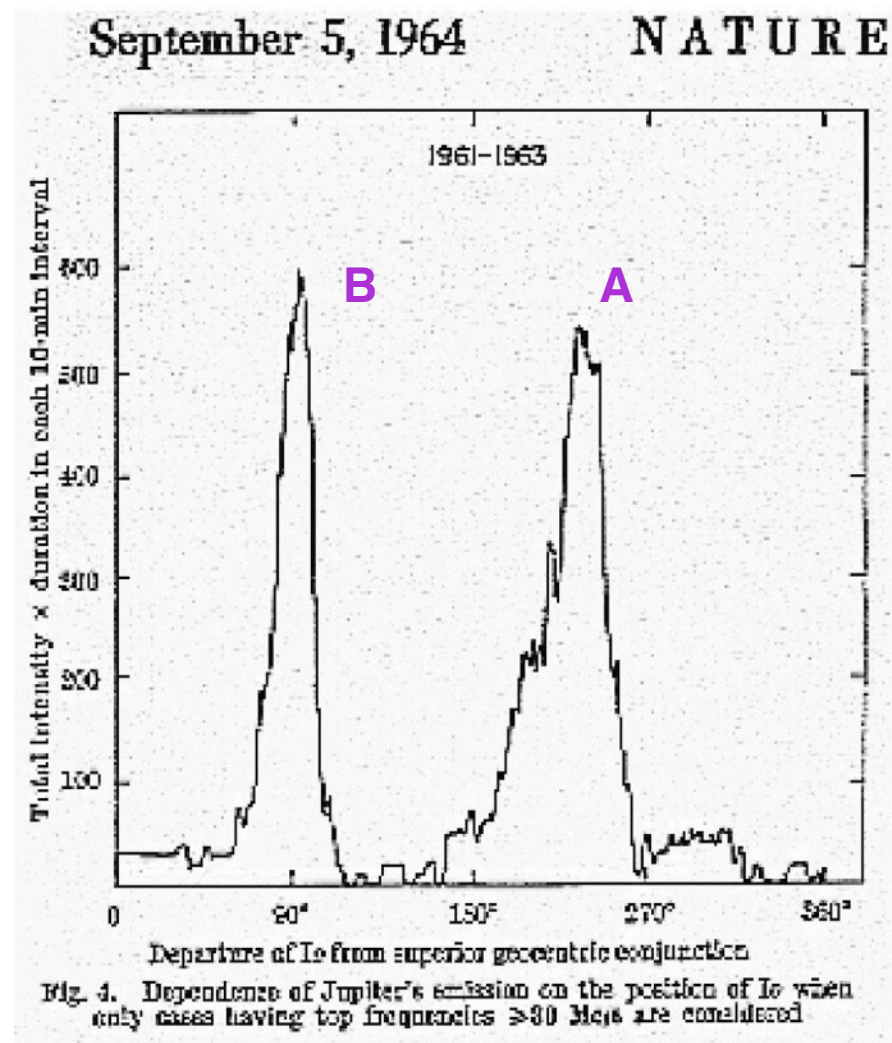
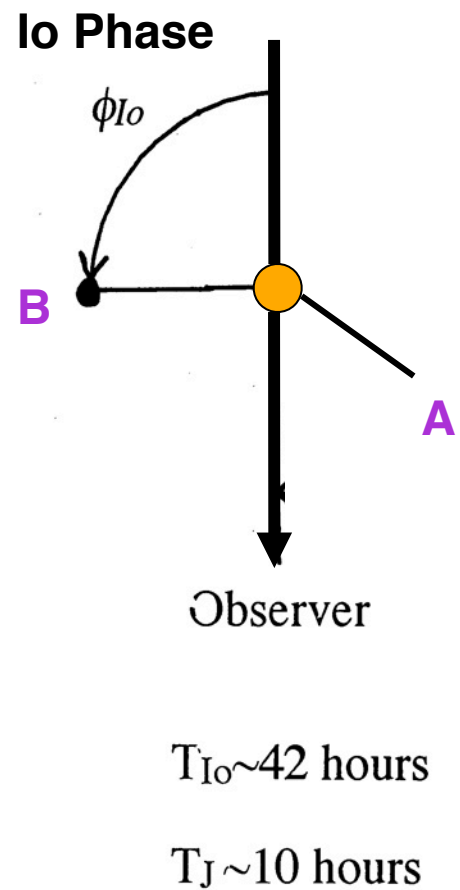
7.1 Interaction locale Io-Jupiter

7.2 Effets à distance de l'interaction Io-Jupiter

7.3 Autres satellites

7.1 Interaction locale Io-Jupiter

→ découverte de l'interaction via l'effet statistique de Io sur l'émission radio décamétrique de Jupiter [Bigg, 1964]



- Moteur = mouvement de Io / lignes de B en corotation :

$$\rightarrow E = -V \times B \quad \text{avec} \quad V = V_{\text{corot}} - V_K = 74 - 17 = 57 \text{ km/s}$$

$$B = B_e / R^3 = 0.02 \text{ G}$$

$$(R = 5.9 R_J, B_e = 4.2 \text{ G})$$

$$\rightarrow E = 0.1 \text{ mV/m} \quad \phi \sim 2 R_{\text{Io}} E = 4 \times 10^5 \text{ V}$$

$$(R_{\text{Io}} \sim 1800 \text{ km})$$

- Flot fortement magnétisé :

$$n_{\text{max}} \sim 1000 \text{ cm}^{-3}, m \sim 20 \text{ uma}$$

$$V = 57 \text{ km/s}, B = 0.02 \text{ G}, T \sim 500 \text{ eV}$$

$$\rightarrow P_{\text{plasma}} = 2nkT \sim nmV^2 \sim 10^{-7} \text{ Pa}$$

$$P_B = B^2 / 2\mu_0 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ Pa} \gg P_{\text{plasma}}$$

$$(\beta \sim 0.04 \ll 1)$$

- Flot sub-Alfvénique :

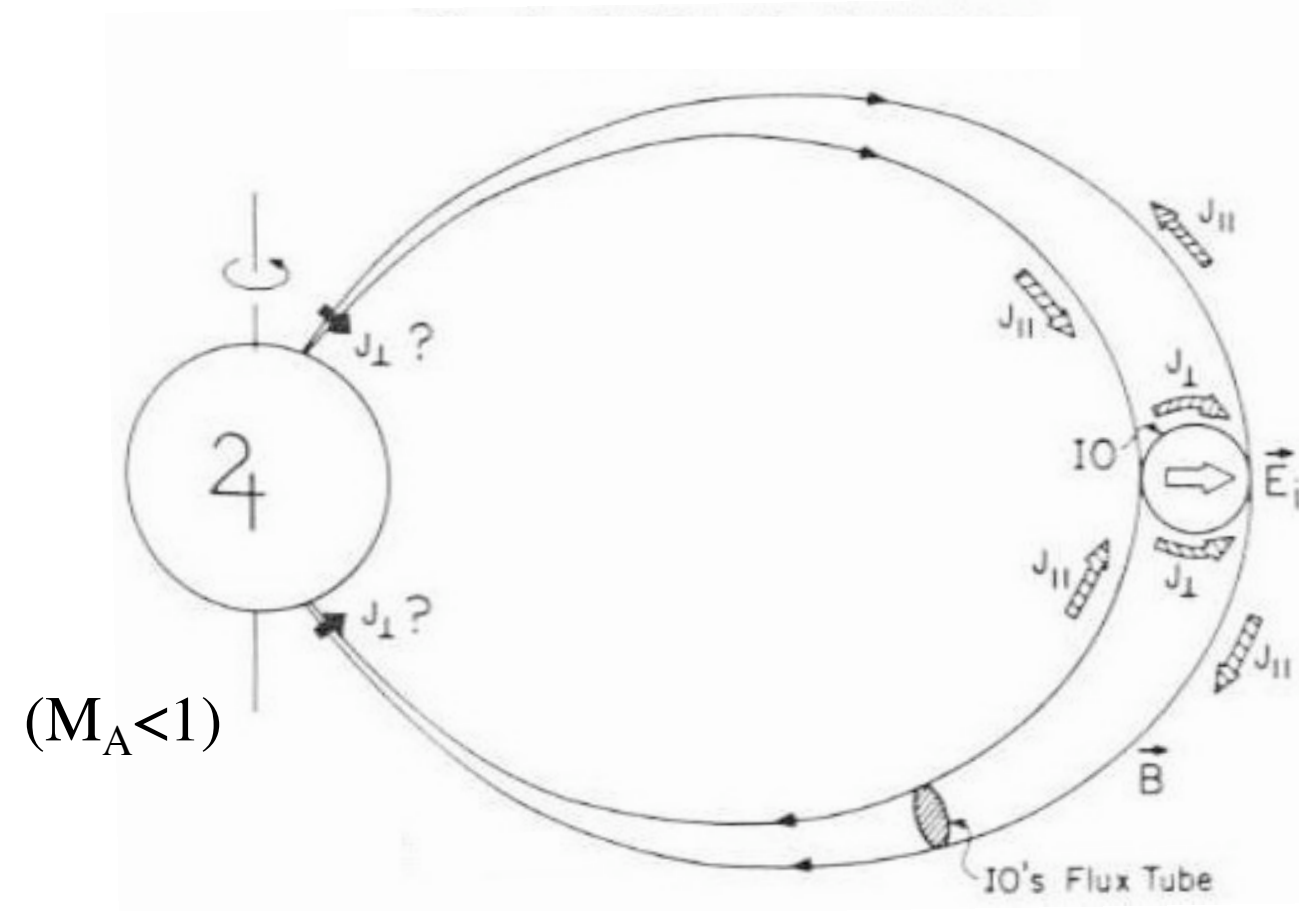
$$V_A = B / (\rho\mu_0)^{1/2} \sim 300 \text{ km/s} \rightarrow V \ll V_A$$

$\rightarrow$ pas d'onde de choc en amont de Io
(perturbation convectée à V_A // B)

- δB mesuré par Voyager, Galileo

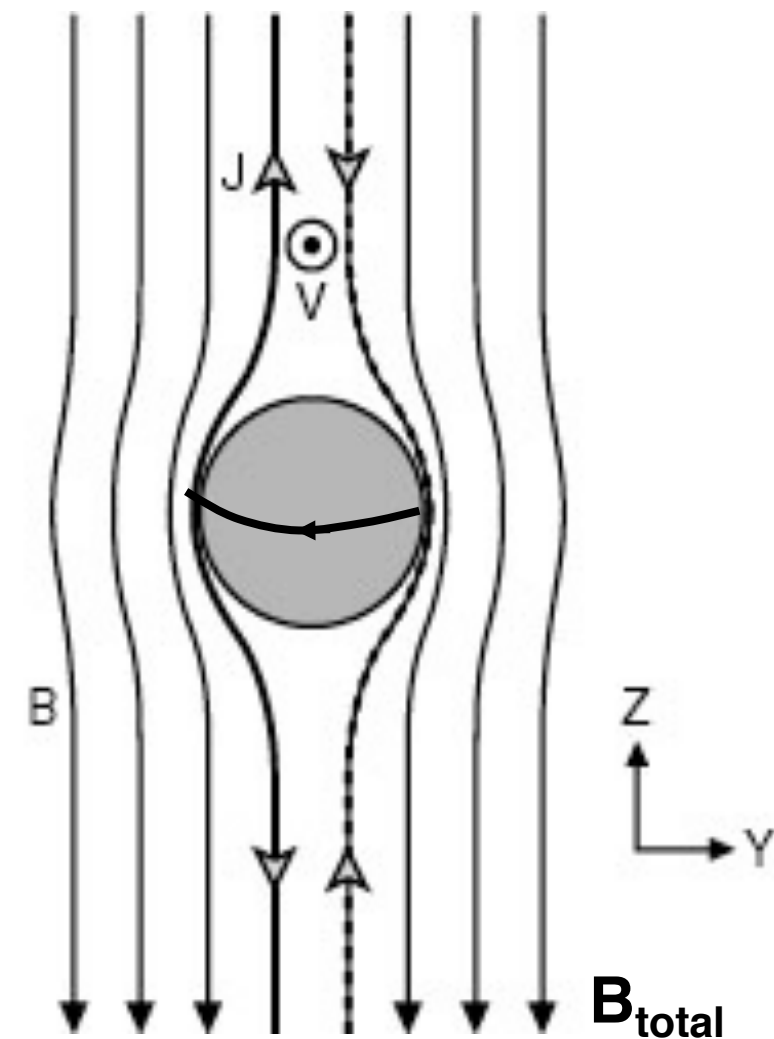
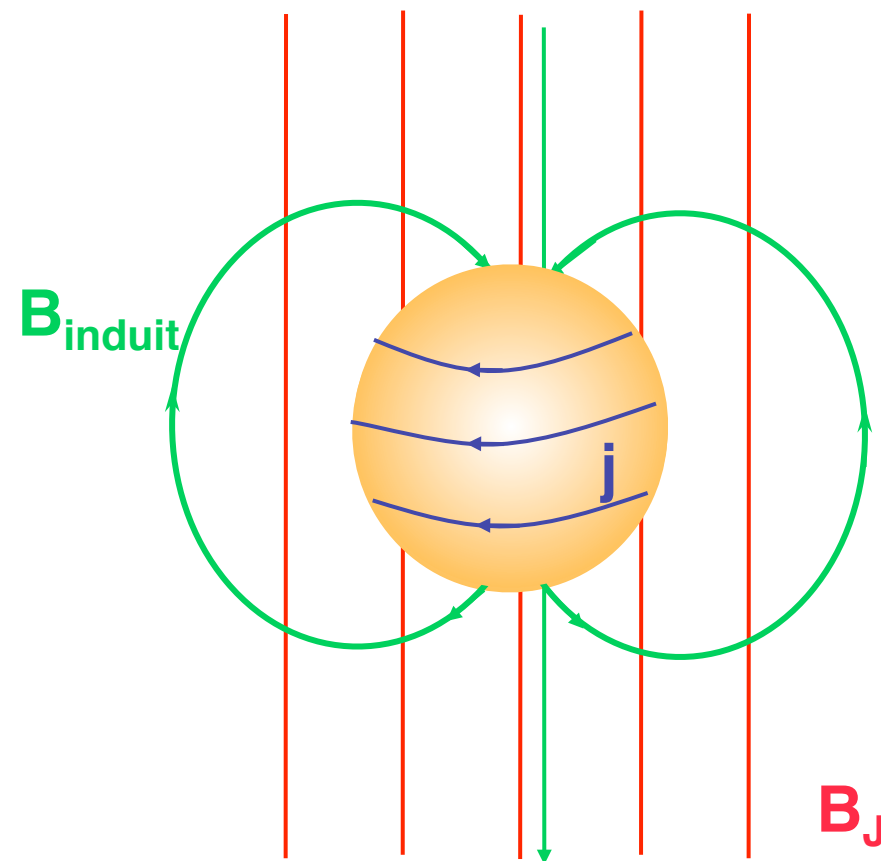
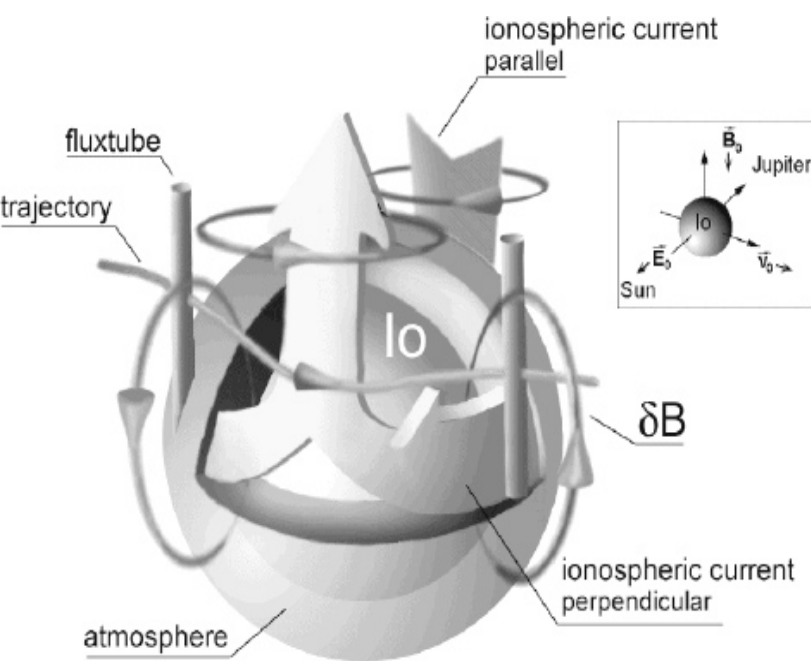
$\rightarrow$ système de courants $I \sim$ quelques 10^6 A entre Io & Jupiter ($\nabla \times B = \mu_0 j$)

$\rightarrow E = -V \times B$ entraîne un courant $j_{\perp}$ Jupiter $\rightarrow$ anti-Jupiter, qui se referme (au N&S) vers les hautes latitudes via $j_{\parallel}$ (à distance de Io, i.e. hors ionosphère, les conductivités $\perp$ deviennent négligeables)



- Près de Io :

- déviation du flot de plasma près de Io
- + ralentissement en amont de Io
- lignes de B Jovien gelé empilées & étirées autour de l'obstacle
- « glissent » sur les flancs de l'obstacle



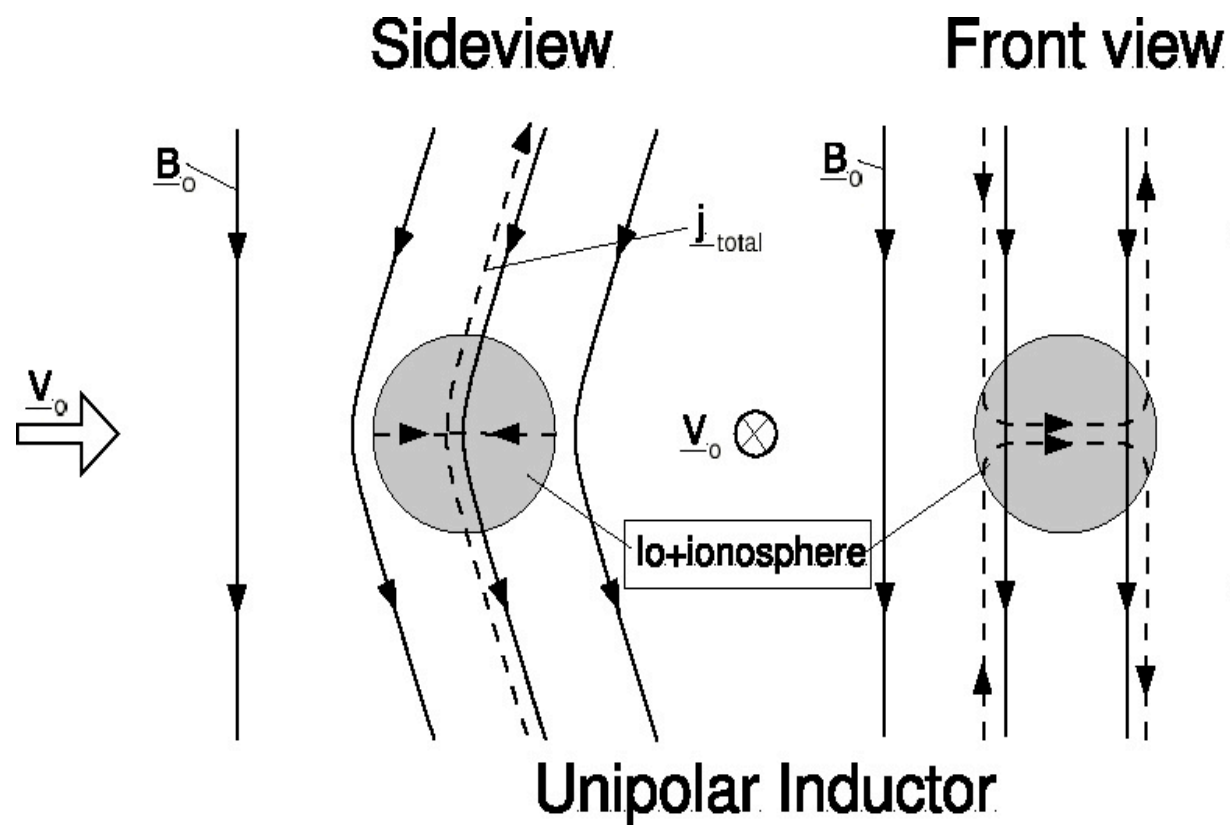
vers Jupiter →

- Fermeture des courants :

$\sigma_{//} \sim \infty, \sigma_{\perp} \sim 0$ dans la magnétosphère

$\mathbf{j}$ uniquement $//$ dans la magnétosphère, fermés via Σ_P (ionosphère de Jupiter), et intérieur ou ionosphère de Io (Σ_P & Σ_H) $\rightarrow$ Ok seulement si $\rho(MS) \sim 0 \rightarrow M_A \ll 1$

$V_A \sim c \rightarrow$ réponse immédiate du circuit de courant aux variations temporelles de conductivité (volcanisme, ionosphère Jupiter...) = **Modèle de l'Inducteur unipolaire**



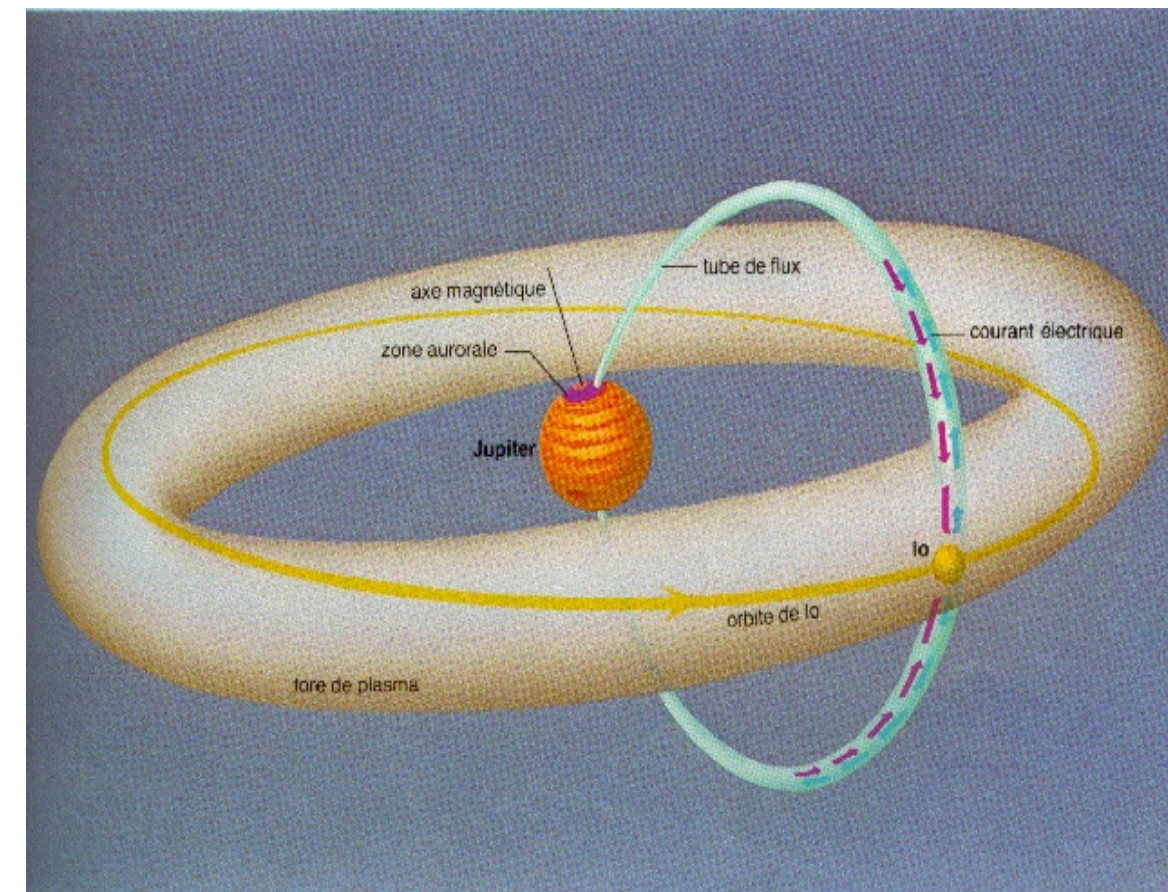
Mais

découverte du tore dense de plasma dans l'équateur centrifuge autour de Io [Voyager, 1979]

$\rightarrow V_A \ll c \rightarrow M_A < 1$ mais pas $\ll 1$ ($M_A \sim 0.15-0.3$)

[sauf pour Io près d'un bord externe du tore]

$\rightarrow \mathbf{j}_{\perp}(MS)$ ne sont plus négligeables

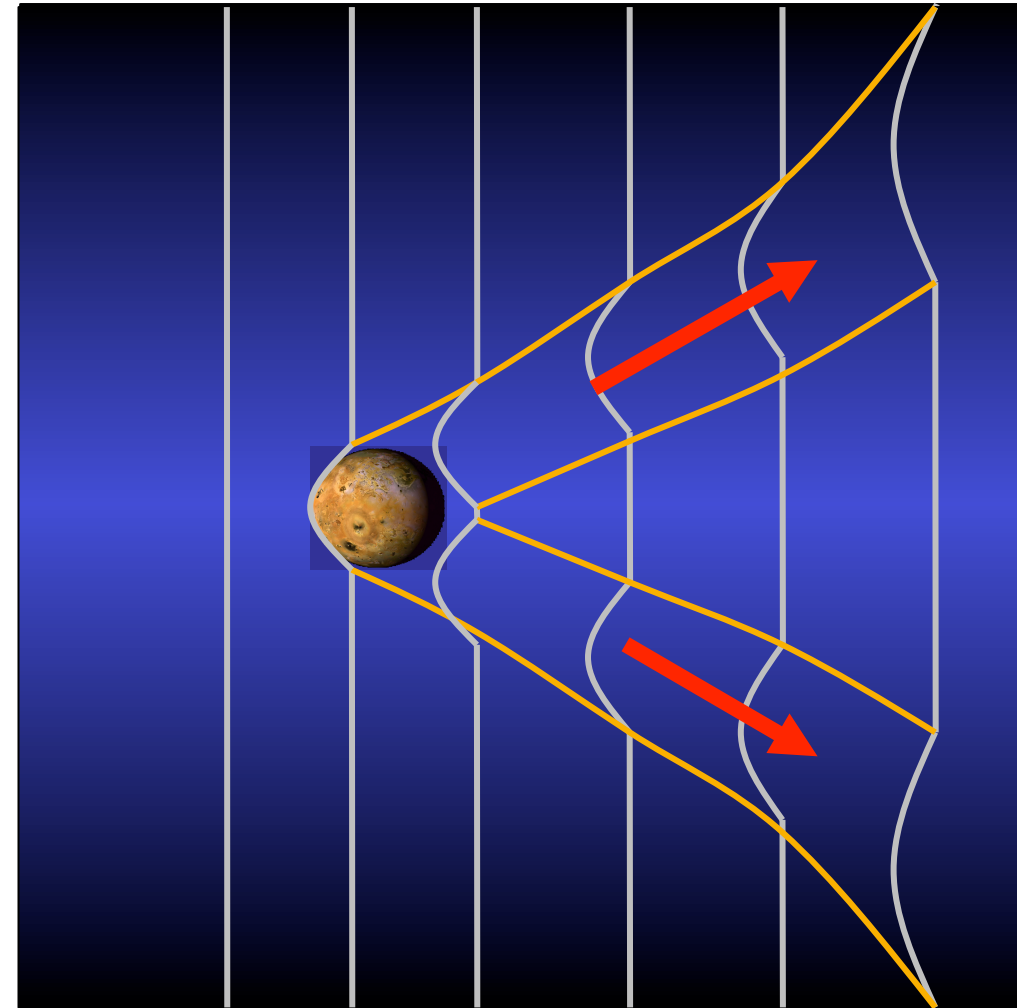
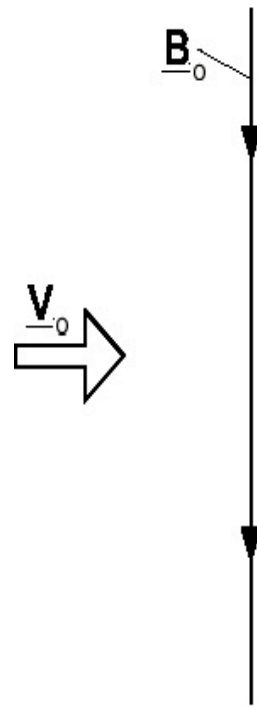


- perturbations de $\mathbf{B}$ se propageant vers Jupiter à V_A au Nord et au Sud dans le référentiel du plasma,
- i.e. à $\mathbf{V} \pm \mathbf{V}_A$ dans le référentiel de Io = **Modèle des Ailes d'Alfvén**, inclinées / B_J

Onde d'Alfvén = perturbation transverse de B se propageant le long de B à

$$V_A \sim B/(\rho\mu_o)^{1/2}$$

$$(1/V_A^2 = 1/c^2 + \rho\mu_o/B^2)$$



Existence de $j_\perp$ dans les ailes d'Alfvén, refermant le circuit indépendamment de l'ionosphère Jovienne :

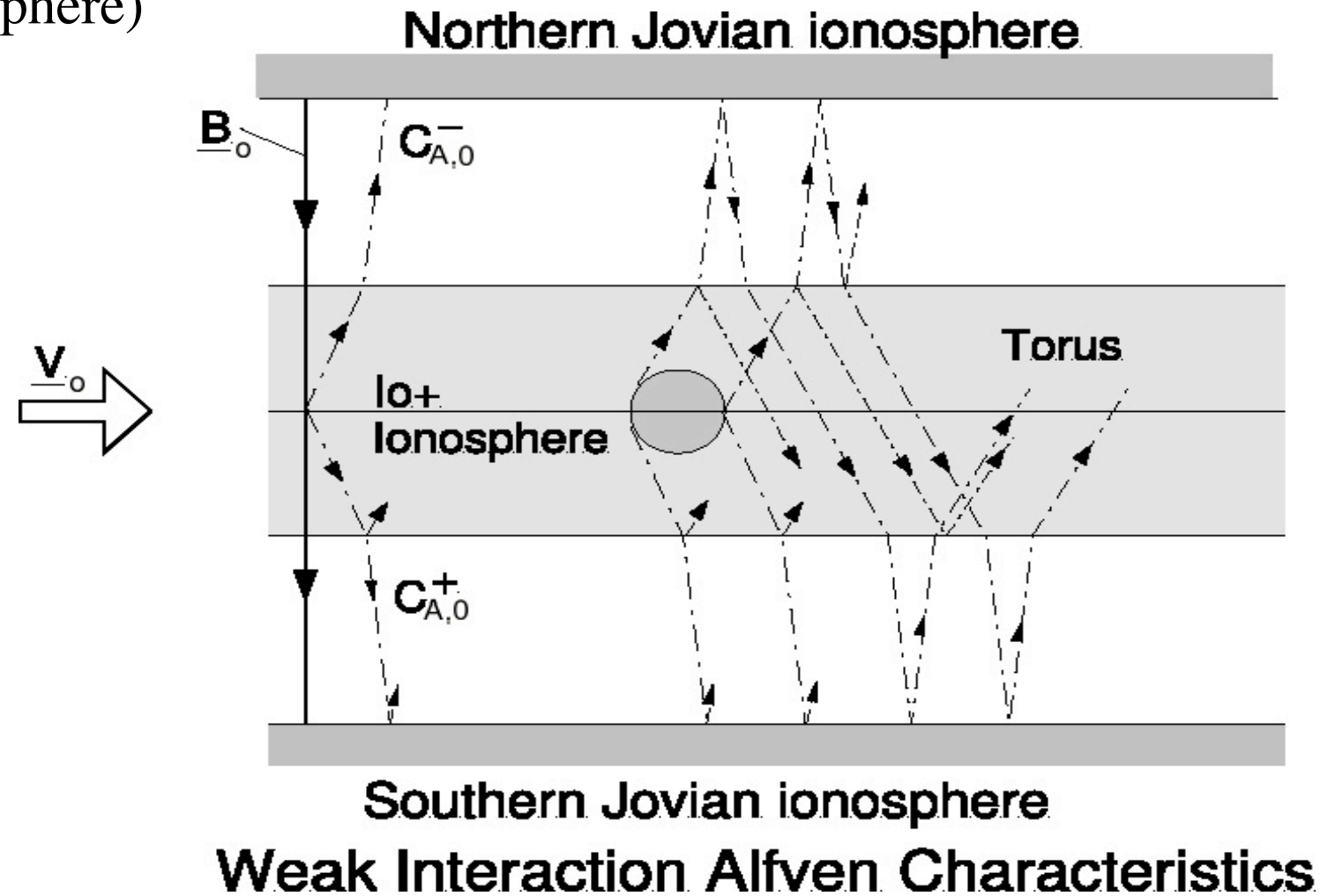
$$E = V \times B \quad \Rightarrow \quad \nabla \cdot E = V \cdot \nabla \times B = V_A \mu_o j_A \quad \text{le long de la caractéristique d'Alfvén}$$

$$\Rightarrow j_A = \Sigma_A \nabla \cdot E \quad (\text{avec } \Sigma_A = 1/\mu_o V_A)$$

$$I_{\text{total}} \propto \Sigma_A E$$

$$P_{\text{dissipée}} = \Sigma_A E^2 \pi R_{\text{Io}}^2 = (1 + M_A^{-2})^{-1/2} (V B_\perp^2 / \mu_o) (\pi R_{\text{Io}}^2) \sim 10^{12} \text{ W / hémisphère}$$

V_A faible dans le tore (~ 200 km/s), $\sim c$ dans la MS, (qq 10^4 km/s au pic ionosphérique) réflexions partielles aux frontières (du tore, de l'ionosphère)



- Limite entre le régime « **inducteur unipolaire** » et « **ailes d'Alfvén** »

= feedback ou non entre les 2 extrémités du circuit

→ fonction du rapport de
à

$$T_{A/R} = 2 \int_{I_o}^{Jupiter} ds / V_A$$

$$T_{passage} = \int_{\text{ligne d'écoulement}} ds / V$$

sillage de $2-4 R_{Io}$ à $V=57$ km/s

→

$$T_{passage} = 1-2 \text{ min} \sim 100 \text{ sec}$$

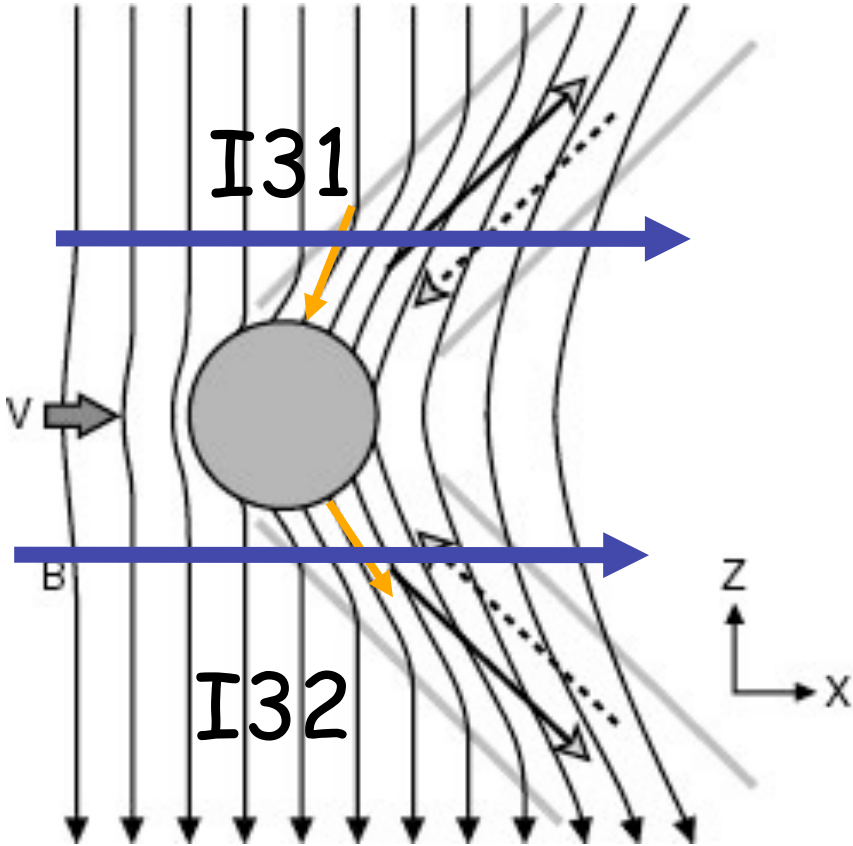
Modèle de tore en équilibre diffusif

→

$$T_{AR} = 8-16 \text{ min} \sim 500-1000 \text{ sec}$$

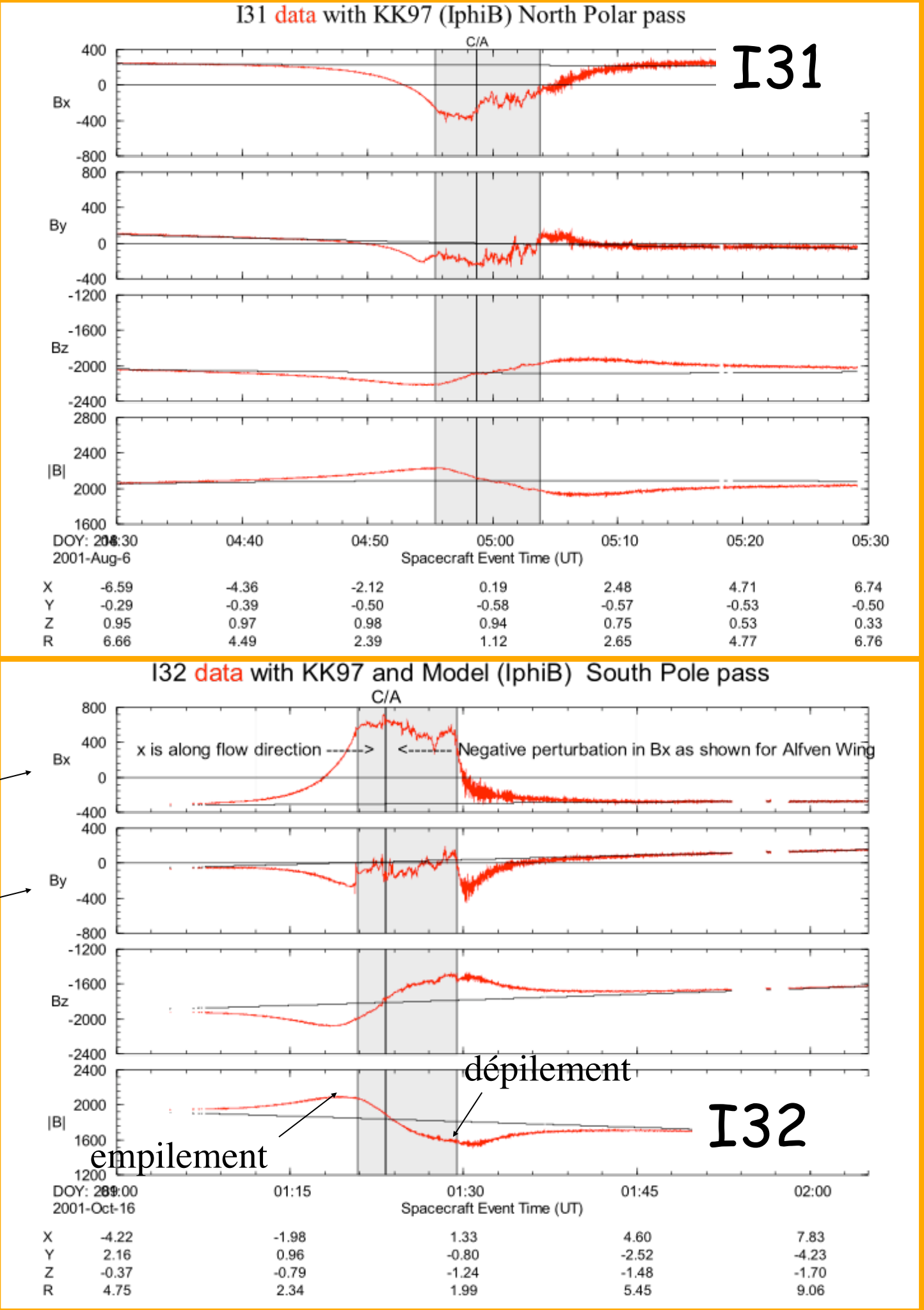
→ pure aile d'Alfvén ?

Survols polaires (de Io) par Galileo

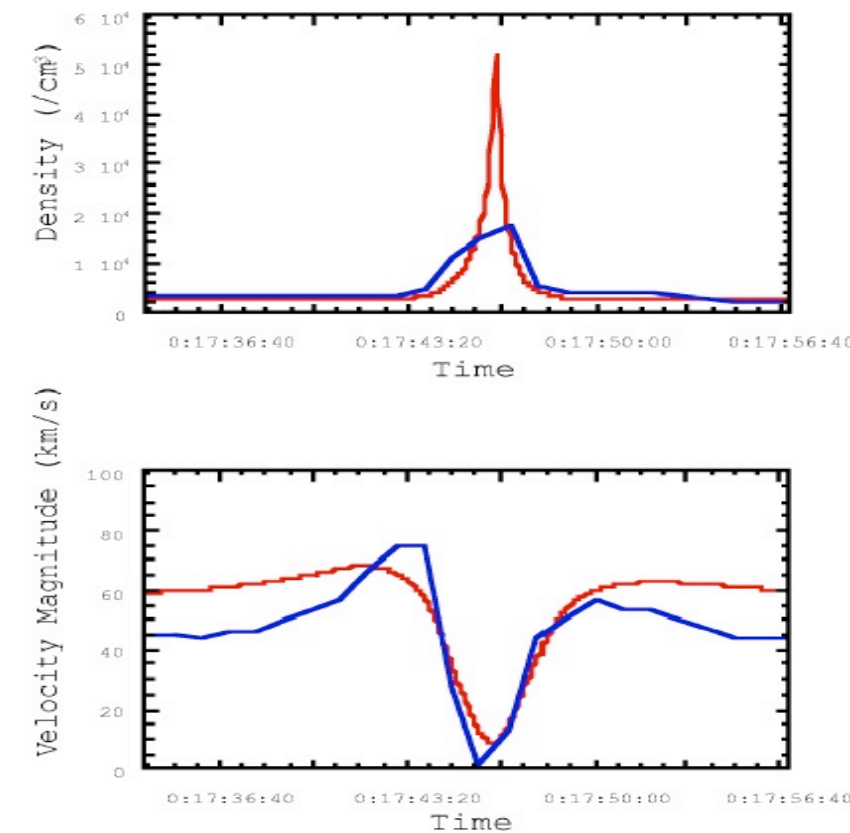
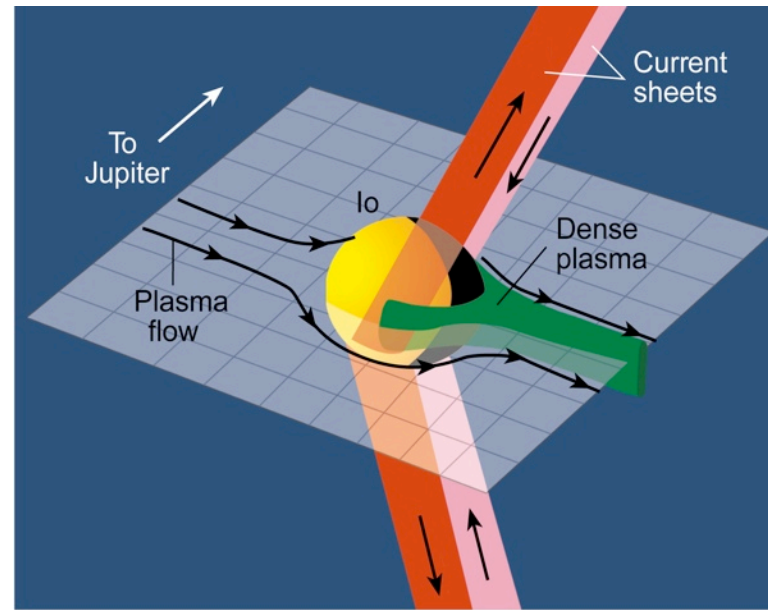


Aile d'Aflvén

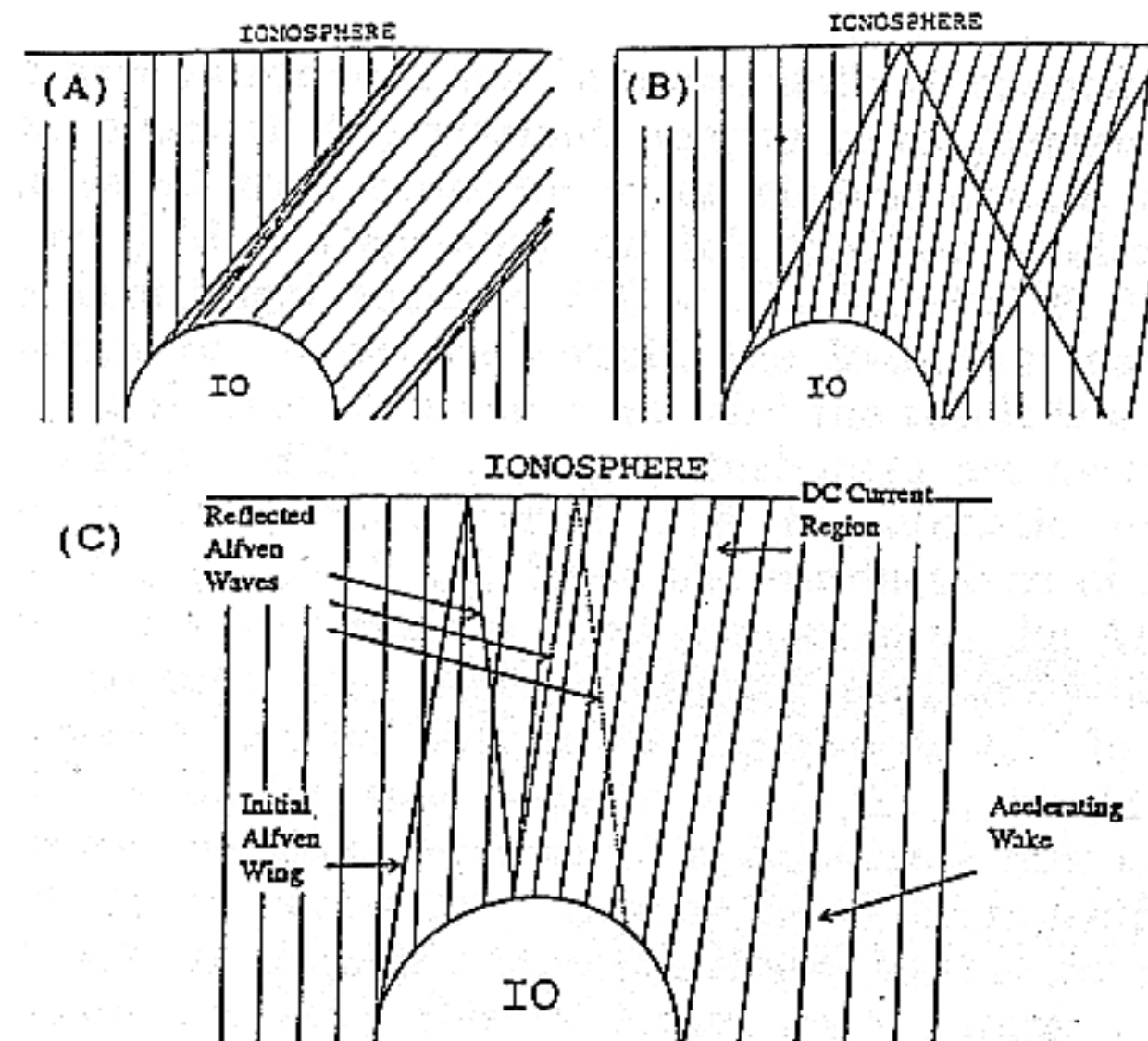
glissement
sur les flancs



→ découverte de la stagnation du plasma derrière Io, $V \sim 1$ km/s
 [Galileo, 1996]



→ durée du passage du flot autour de Io ~ 4000 s
 > durée du temps d'aller-retour à $V_A \sim 500-1000$ s
 → interaction hybride, plutôt Alfvénique en amont
 puis du type inducteur unipolaire.



7.2 Effets à distance de l'interaction Io-Jupiter

Effet à distance de la perturbation Alfvénique :

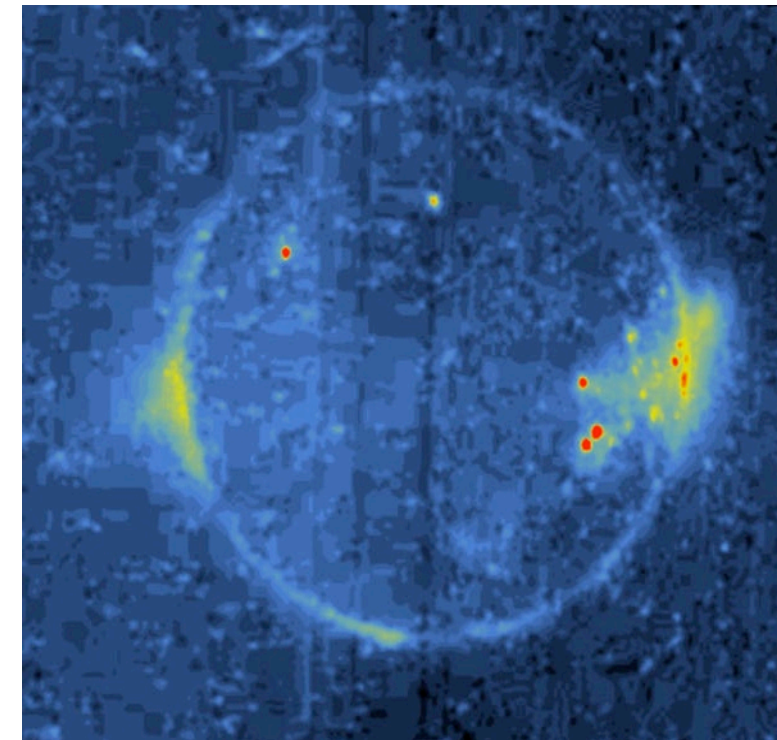
Puissance dissipée $\sim 2 R_{\text{Io}} E I \sim 10^{12}$ W/hémisphère.

Génération de faisceaux d'électrons énergétiques via l'interaction :

$j = \text{NeV}$ forcé avec $j \uparrow \uparrow$ et $N \downarrow \downarrow$

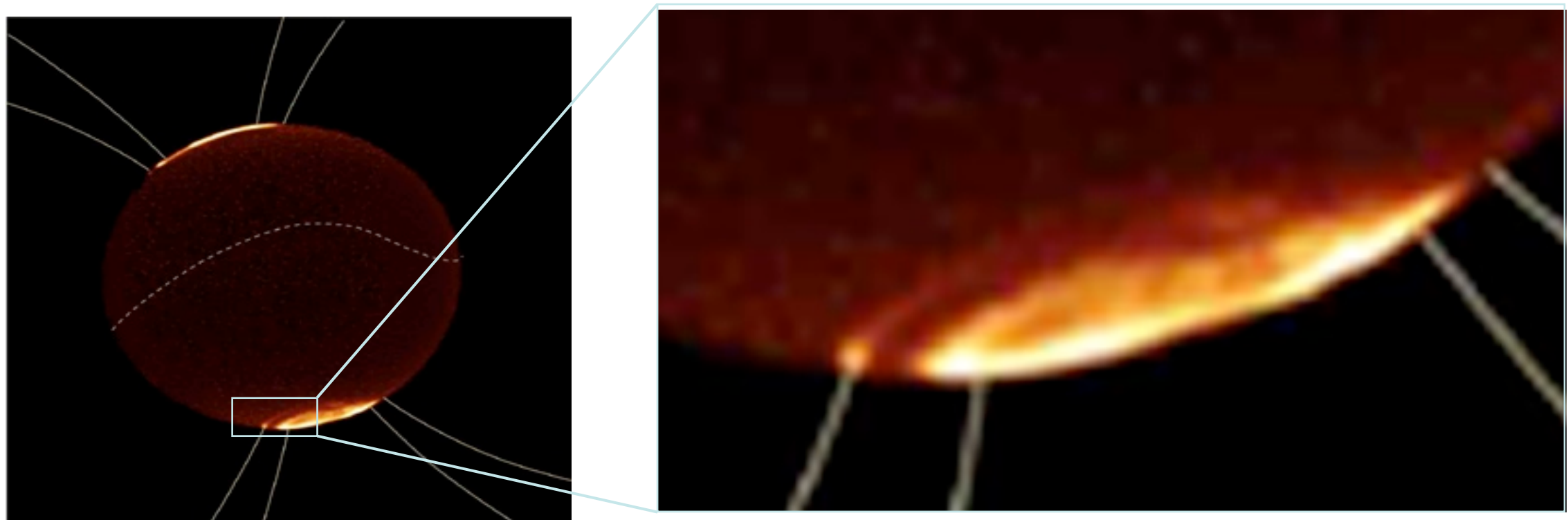
→ accélération des électrons (Théorie de Knight)

(ex: $I = 3 \times 10^6$ A dans un cylindre de section $\pi R_{\text{Io}}^2 \rightarrow j \sim 3 \times 10^{-7}$ A/m²
avec $N \sim 10\text{-}100$ cm⁻³ hors du tore $\rightarrow V = 0.06\text{-}0.6$ c $\rightarrow E = 1\text{-}100$ keV)

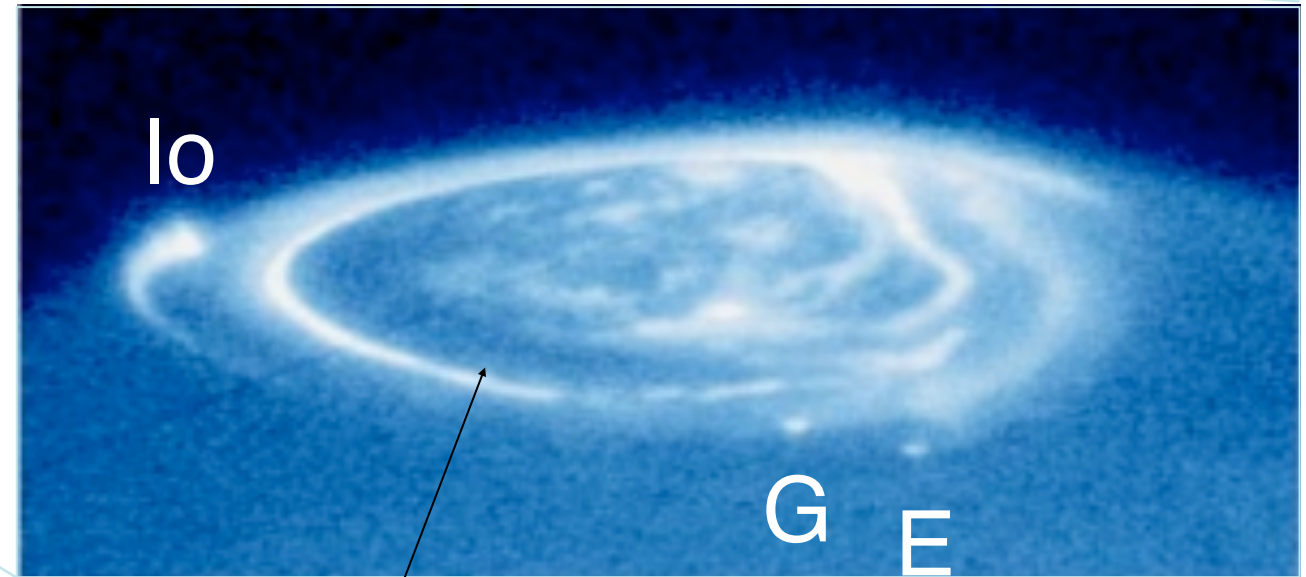
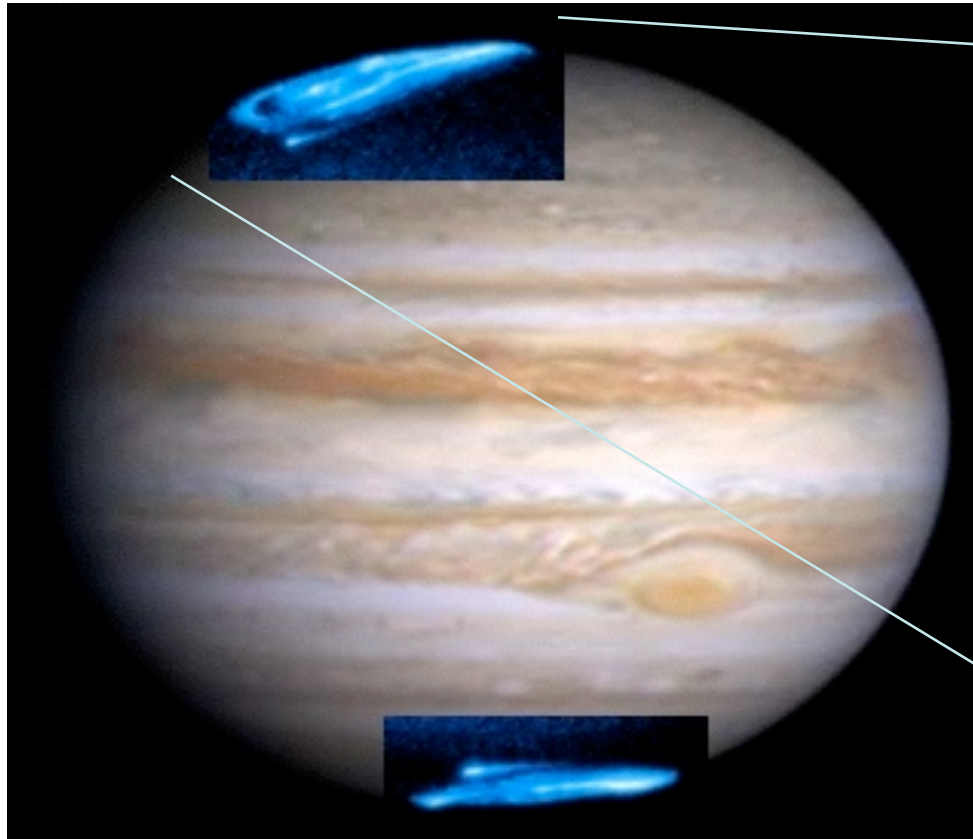


Aurores ~à l'équateur de Io

- émissions IR dans l'atmosphère de Jupiter, au pied du circuit (chauffage)



- émissions UV dans l'atmosphère de Jupiter, au pied du circuit (précipitations e⁻)



Ovale principal

- émissions radio associées à Io (*cf. 8.3*)

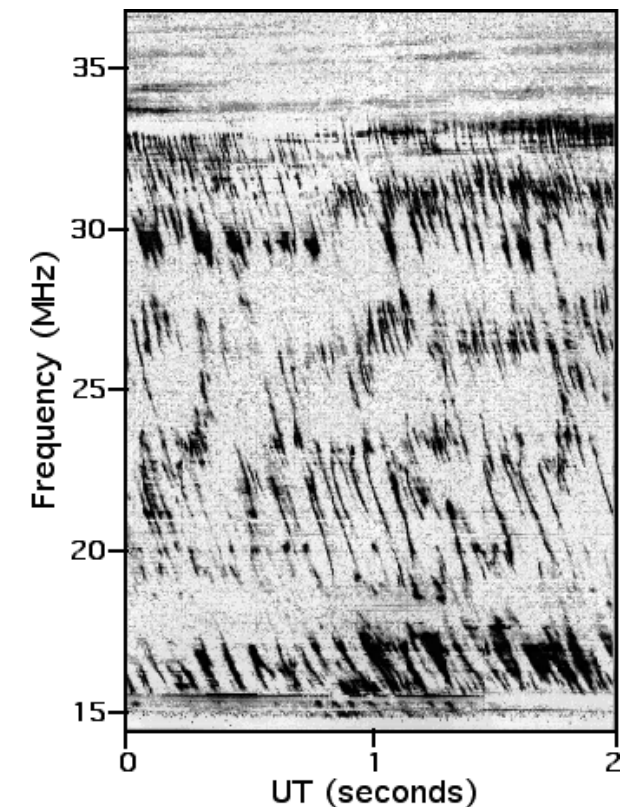
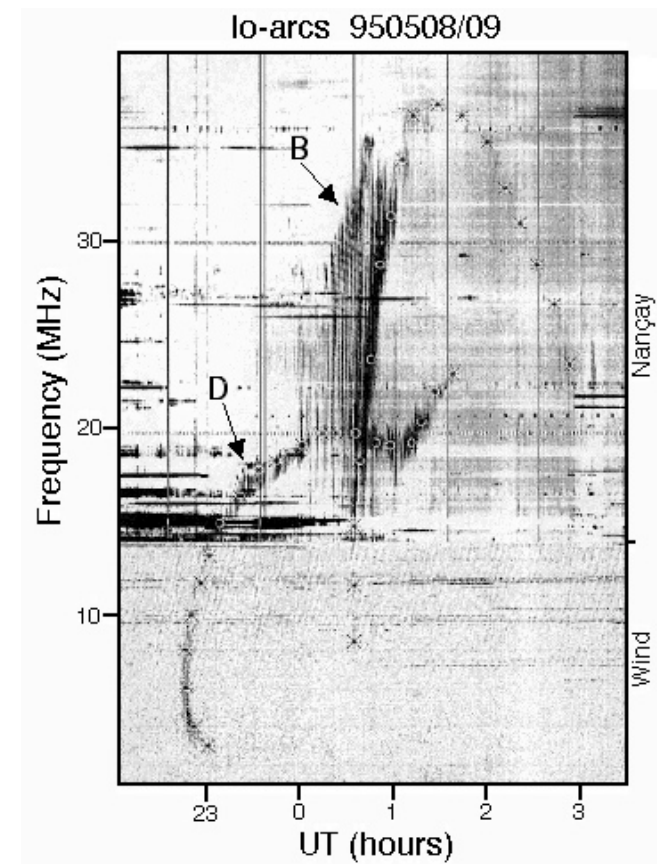
Puissances rayonnées :

Taches UV & IR $\sim 10^{10-11}$ W

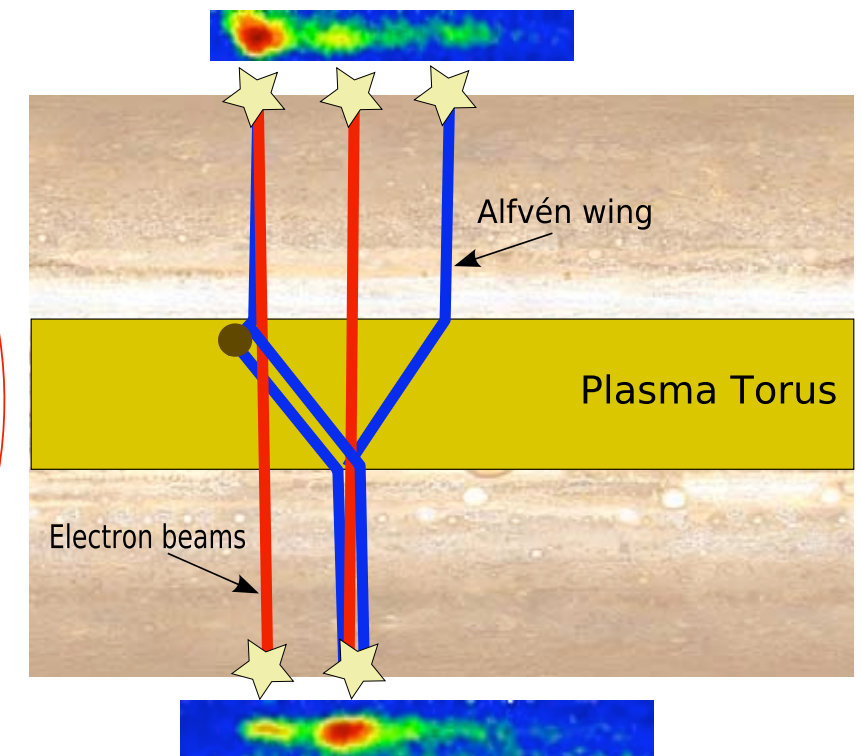
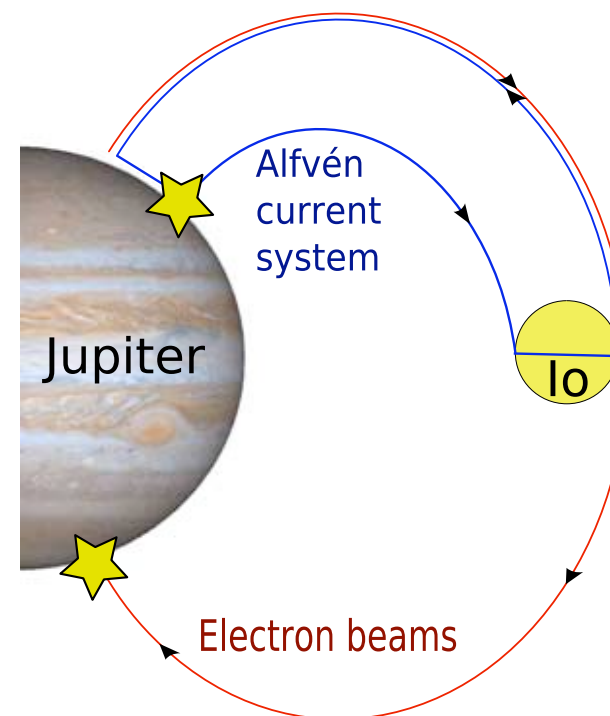
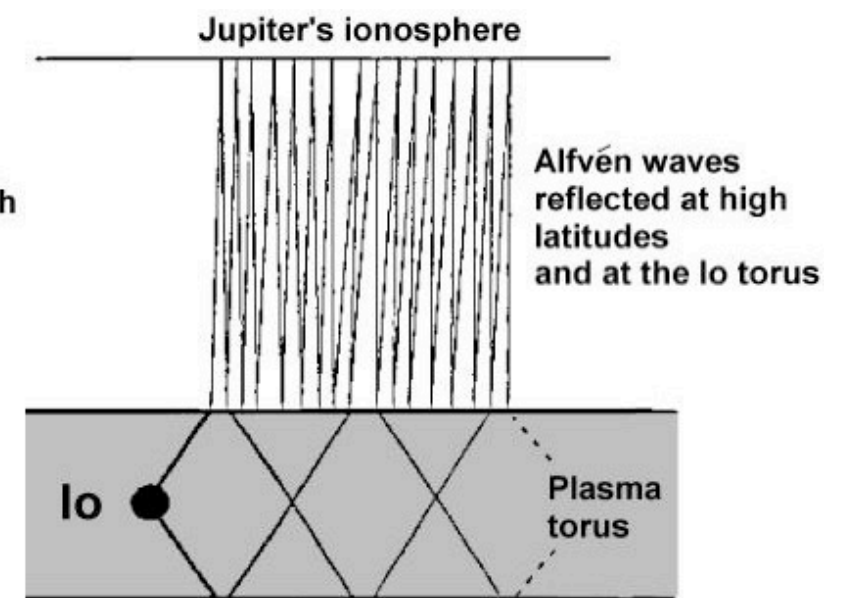
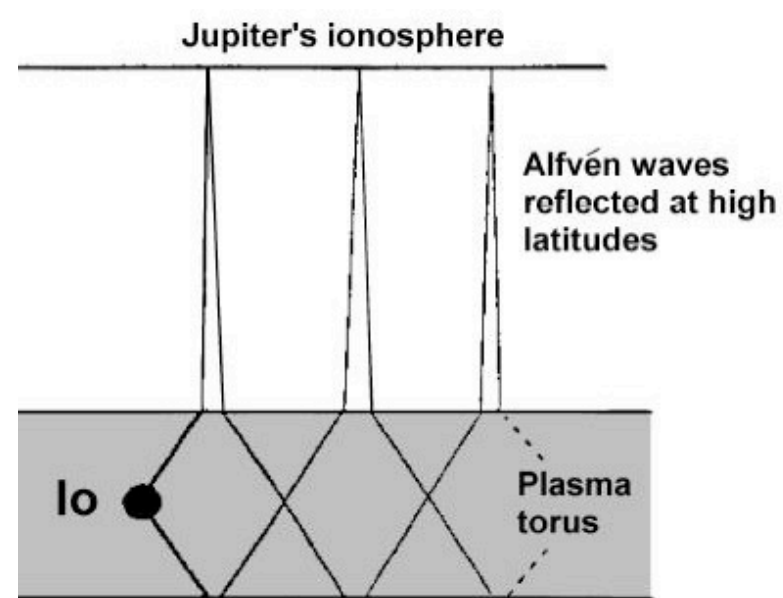
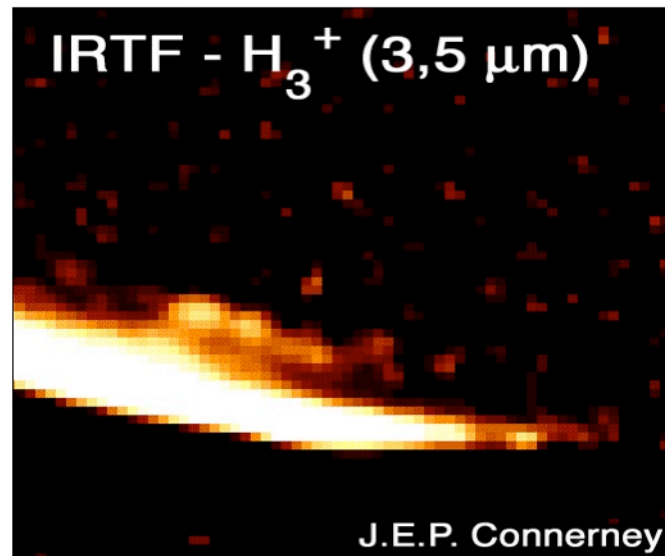
→ 10-15 W/m² dissipés dans $\varnothing=300-500$ km

→ *perturbations atm. & ionosphériques*

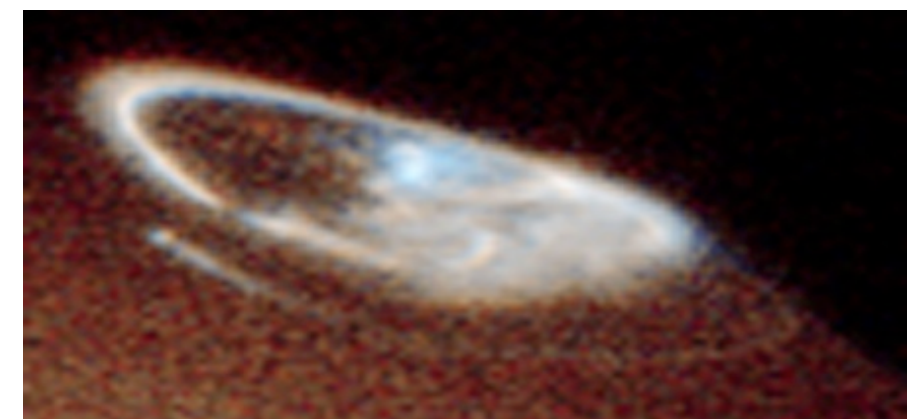
Emissions Radio $\sim 10^9$ W rayonnés



- Taches multiples → réflexions Alfvéniques ? (également observées en radio)



- Traînée → $j_{//}$ liés au $j_{\perp}$ de réaccélération du plasma (par $\mathbf{j}_{\perp} \times \mathbf{B}$ *idem* ovale principal) ?



7.3 Autres satellites

- Interaction Europe-Jupiter :

10× fois moins intense en UV

$$\propto P_B = B^2/2\mu_o V \pi R_{obs}^2 \quad (\text{flux de Poynting convecté sur l'obstacle})$$

Fermeture des courants près d'Europe via ionosphère
(criblage) ou océan conducteur en subsurface ?

- Ganymède : champ magnétique intrinsèque

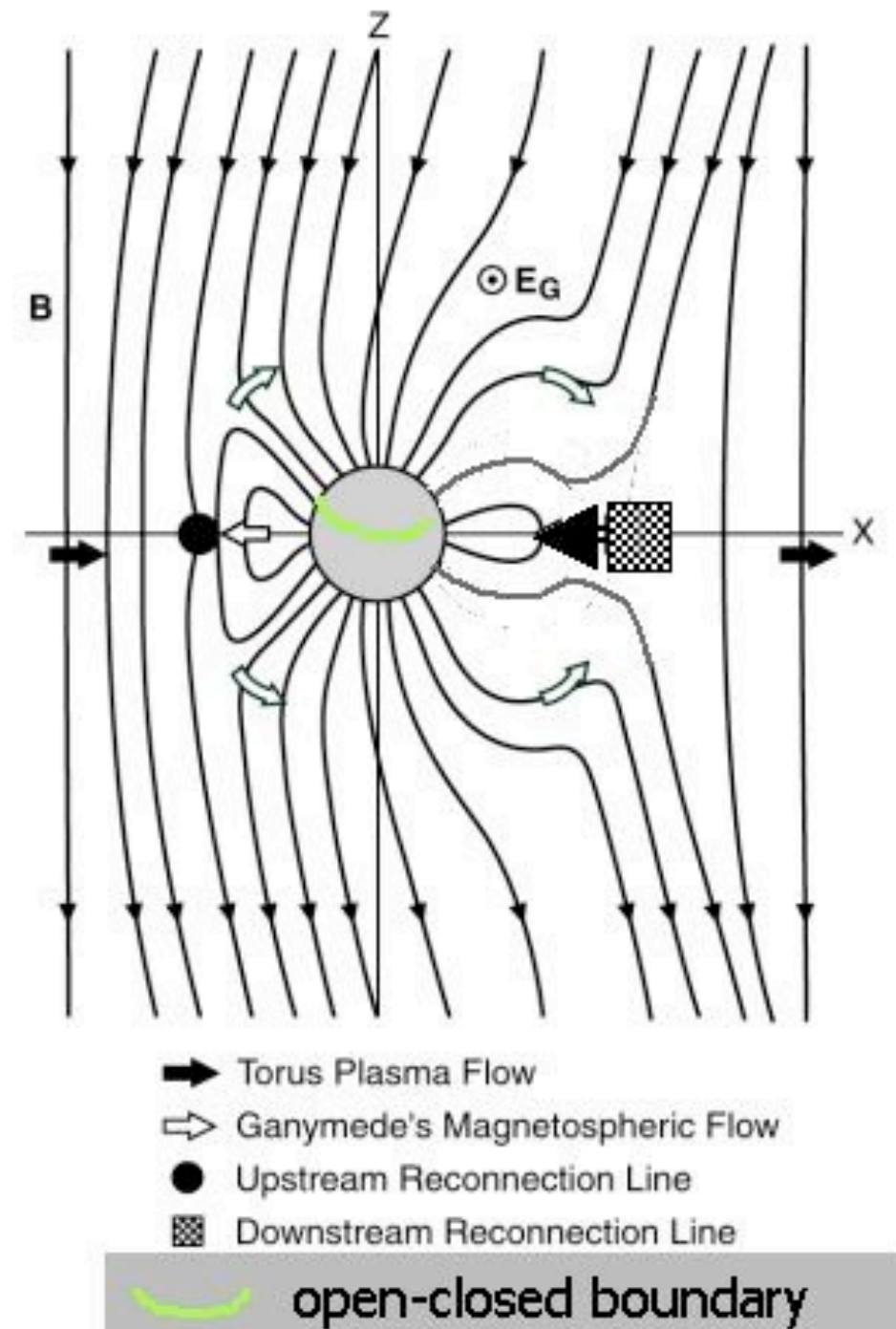
& mini-magnétosphère ouverte (*Dungey*)

→ reconnection permanente, dynamique, aurores,
ceintures de radiations

→ intensité relative de l'interaction également $\sim I_o/10$
(idem Europe)

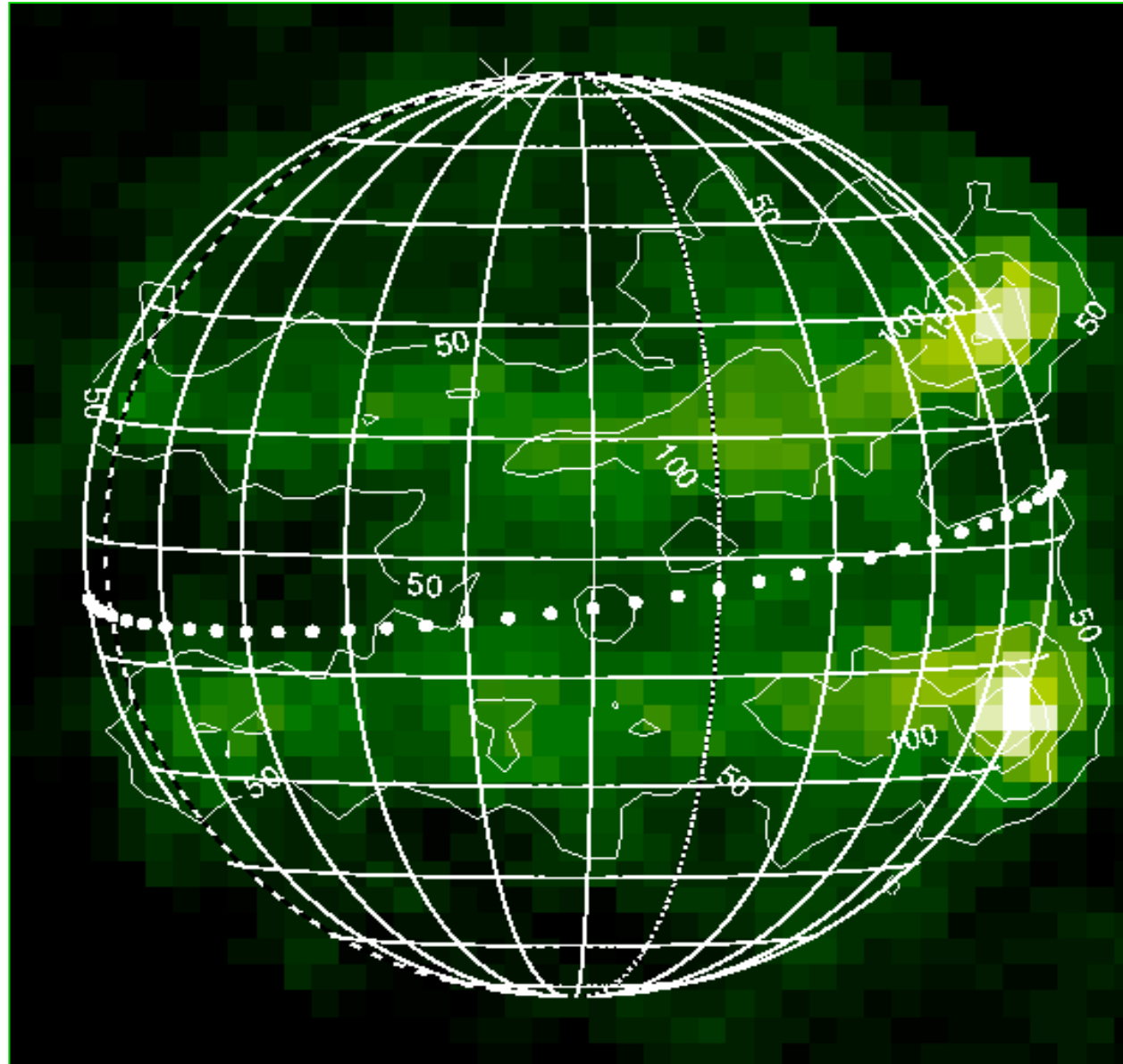
$$P_{dissipée} \sim B_J^2/2\mu_o V \pi R_{obs}^2$$

$$\text{avec } R_{obs} = R_{MS} \sim 2 R_G$$

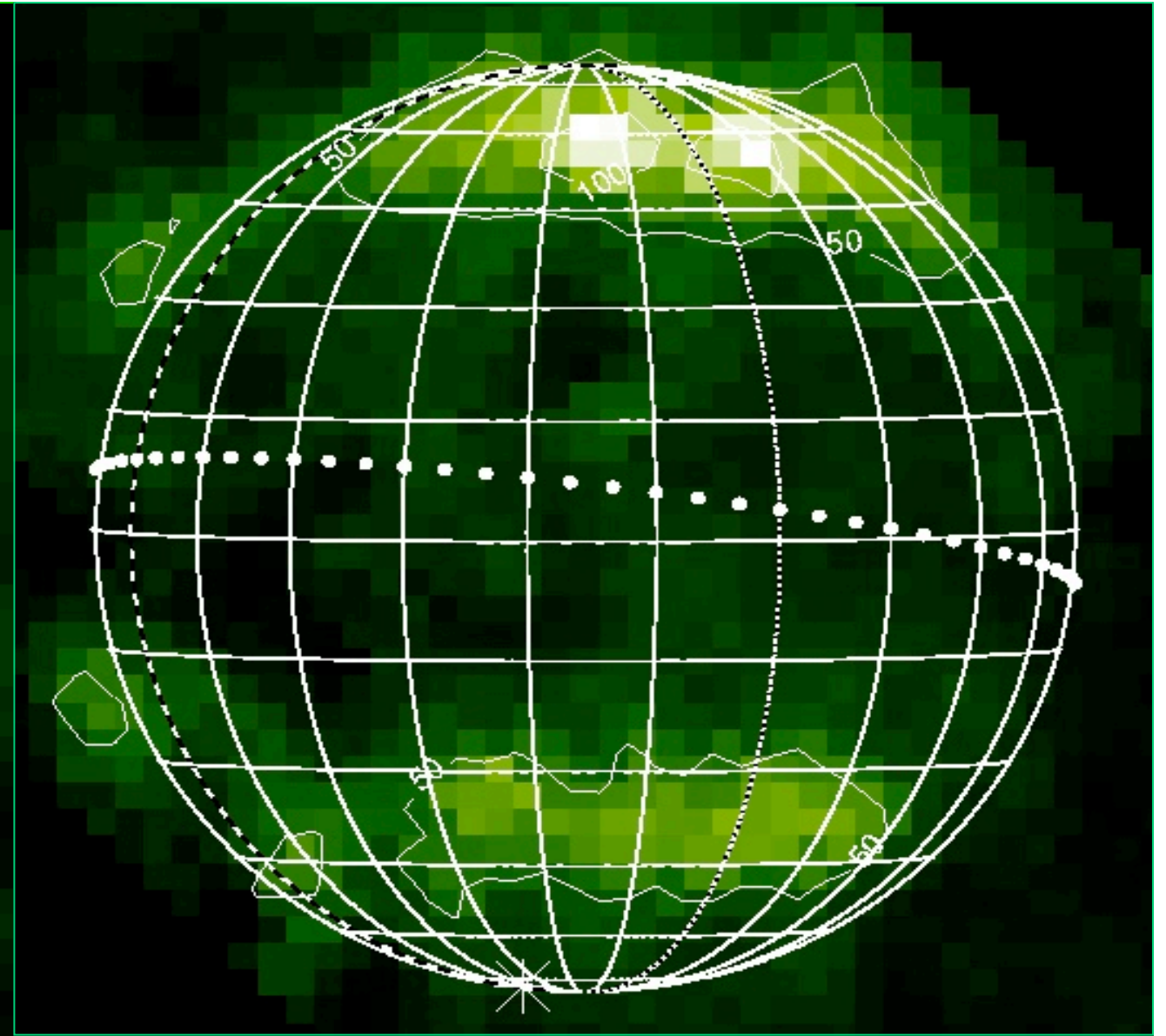


Aurores de Ganymède

Atomic oxygen emission OI] 1356A



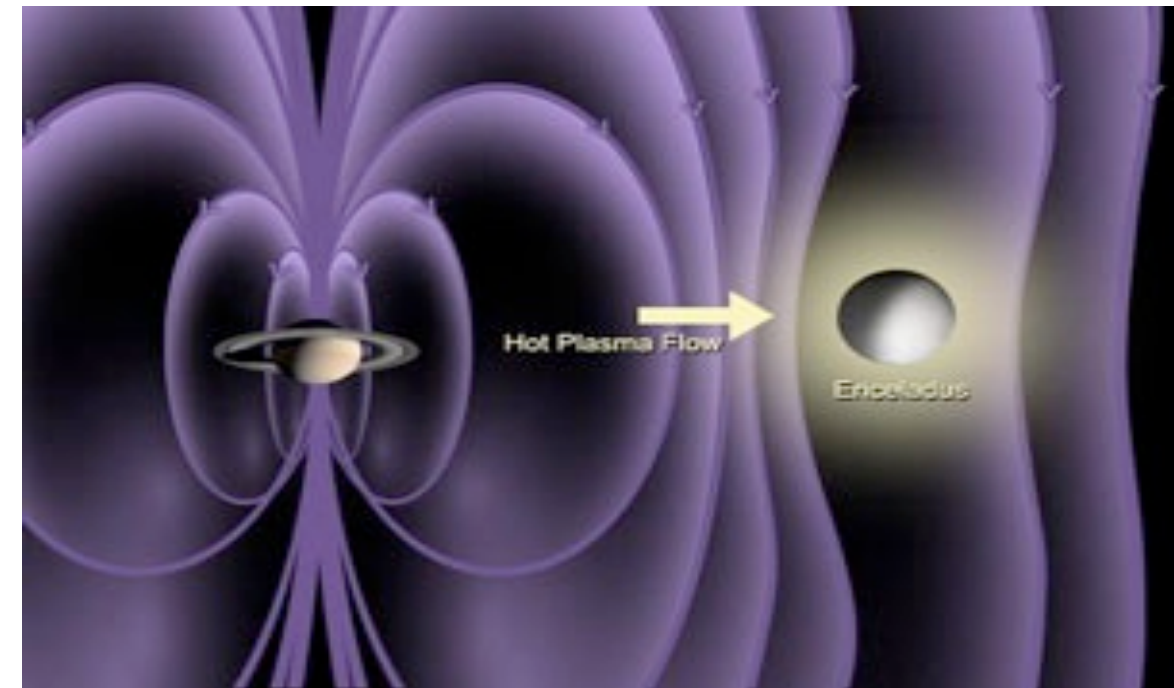
Downstream



Upstream

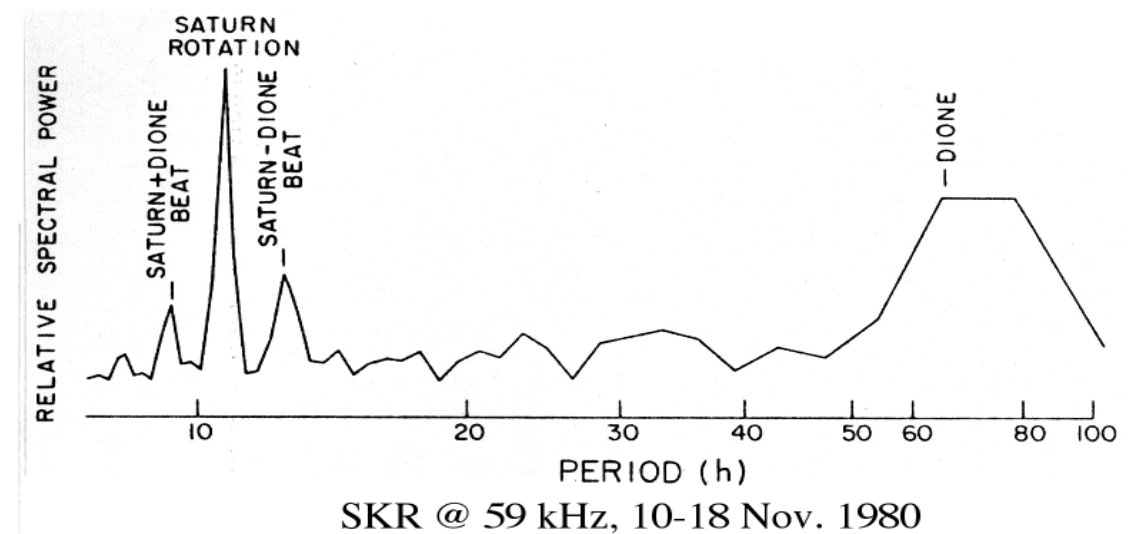
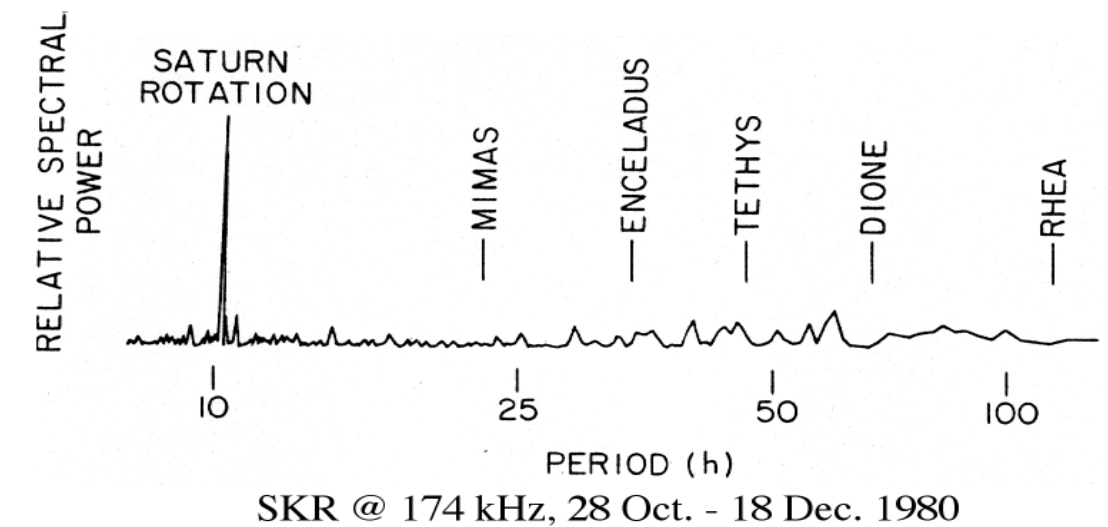
Saturne

- Encelade
→ exosphère (+panaches), empilement de B, interaction Alfvénique ?



- Dione ?

- Titan, Rhéa ?
→ interaction alternativement sub/super-Alfvénique dans/hors de la MS



→ émissions électromagnétiques induites ?

Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

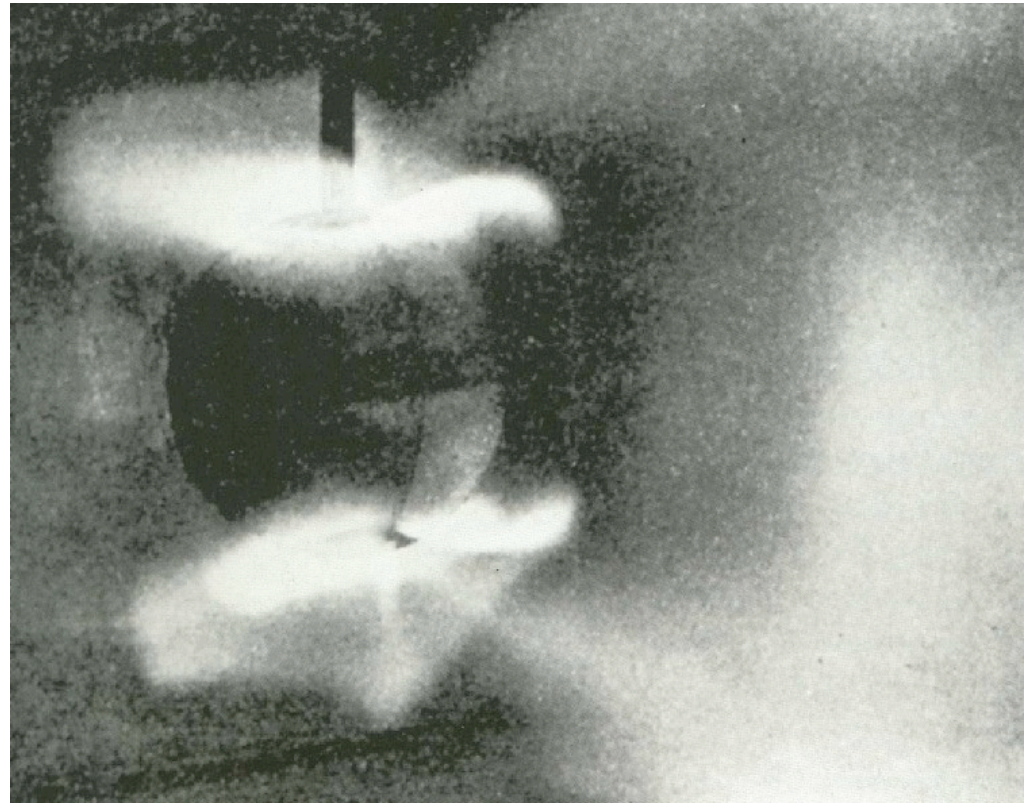
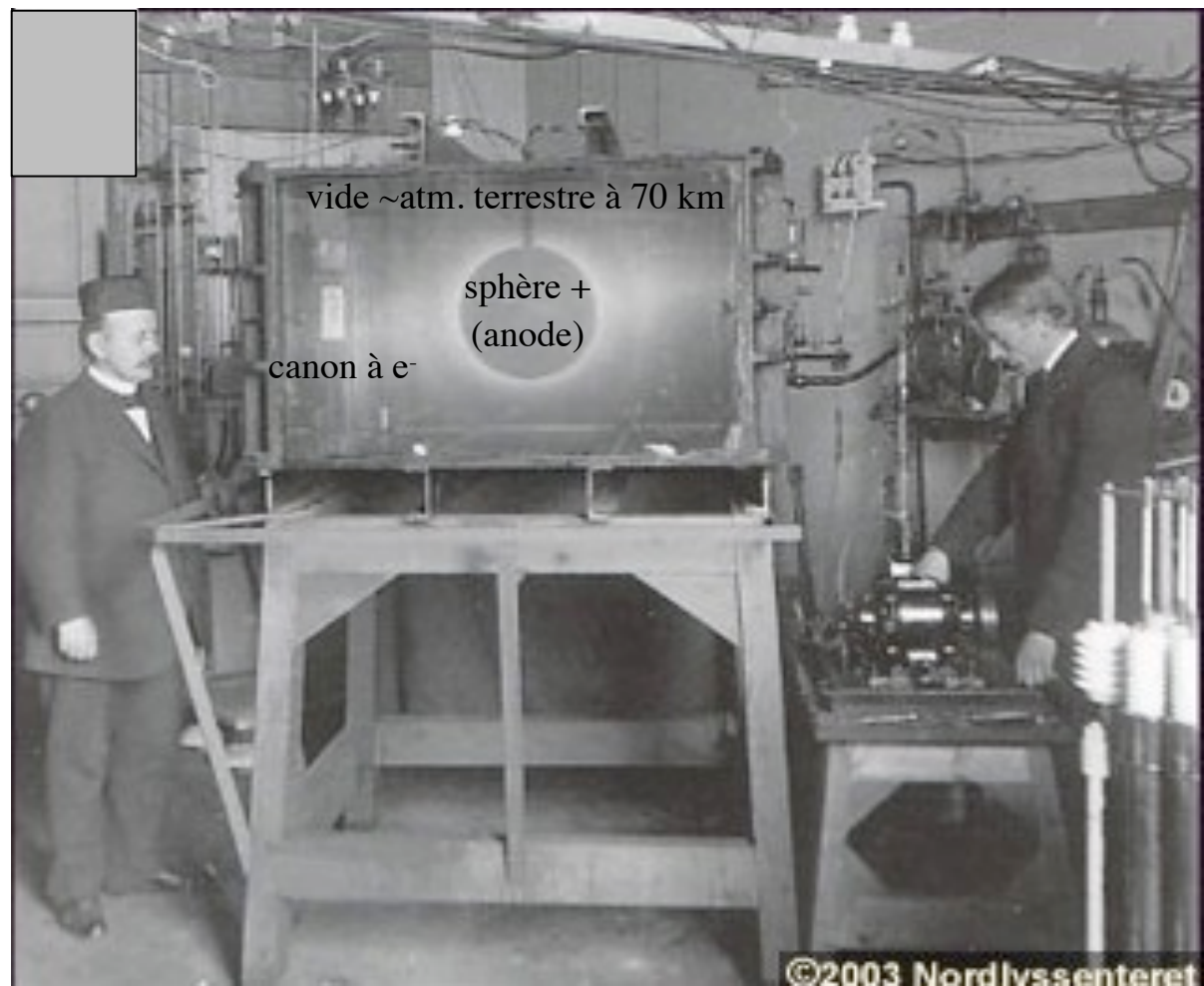
LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr

8. Physique et émissions électromagnétiques aurorales

8.1 Activité aurorale, Aurores diffuses / discrètes

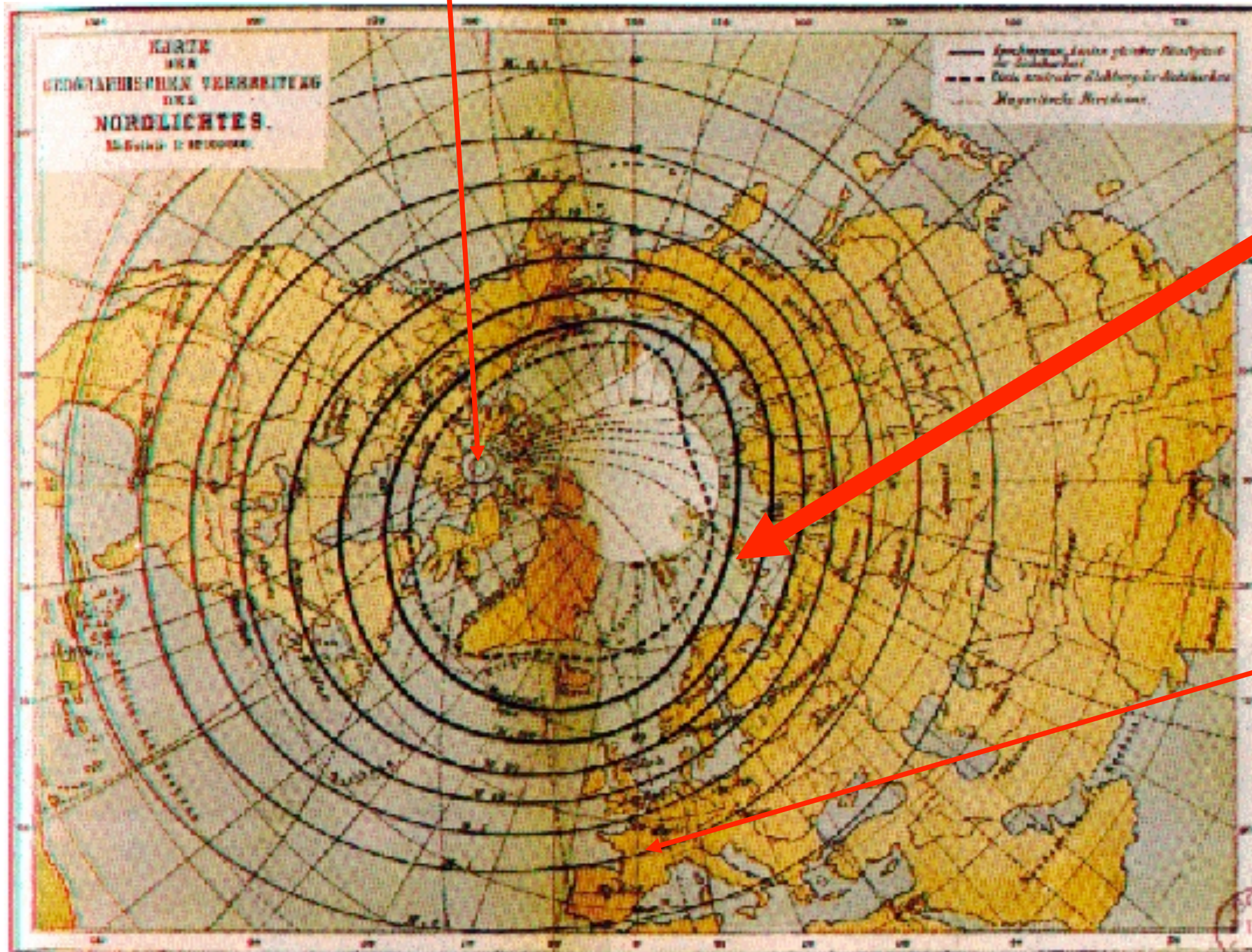
8.2 Émissions UV & IR atmosphériques

8.3 Émissions du faisceau



Terella de Birkeland (1910)

Pole nord magnétique



Laponie:
> 350 aurores
par an

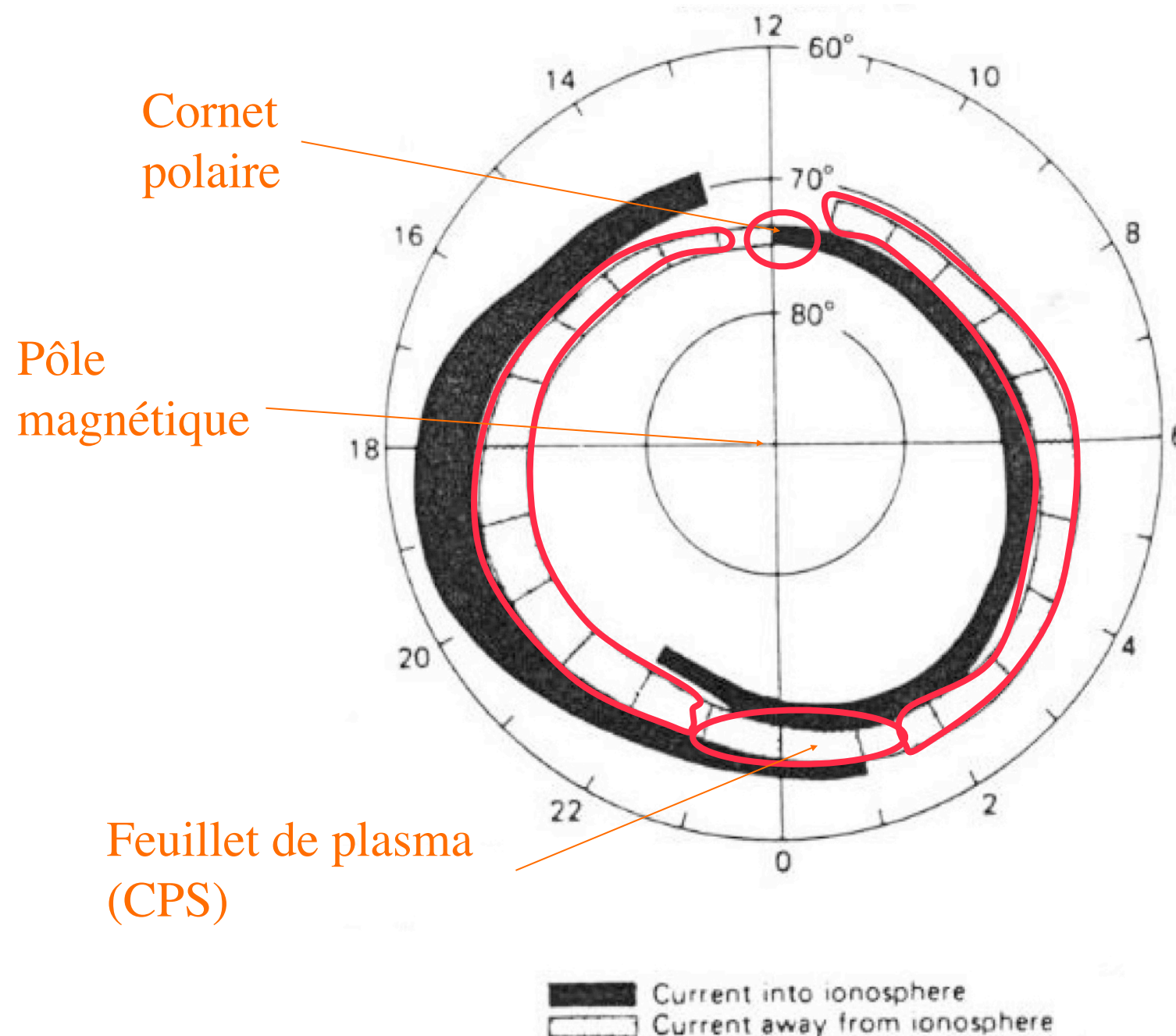
France :
2 aurores
par an

Milieu du 19^{ème} siècle : localisation de l'ovale auroral

8.1 Activité aurorale, Aurores diffuses / discrètes

Aurores diffuses

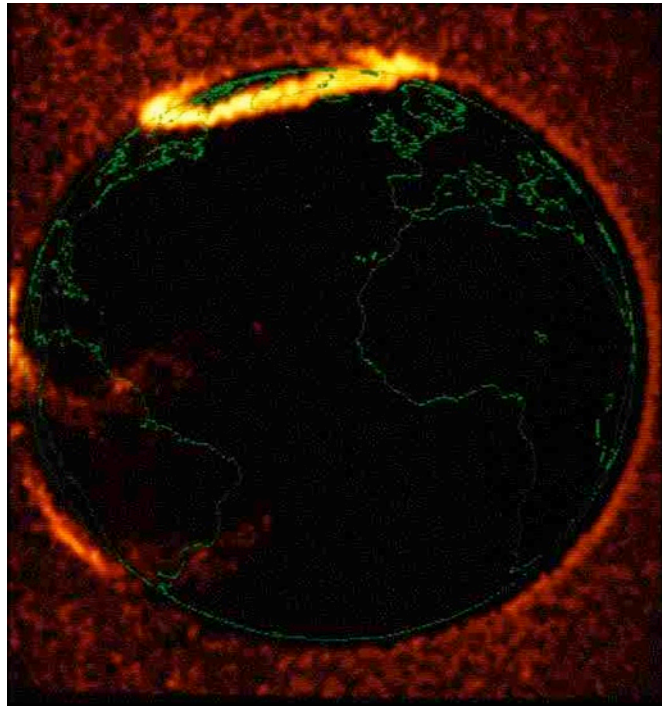
- Courants auroraux vers le haut → précipitations e⁻ vers le bas → _ovale diffus ~ permanent
- Côté nuit : projection //^t B du feuillet de plasma de la queue
précipitations par diffusion o-p des particules dans le cône de perte
- Côté jour : aurore associée à la projection //^t B du cornet polaire (& LLBL)



Aurores discrètes : arcs brillants, fins, variables → ovales circumpolaires magnétiques.

- Terre

Arcs discrets au bord polaire de la zone aurorale = limite entre lignes de B fermées (type 1) et semi-ouvertes (type 3, calotte polaire) [=couche limite du feuillet de plasma]



La Terre «couronnée

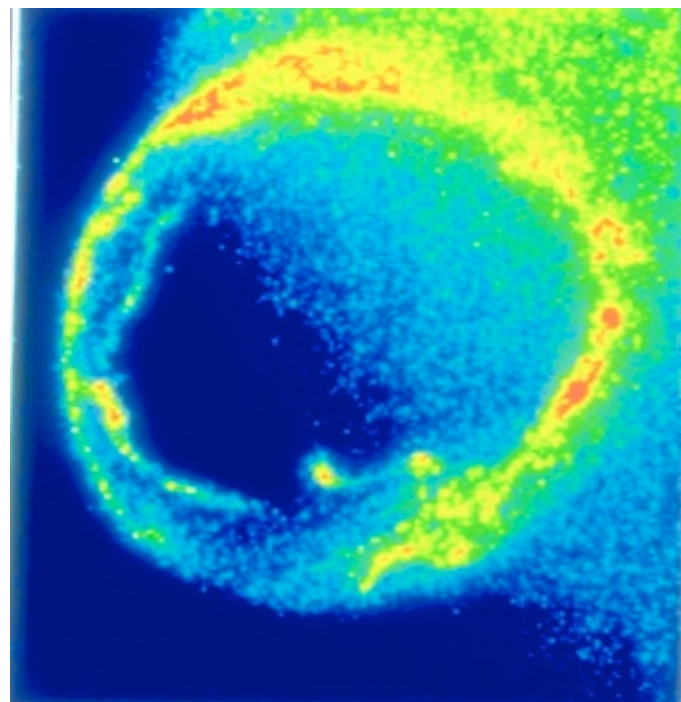
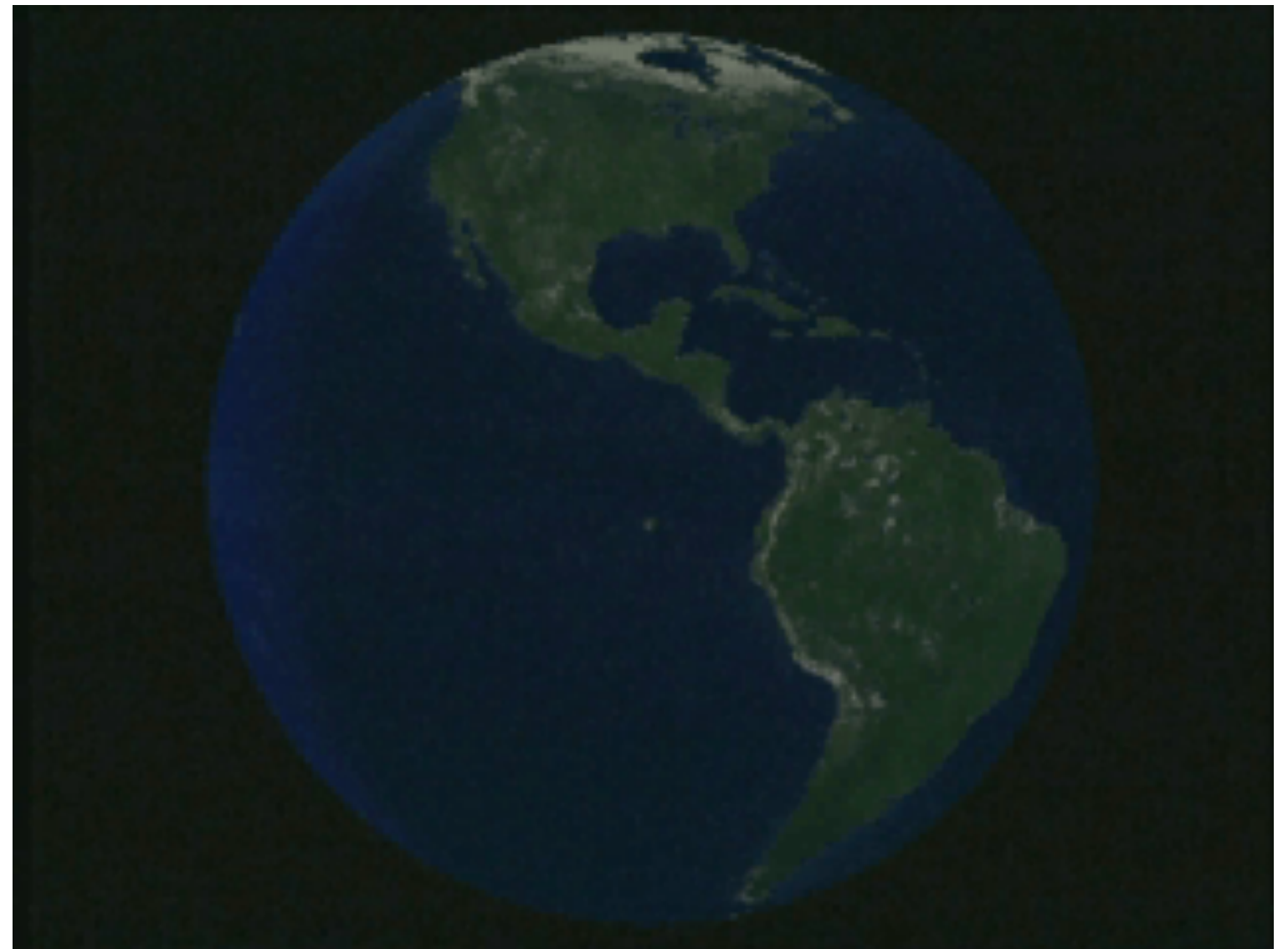


Image UV de Viking



• Sous-orage

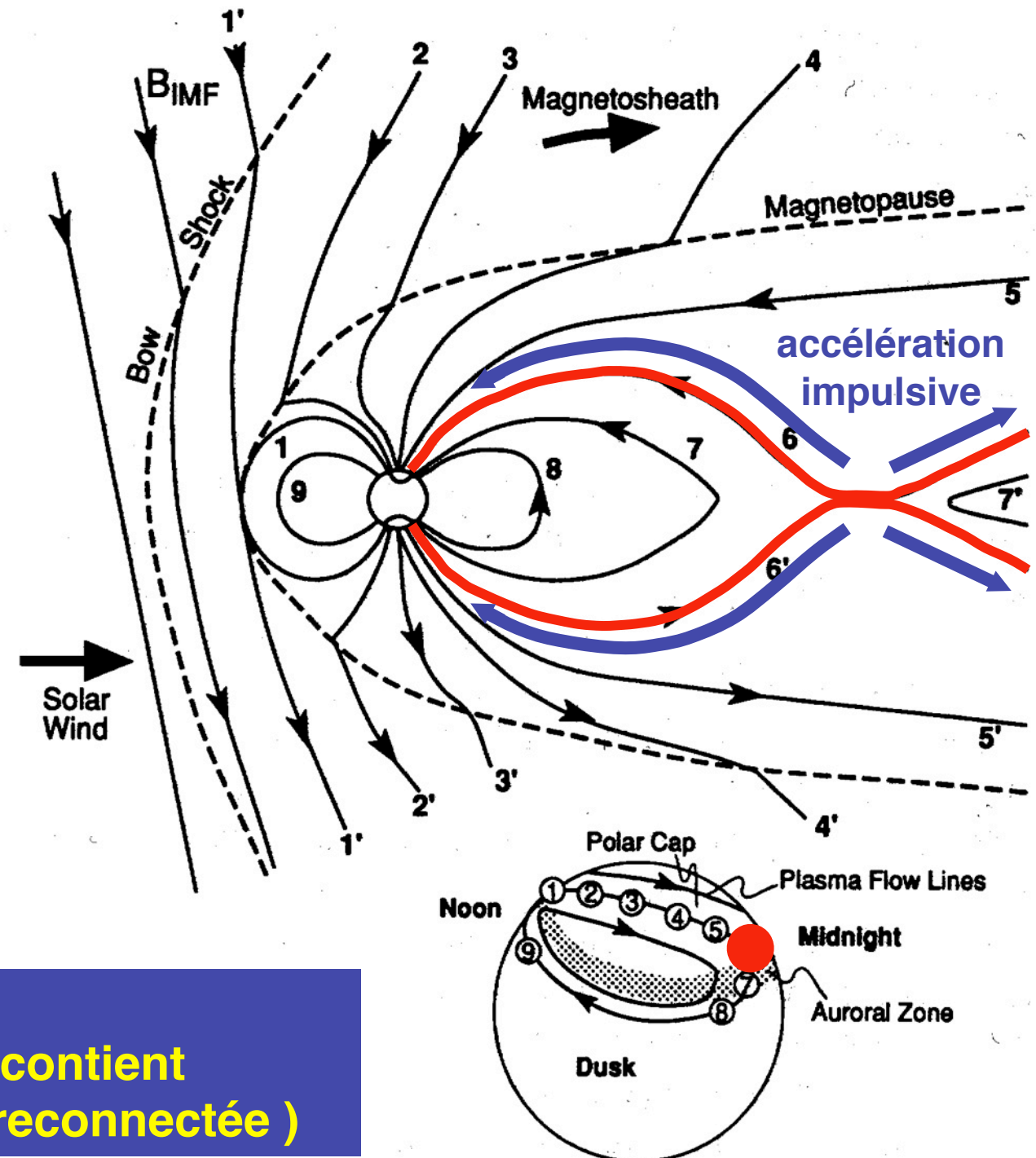
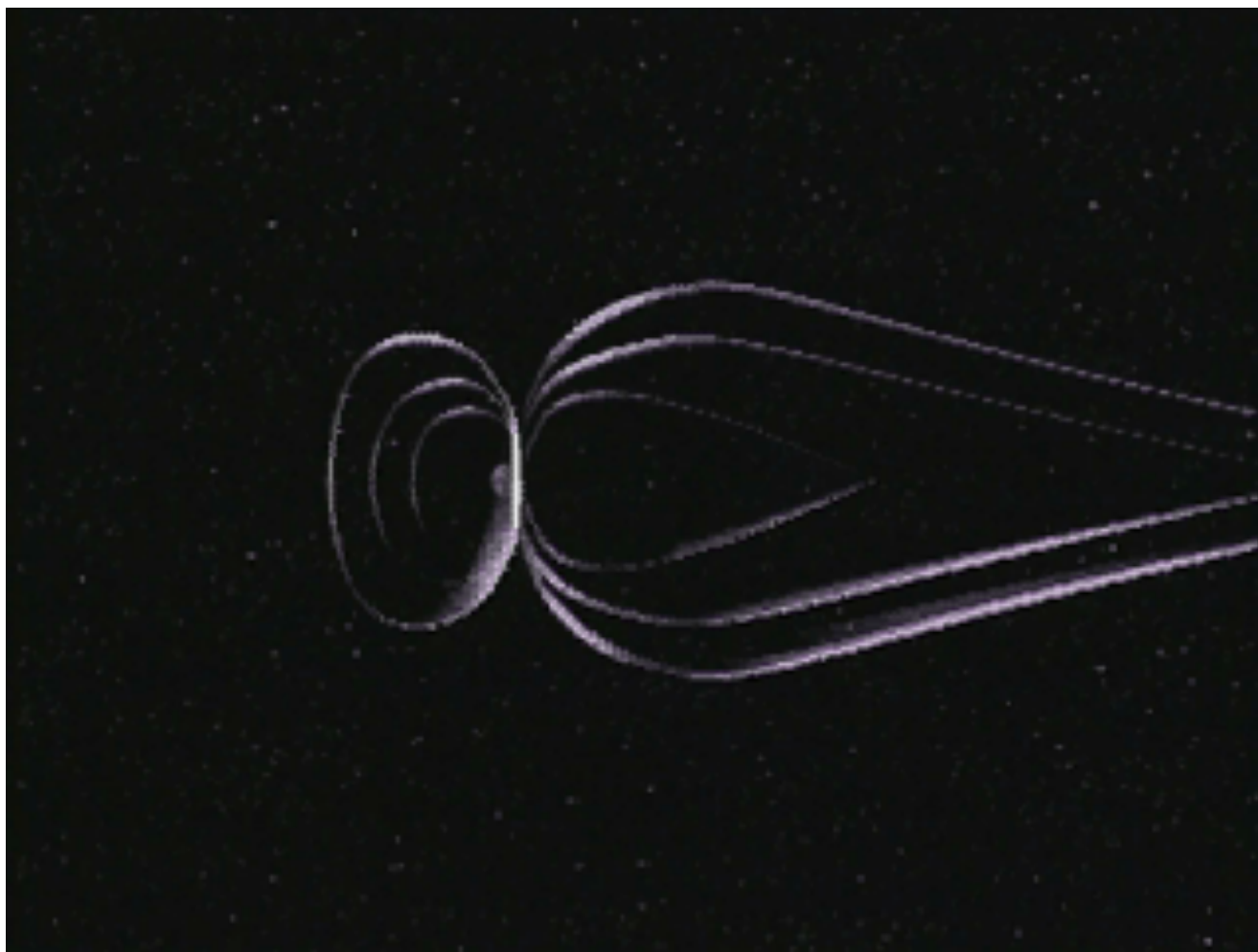
Après reconnexion sporadique des lignes (3)→(1) dans la queue (@ 20-200 R_T ?) sous l'effet du B_Z sud, le plasma est entraîné vers la planète, + éjection d'un plasmoïde

→ compression adiabatique du fait de la diminution de volume des tubes de flux

→ e^- portés au keV (via $E_{||}$ à grande échelle à $z \sim \text{qq } R_T$? doubles-couches ? ondes d'Alfvén ?)

→ précipitations aux hautes latitudes //t $\mathbf{B}$ → aurores (maximales côté nuit, $\sim 23 \pm 1$ h LT)

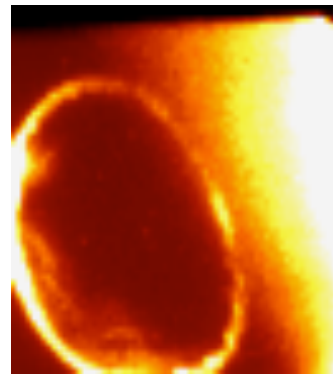
→ Les ions alimentent les régions externes des « ceintures de radiations »



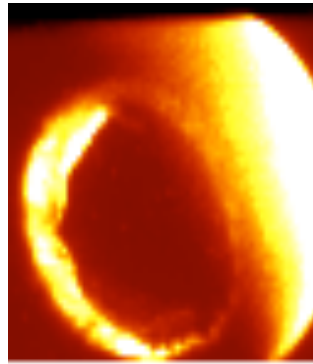
libération d'énergie
(la configuration "étirée" contient
plus d'énergie que celle "reconnectée")

Réponse aurorale à un sous-orage :

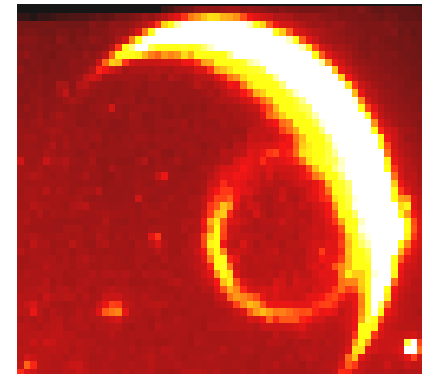
- Chronologie (total = 1-2 h) :
 - suite à la reconnexion diurne, expansion de la calotte polaire + aurore au pied du cornet polaire,
 - puis intensification aurorale vers ~minuit à la reconnexion dans la queue, expansion en TL
 - décroissance du $\varnothing$ de l'ovale avec la redipolarisation du champ magnétique



11:25

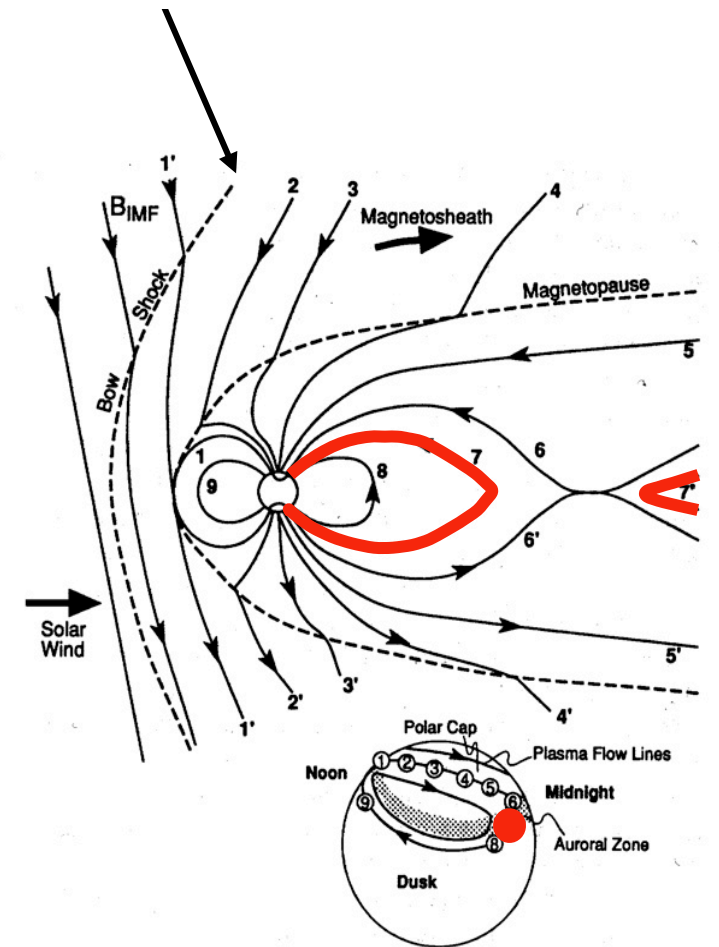
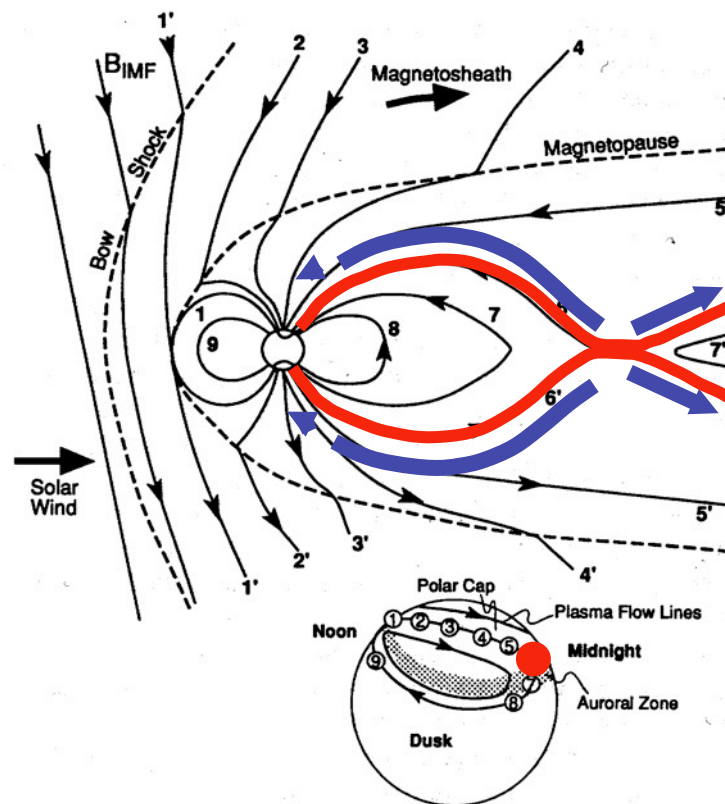
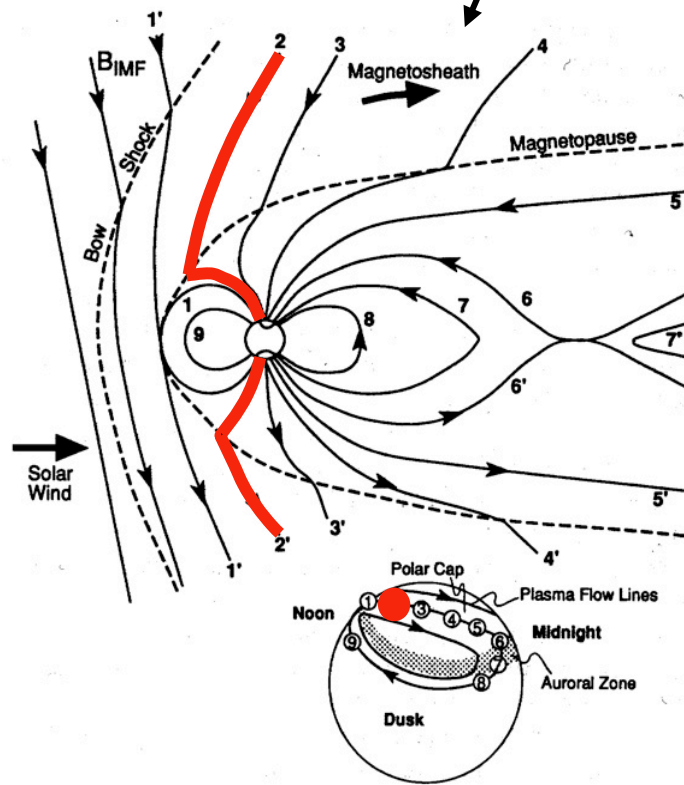


11:56



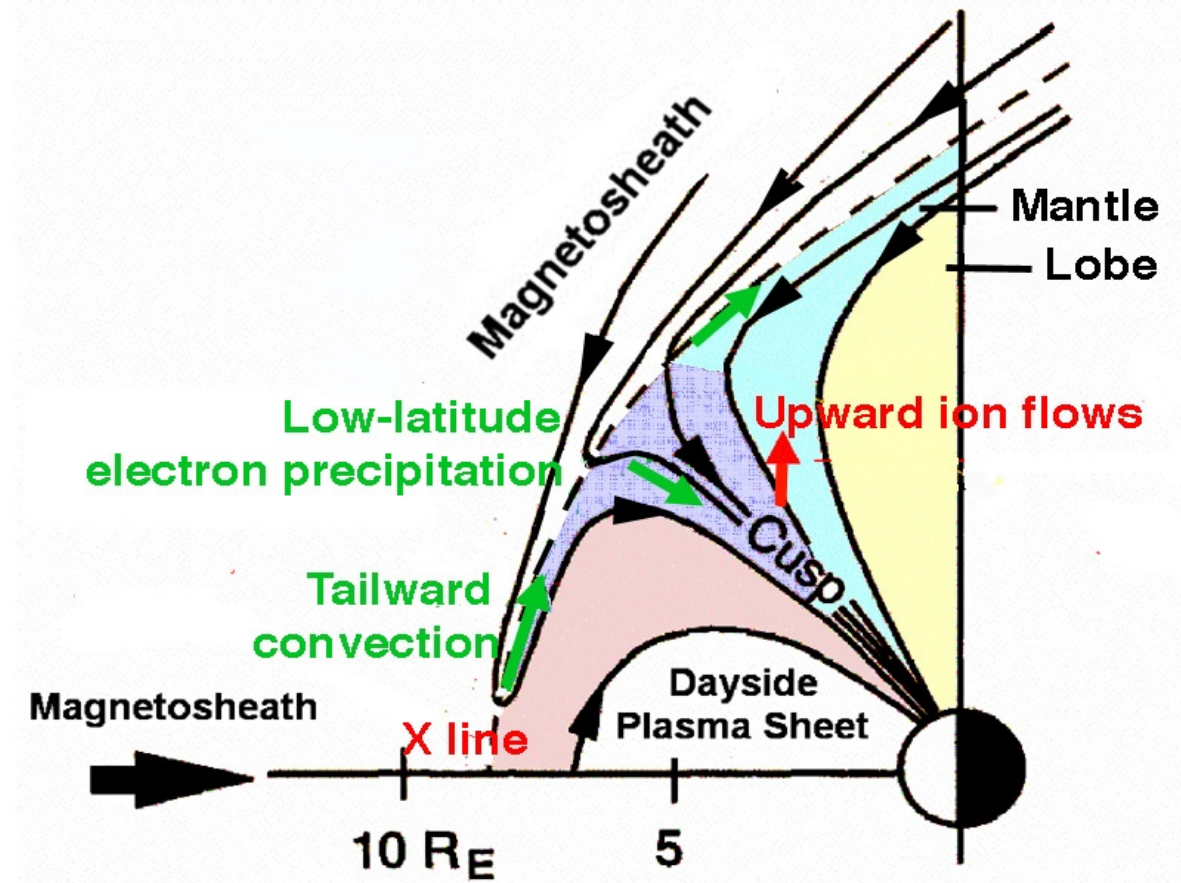
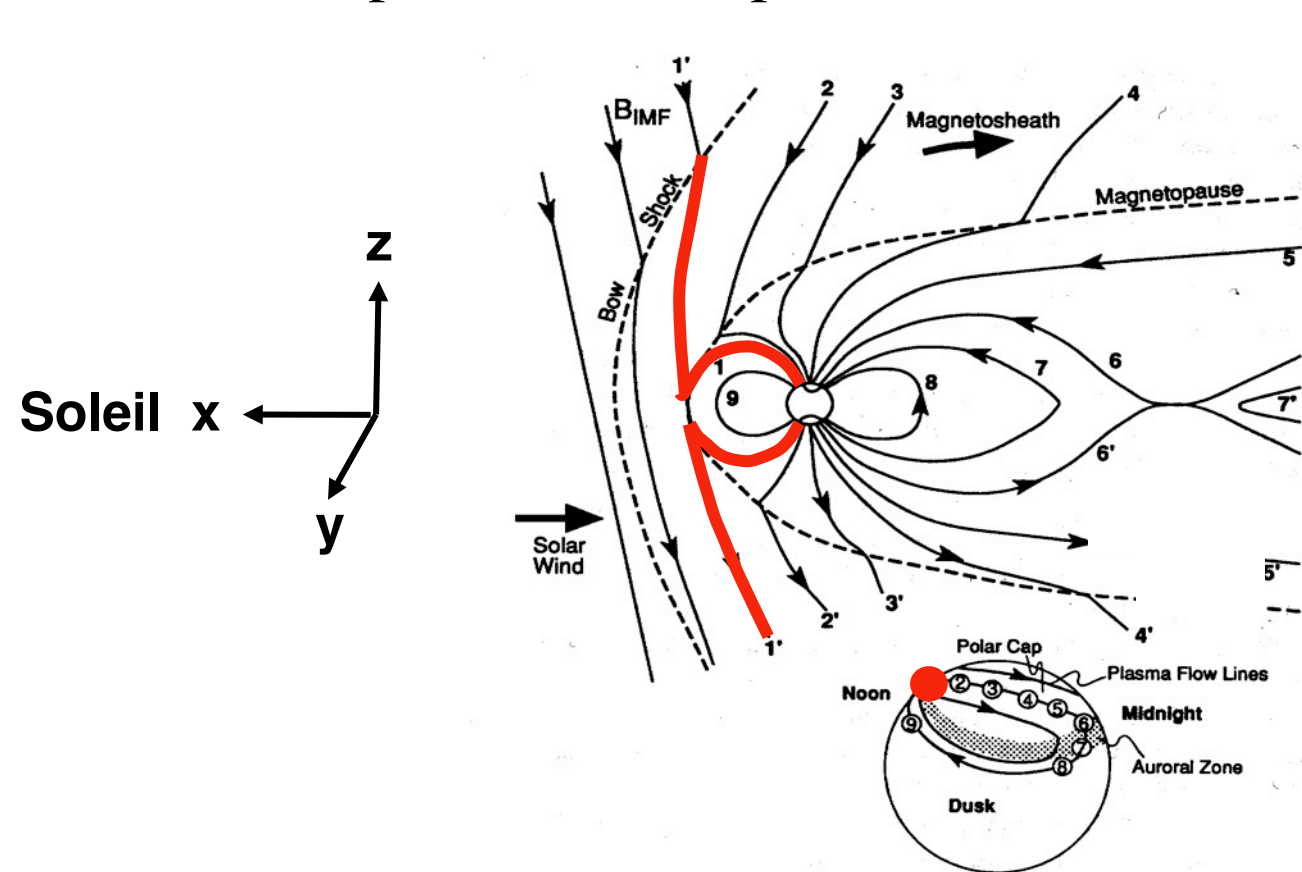
16:18

Doy 315, 2000

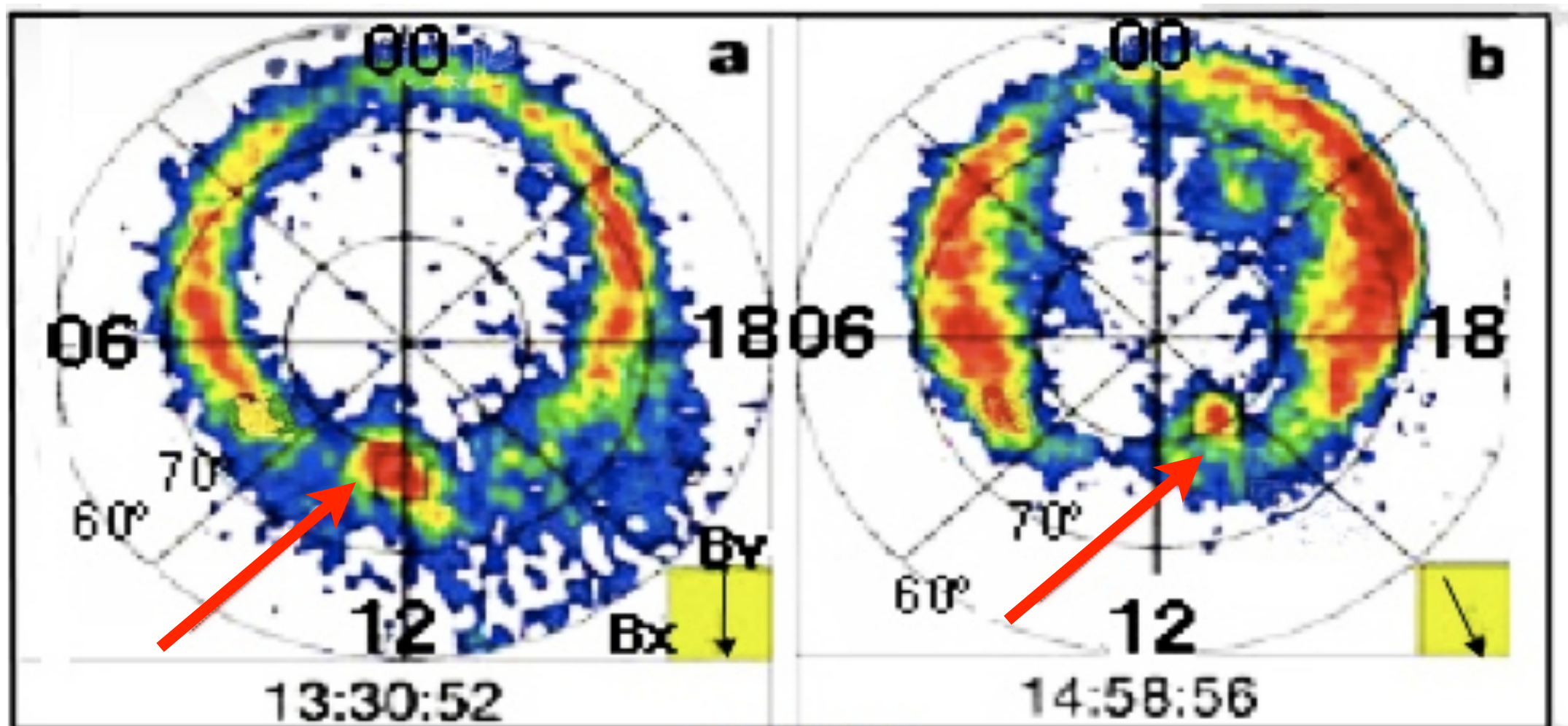


- Puissance émise $\sim 10^{11-12}$ W durant une aurore brillante, contre $\sim 10^9$ W en période calme.

- Aurore au pied du corneet polaire : reconnexion en $B_z < 0$



Soleil
x
y

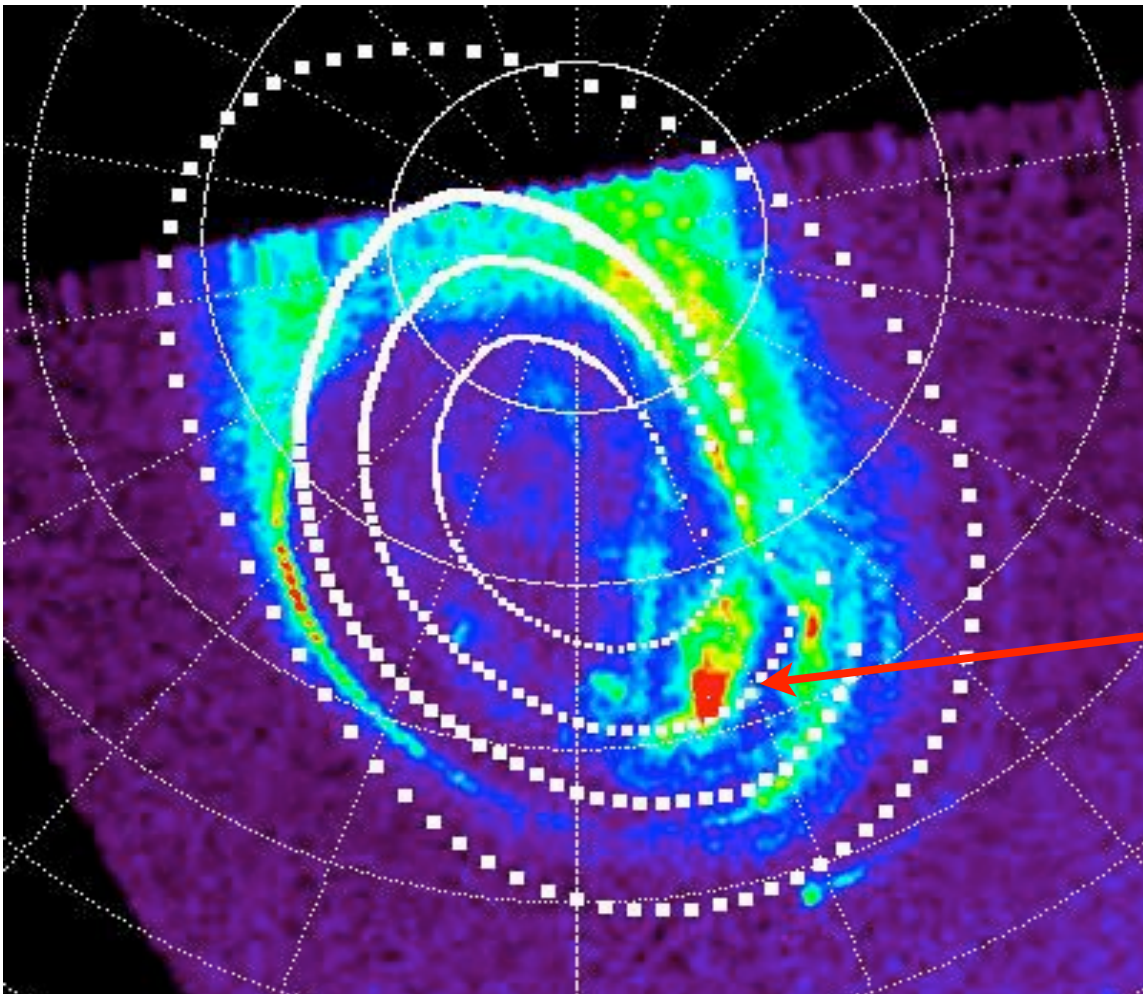
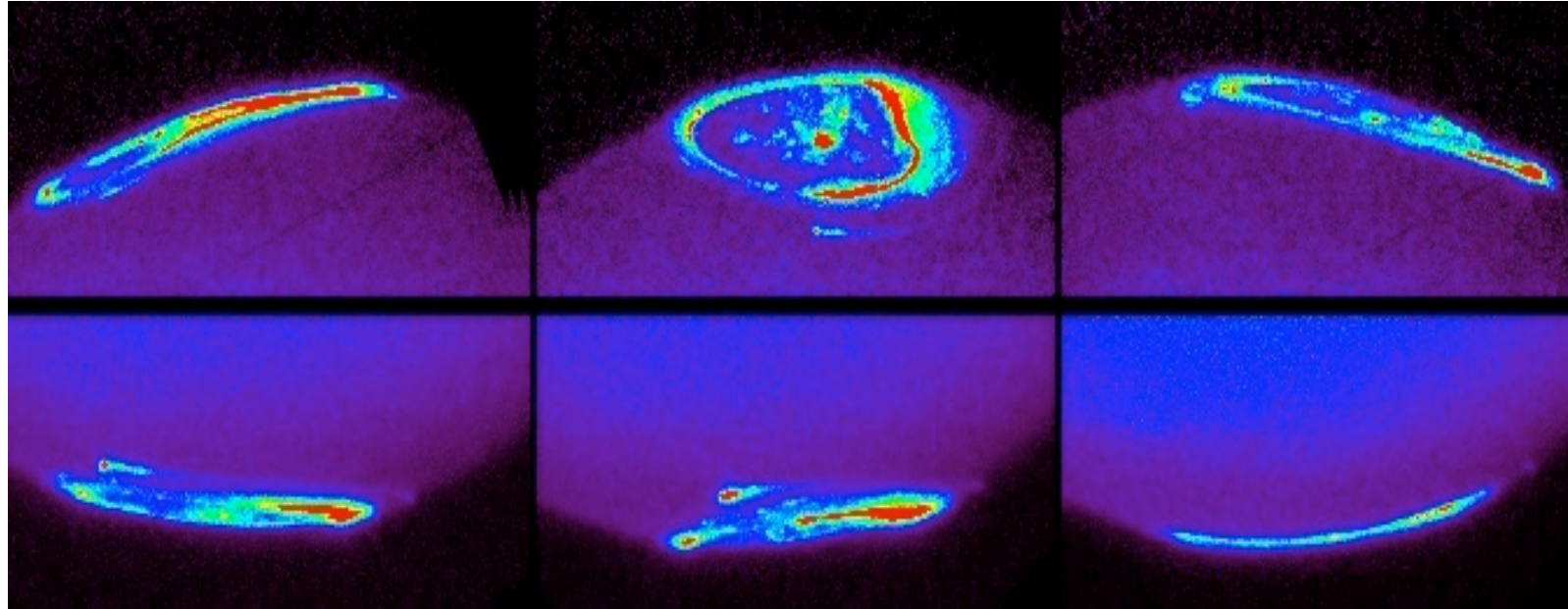


- Jupiter

Ovale auroral < 500 km de largeur !

Puissance émise $\sim 10^{13-14}$ W

Forme $\rightarrow$ topologie de B_J avec anomalie magnétique N, rotation globale avec la planète



$\rightarrow$ Cornets polaires ?

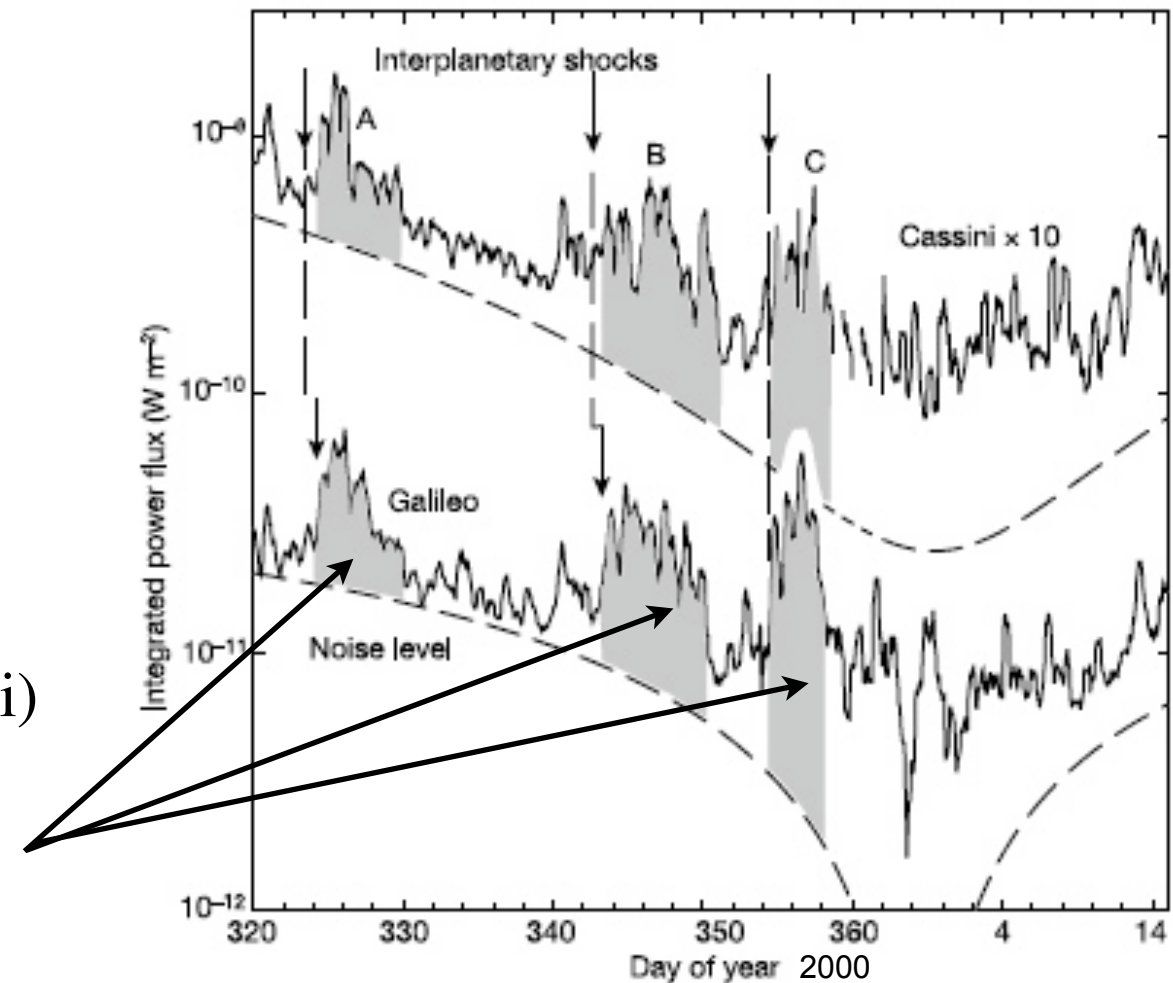
Émission observée vers 12h TL magnétique (Ok / modèles de B), + intense pour $B_z \gg 0$

$\rightarrow$ indicative de reconnections sporadiques (à l'échelle de 20 minutes - Terre : 5-10 minutes)

- Passage en sous-corotation vers $20-50 R_J \rightarrow j_{\perp} \rightarrow j_{\parallel}$
 $\rightarrow$ Prédiction d'une augmentation de l'activité aurorale lors des dilatations de la MS ? (besoin de mise en corotation $\uparrow\uparrow$)

$\rightarrow$ plutôt observée lors des Orages = compressions à grande échelle de la MS, sur des dizaines d'heures

Flux radio (Galileo, Cassini)
et UV (HST) $\uparrow$ lors de
compressions de la MS

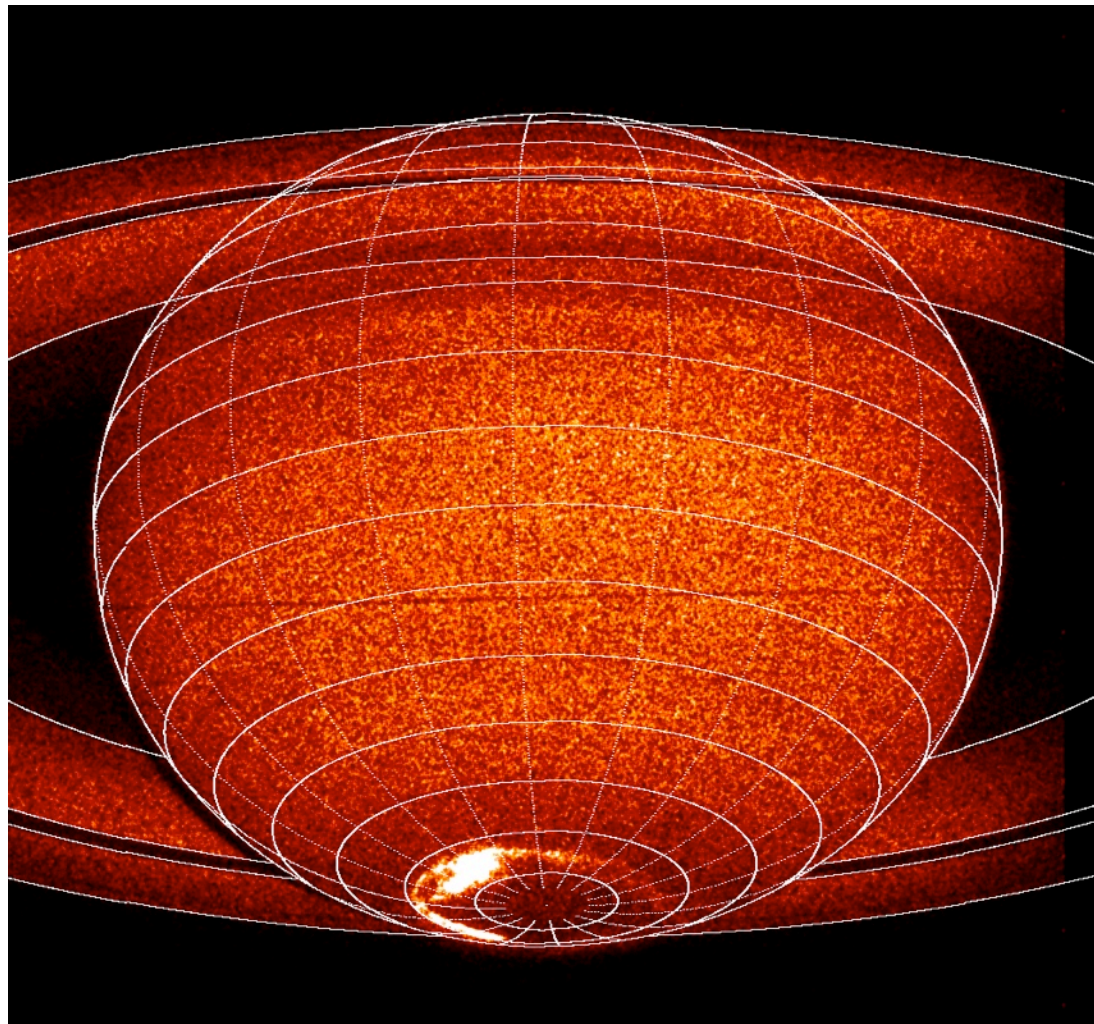


- Saturne

Situation intermédiaire entre Terre (contrôle externe de la dynamique) et Jupiter (contrôle interne) ?
Aurores observées principalement côté matin → car cisaillement de vitesse entre magnétogaine & MS maximum. Puissance $\sim 10^{11}$ W

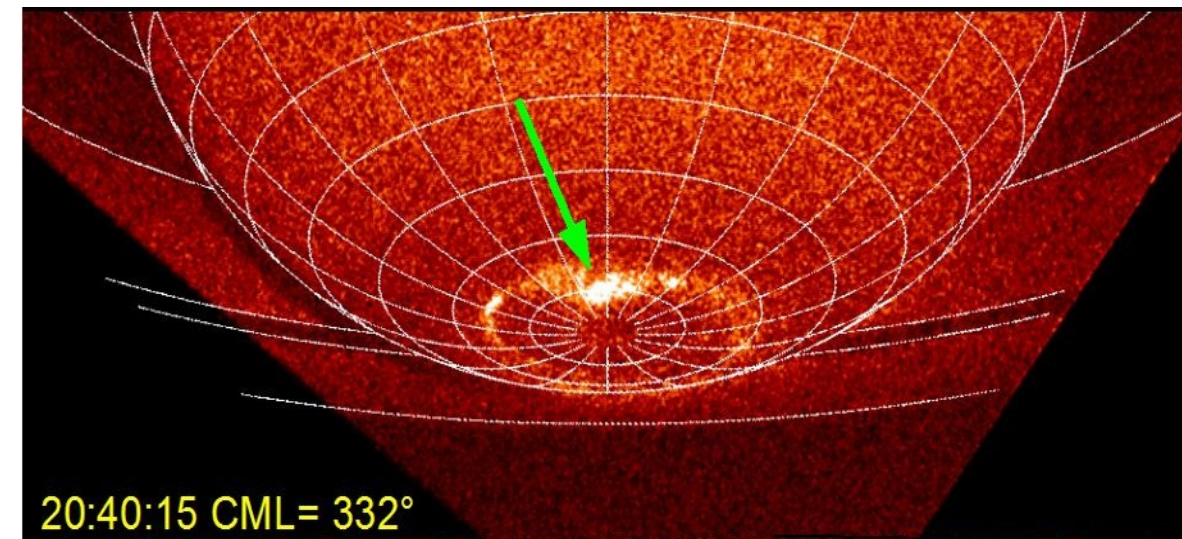
→ Cornets polaires ?

Émission observée vers 12h TL
magnétique, liée aux compressions par
le vent solaire

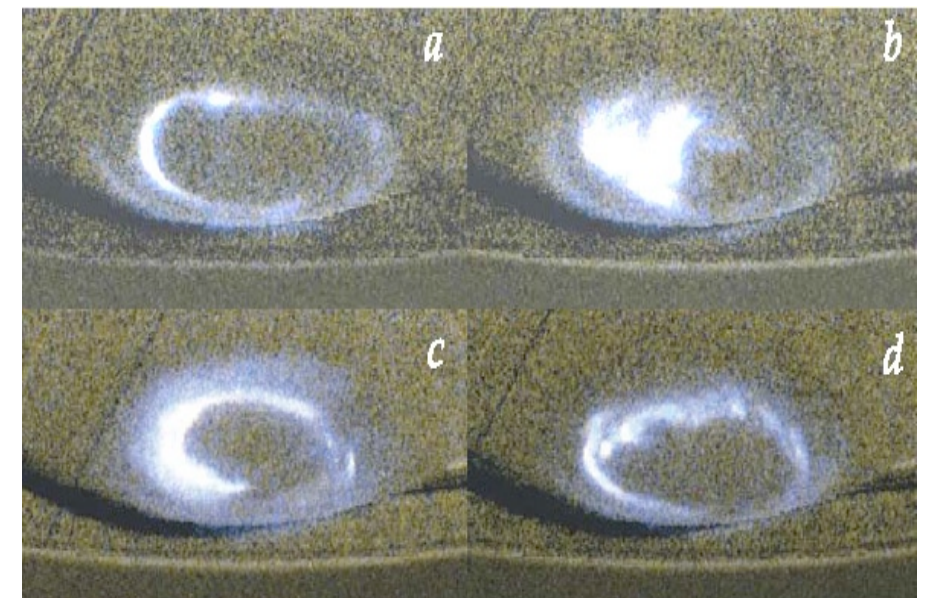


matin

soir



Aurores spirales : signature de sous-orages
+ corotation (Dungey + Vasyliunas) ?



- Résumé

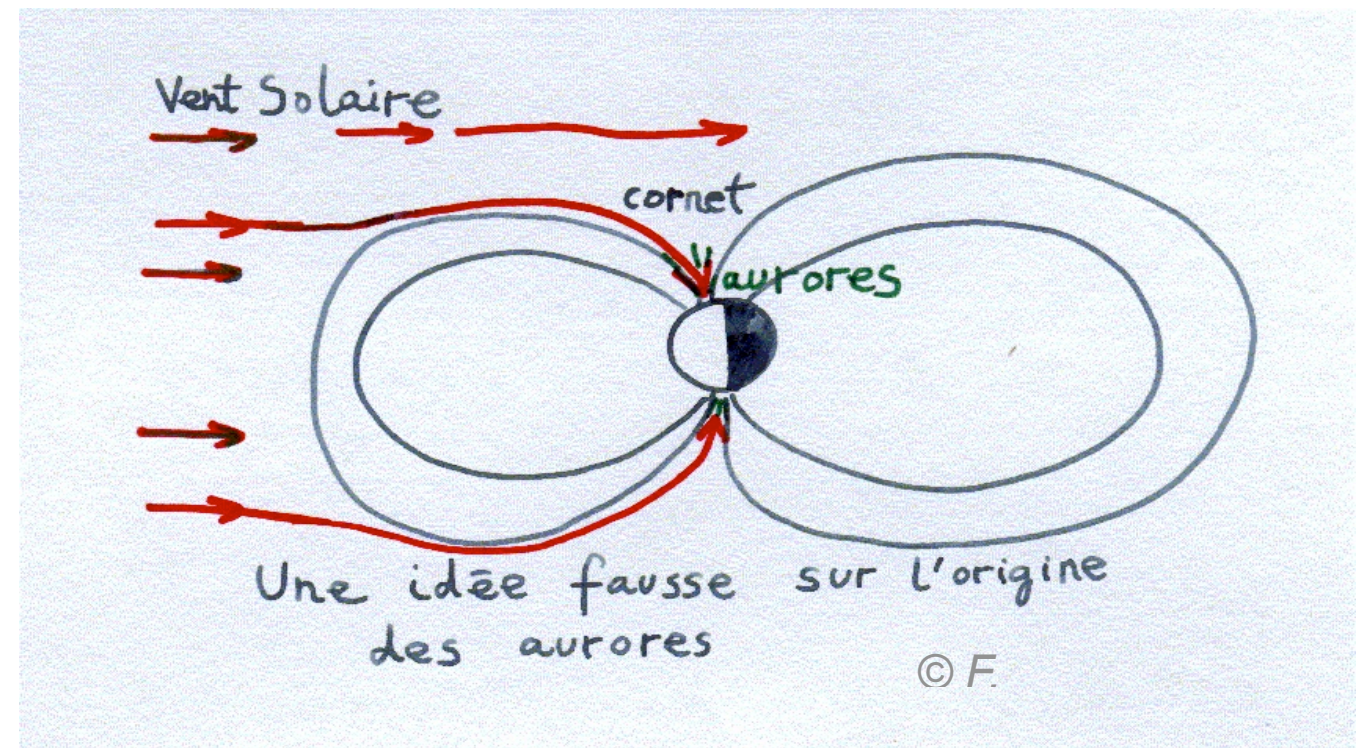
La Terre, Jupiter & Saturne produisent des émissions aurorales à la frontière des lignes de B ouvertes/fermées, liées à des courants alignés à B : sur Terre, les courants sont liés à la convection/VS, sur Jupiter & Saturne, ils sont liés à la (co)rotation

Reconnexion dans la queue : sur Terre (et Saturne?), gouvernée par le VS (Dungey), sur Jupiter par des processus internes (plasmoïdes) & la (co)rotation (Vasyliunas)

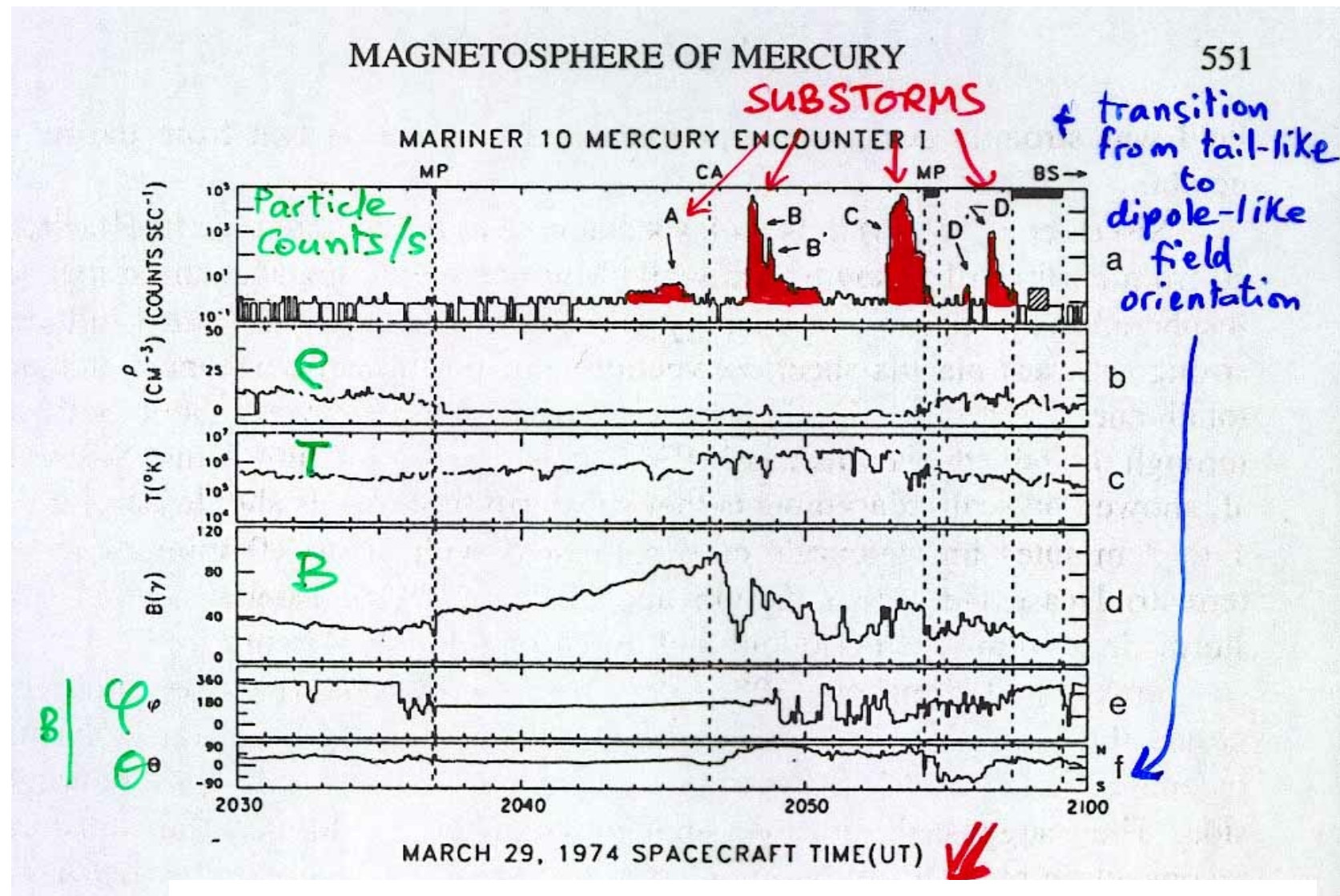
Contrôle de la puissance aurorale par le vent solaire via reconnexion magnétique @ la Terre et Saturne, les compressions de la MS @ Jupiter (& Saturne et la Terre)

Émissions pulsées dans le corneet polaire, contrôlée par le VS

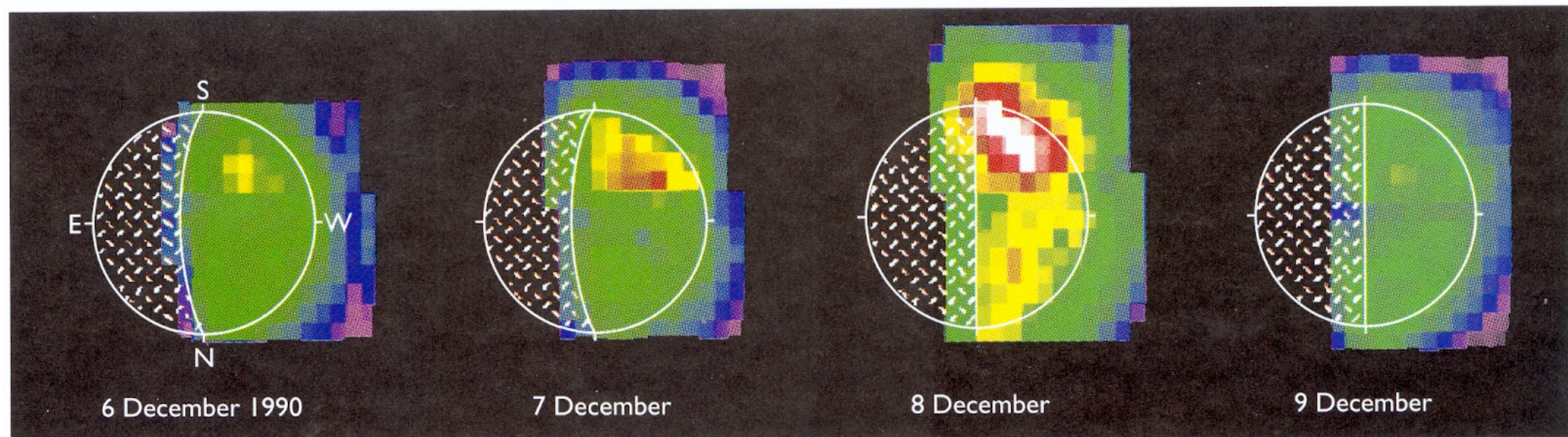
Constantes de temps très différentes dans les 3 magnétosphères.



- Mercure : sous-orages & aurores de Sodium ?



4 "substorms" on average 30 times shorter than those on Earth



8.2 Émissions UV & IR atmosphériques

- Précipitations d'électrons > 0.1 keV, protons & ions $>$ quelques keV
- point miroir dans l'atmosphère < 300 km → collision fréquentes

Collision avec neutre atmosphérique → excitation

→ désexcitation spontanée par émission d'un photon visible (ci-dessous) ou UV (N_2^+ , N, H).

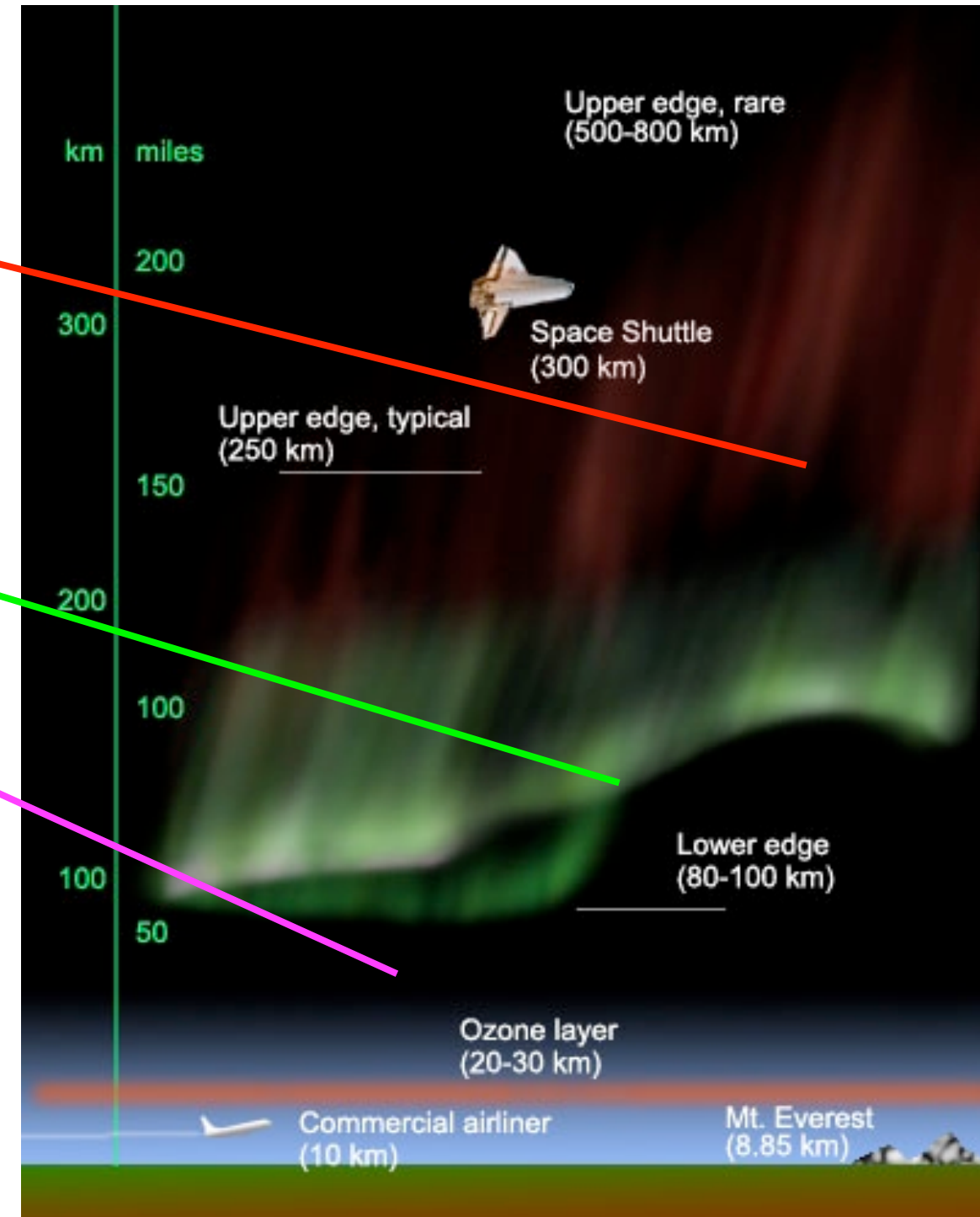
Terre

raie rouge de O > 200 km

raie verte de O (577.7 nm) entre
100 et 200 km, suite à excitation
collisionnelle par un e^- secondaire
($e^- \rightarrow N^* \rightarrow e^- \rightarrow O^*$)

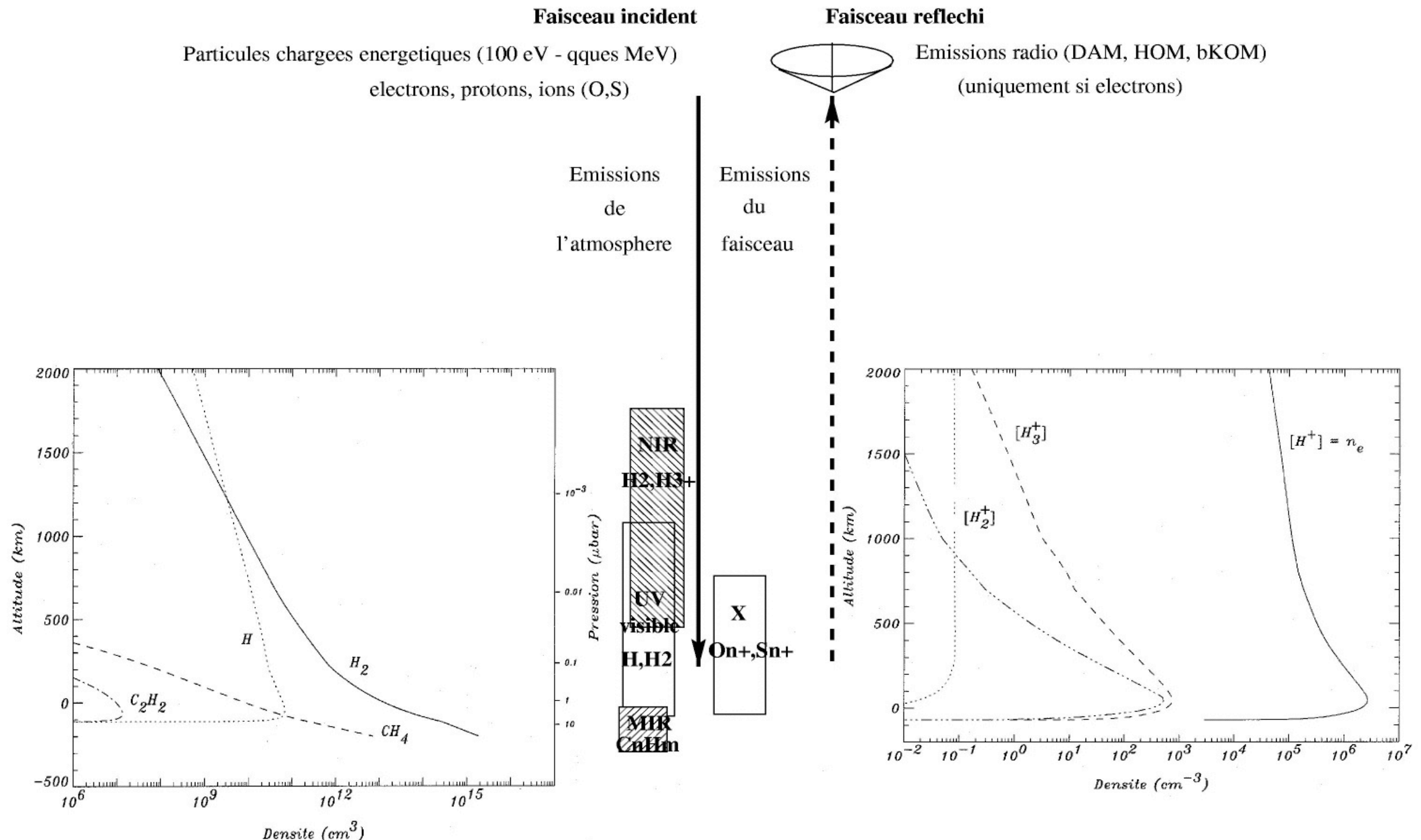
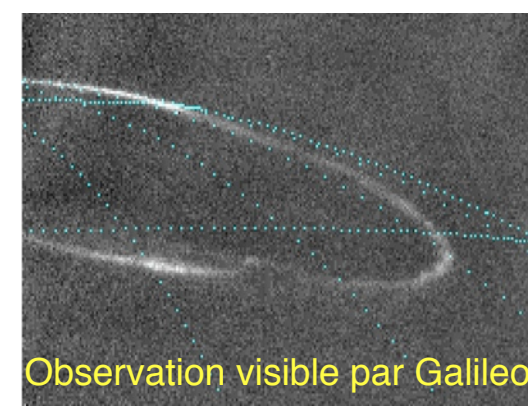
raie violette de $N_2 \leq 100$ km

- Aurores = projections sur la haute atmosphère des régions et de l'activité MS ~ tube cathodique
 - géométrie convergente de B $\Rightarrow$ régions petites $\Rightarrow$ études possible avec haute résolution angulaire $\ll 1''$ (HST-STIS & FOC $\sim 0.02''$)
 - + dépend de modèles (pénétration, transfert)



Jupiter : H, H₂

- UV : Ly- α 121.6 nm, bandes Lyman & Werner de H₂ 80-165 nm
- Visible : H α , H β très faibles / réfléchi solaire côté jour)
- IR : dû au chauffage atmosphérique $\rightarrow$ H₂+h ν $\rightarrow$ H₂⁺ + e⁻ & H₂⁺ + H $\rightarrow$ H₃⁺
H₃⁺ = ion le plus abondant après H⁺ en zone aurorale $\rightarrow$ transitions de ro-vibration en NIR (2-4 μ m)
énergie déposée vers P=1-2 μ bar $\sim$ sommet des couches de C_nH_n $\rightarrow$ émissions MIR $\sim$ 10 μ m



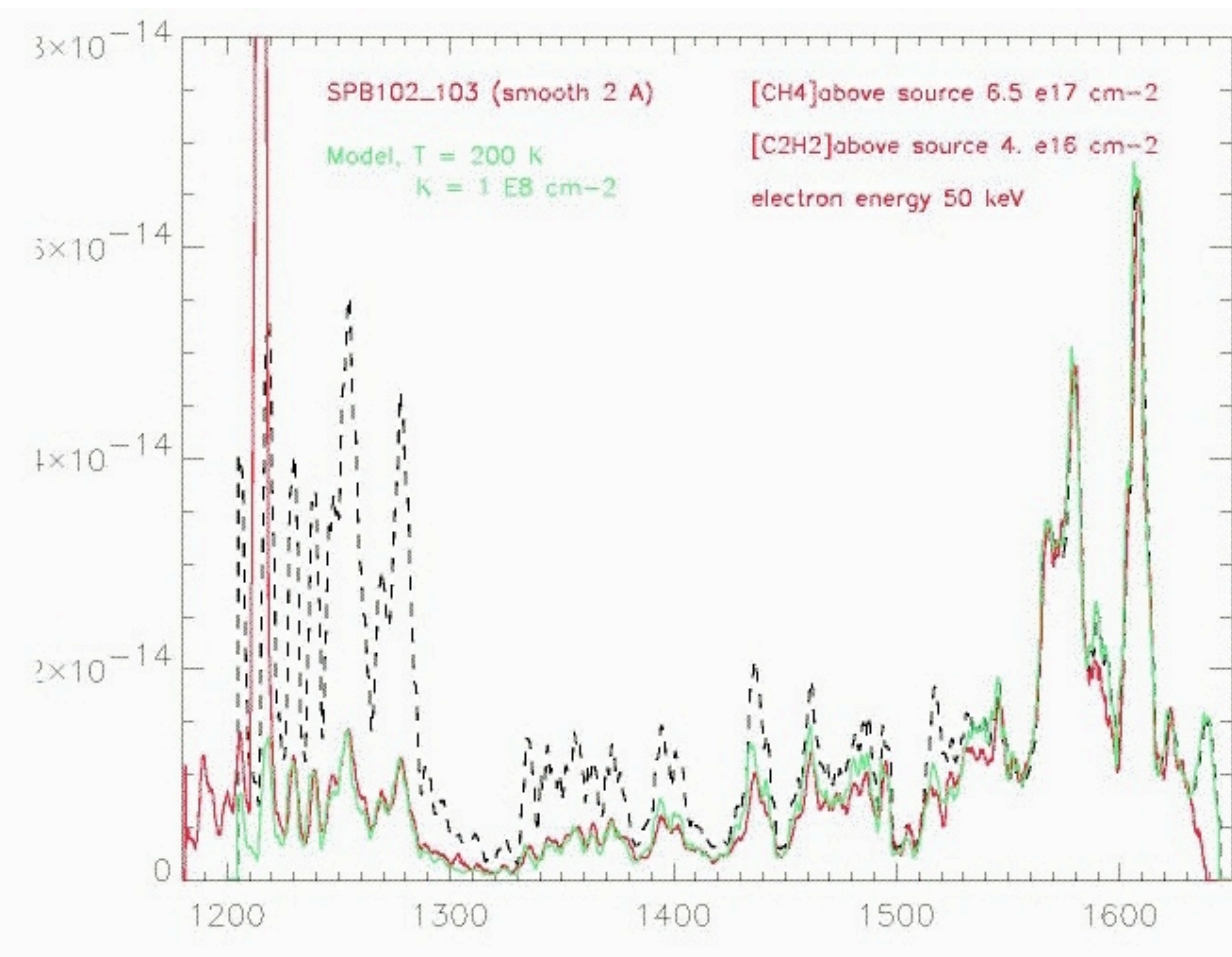
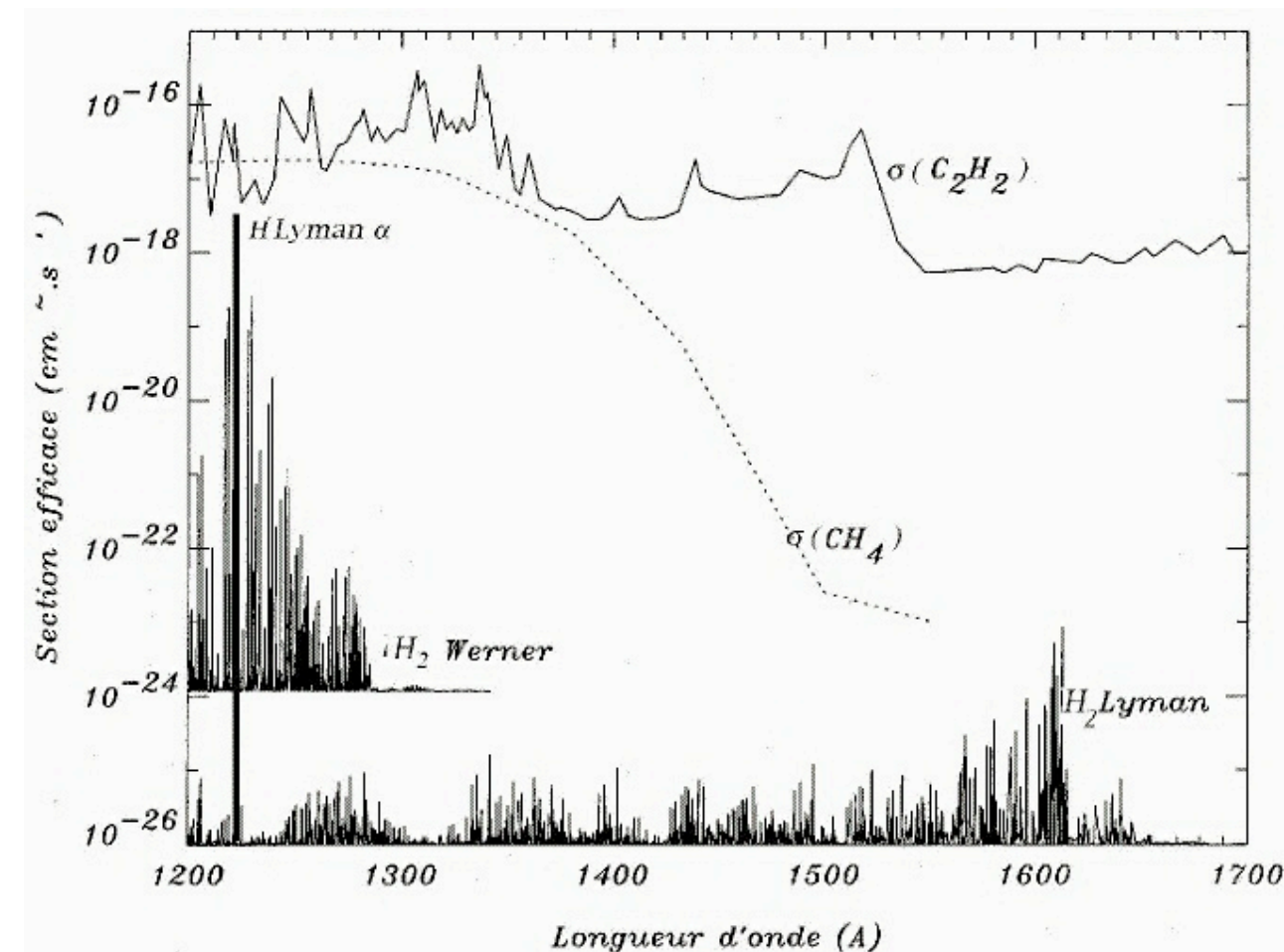
- Spectroscopie UV → nature et énergie du faisceau

Jupiter : absorption par les hydrocarbures très dépendante de λ

→ par comparaison du spectre H, H₂ observé / labo

→ profondeur de la source / couche d'hydrocarbures

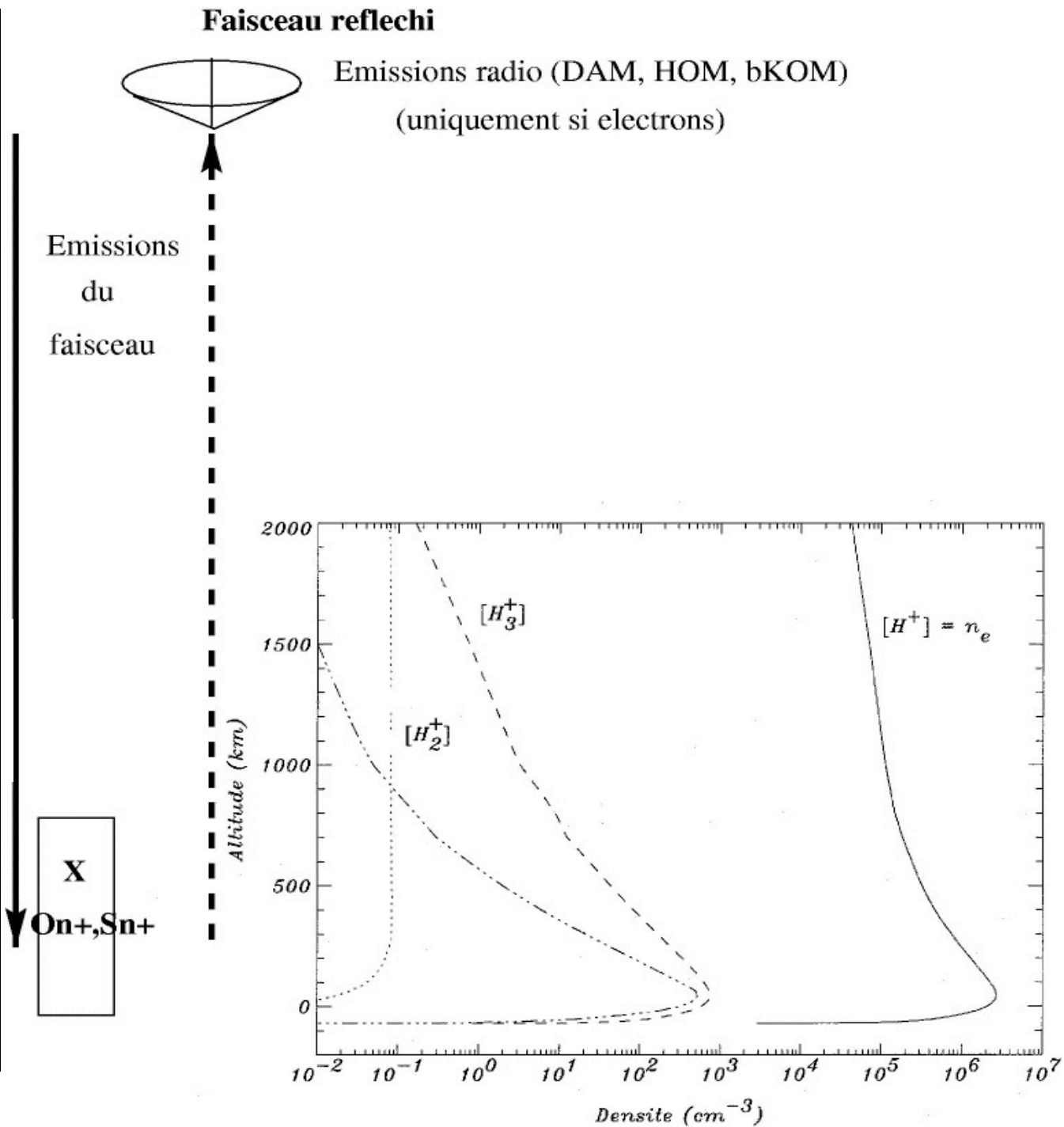
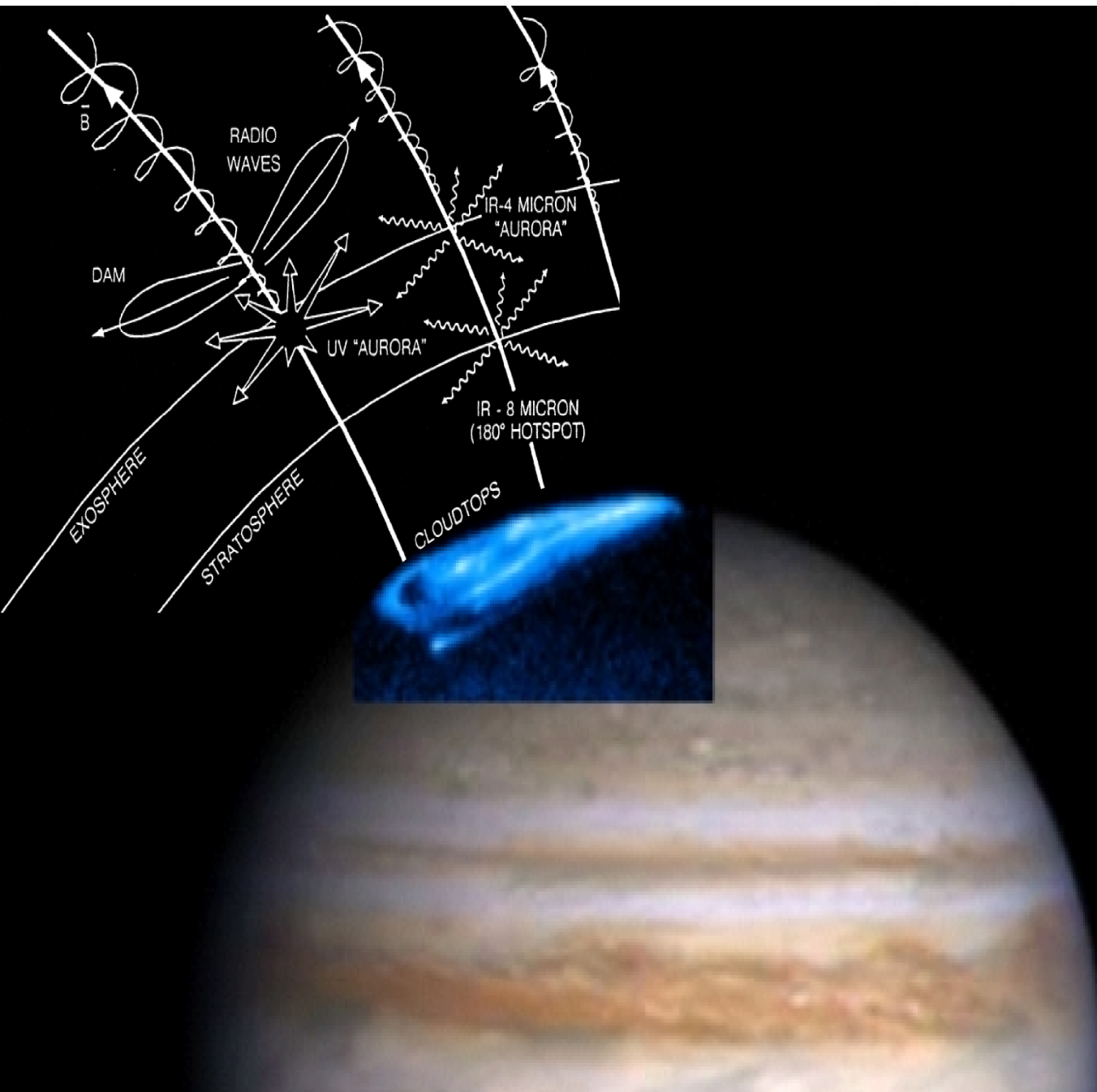
+ modèle d'atmosphère → énergie et nature des particules incidentes



→ Précipitations aurorales (électrons) ~10¹¹⁻¹² W (Terre), ~10¹³⁻¹⁴ W (Jupiter)

8.3 Émissions du faisceau

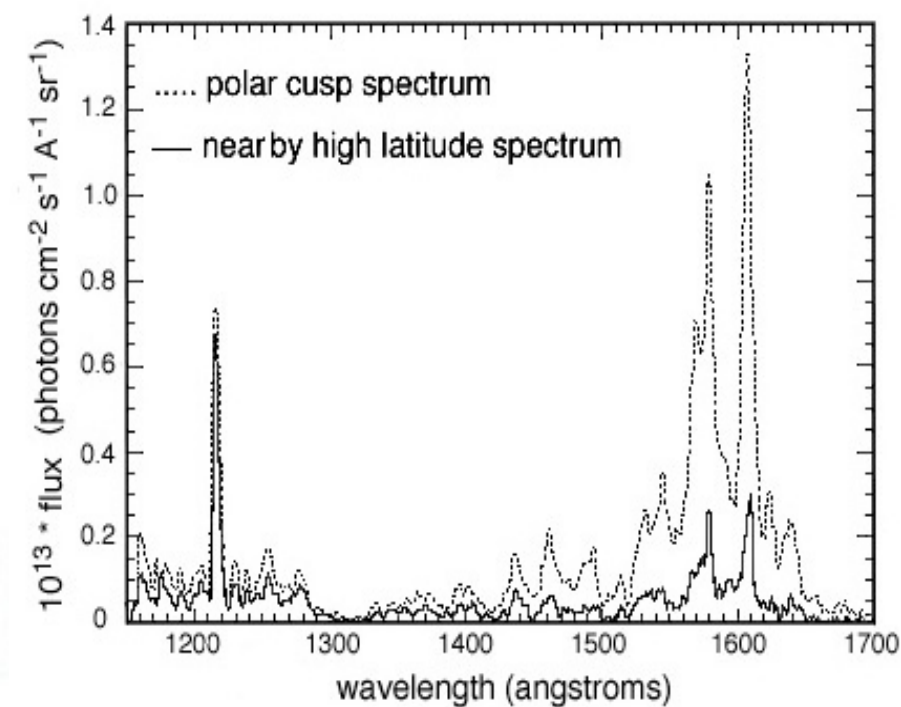
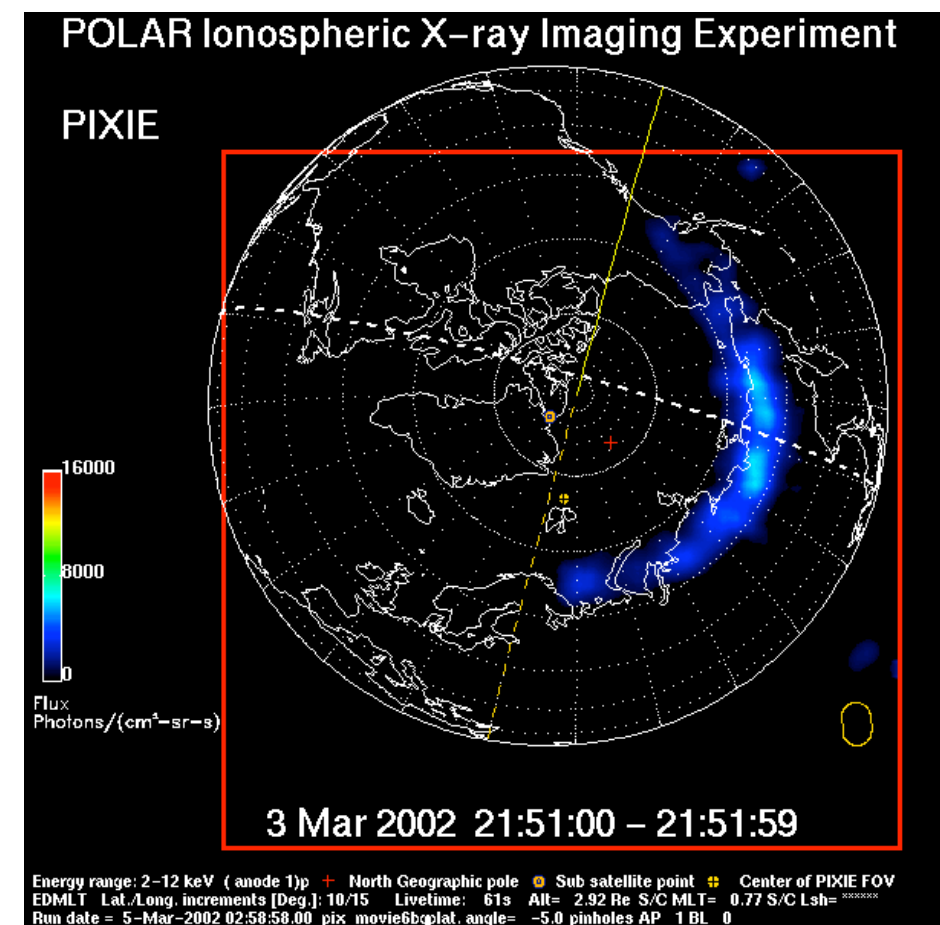
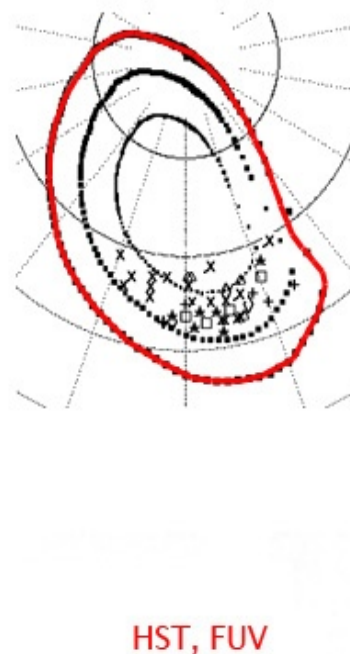
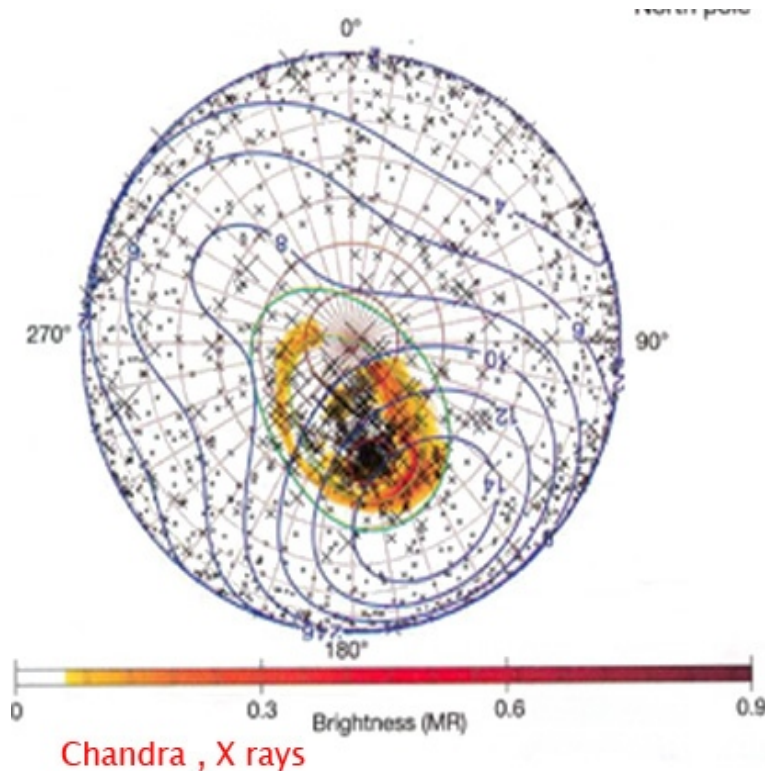
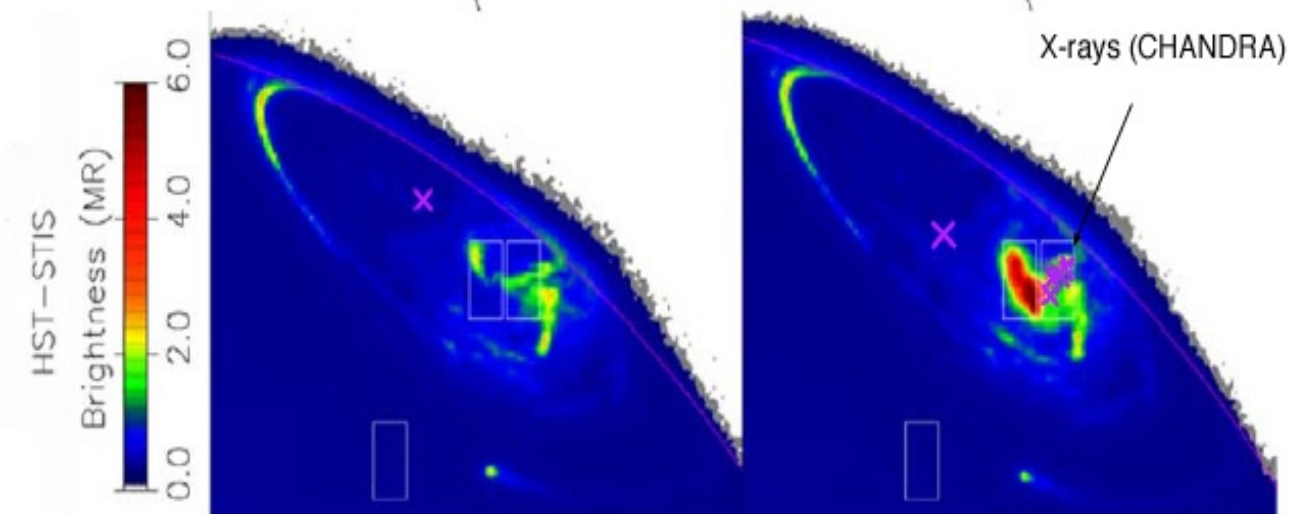
- Raies X (O^{n+} , S^{n+} à quelques keV)
- Émissions radio Basses Fréquences



- Raies X (O^{n+} , S^{n+} à quelques keV)

Terre

Jupiter



- Émissions FUV dues à des e^- de 10-100 keV à 2-5 μ bars, pulsée à ~ 20 min.
- Émissions X dues à des ions lourds > 100 MeV ; pulsée à ~ 20 et 45 min.

- Émissions radio Basses Fréquences :

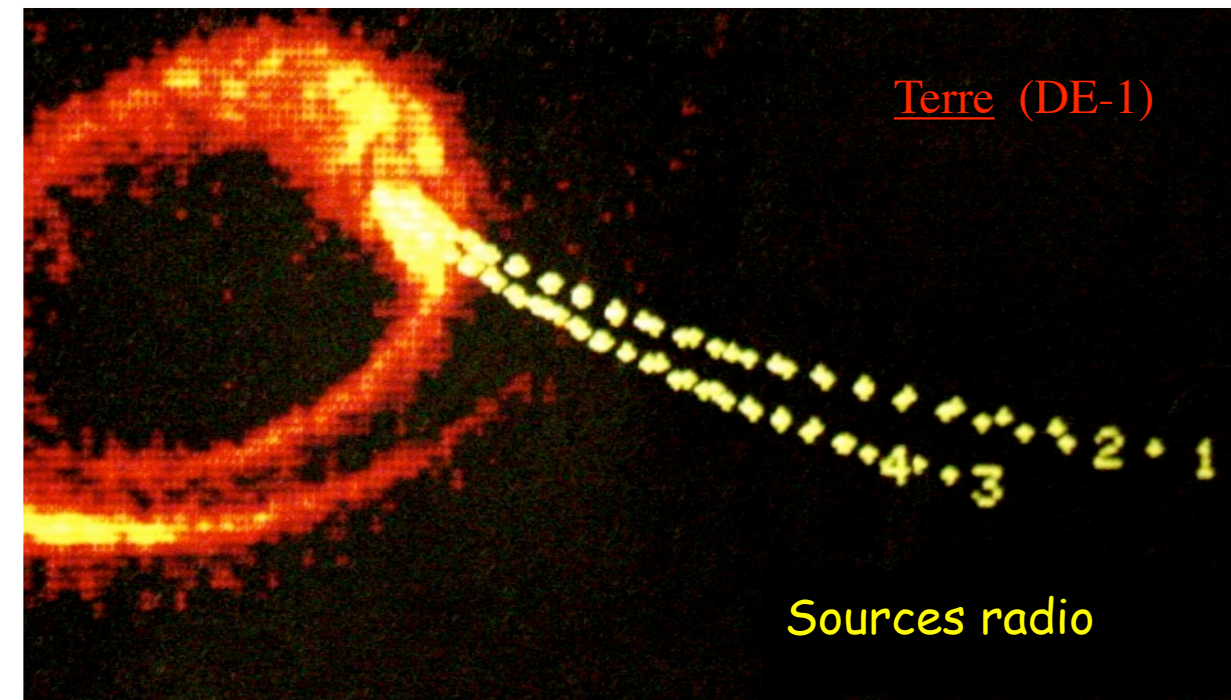
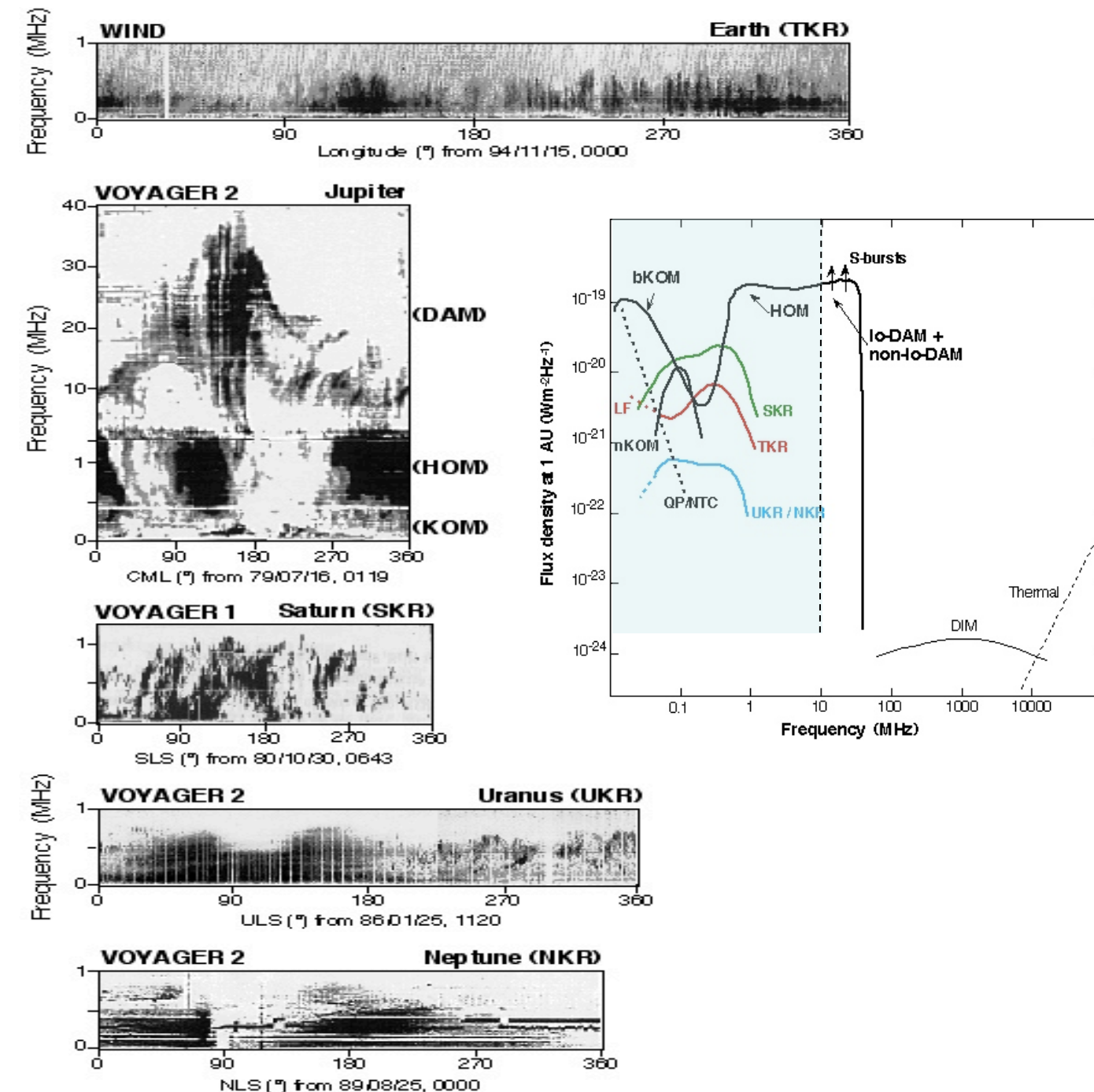
très intenses ($T_B \geq 10^{15}$ K, $P_{\text{rayonnée}} = 10^{6-11}$ W $\sim 1\%$ de la puissance des e- précipités)

émission cyclotron non-thermique cohérente de populations électroniques instables

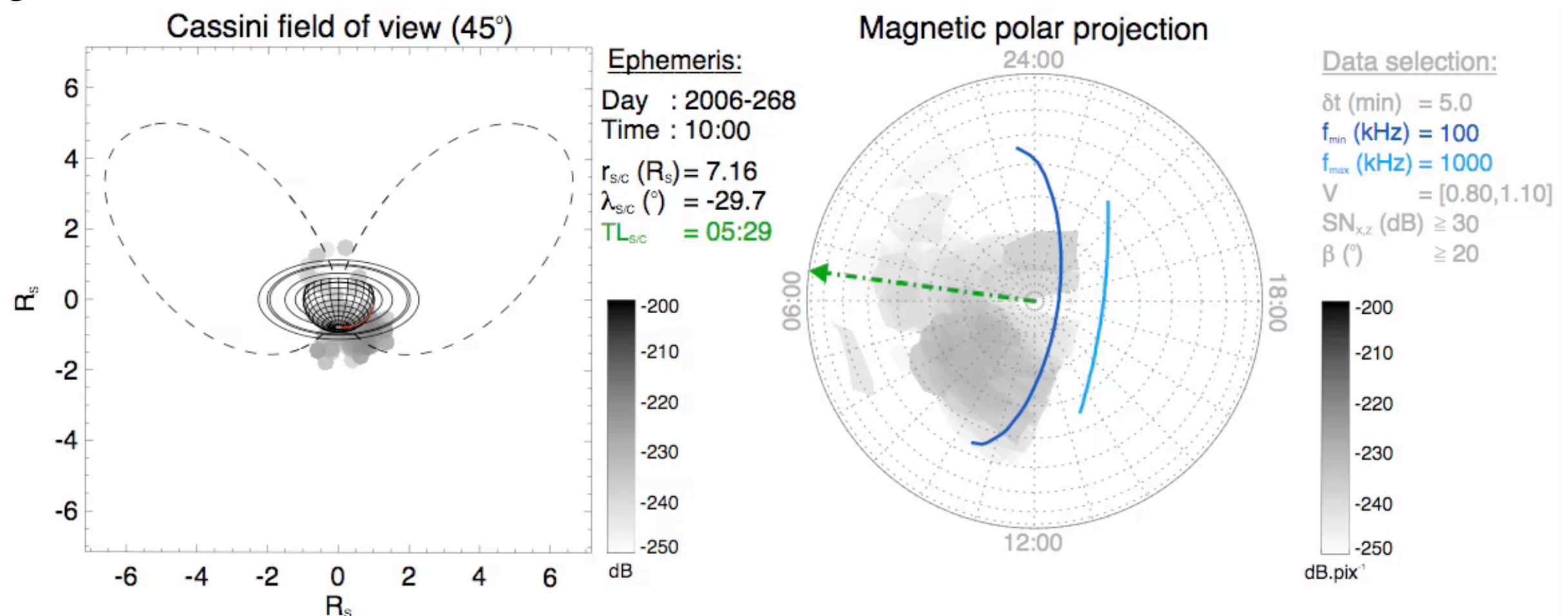
$f \sim f_{ce}$, $\Delta f \sim f$, polarisation $\sim 100\%$ elliptique (X), émissions très anisotropes (cône d'émission)

intensité fortement dépendante du Vent Solaire

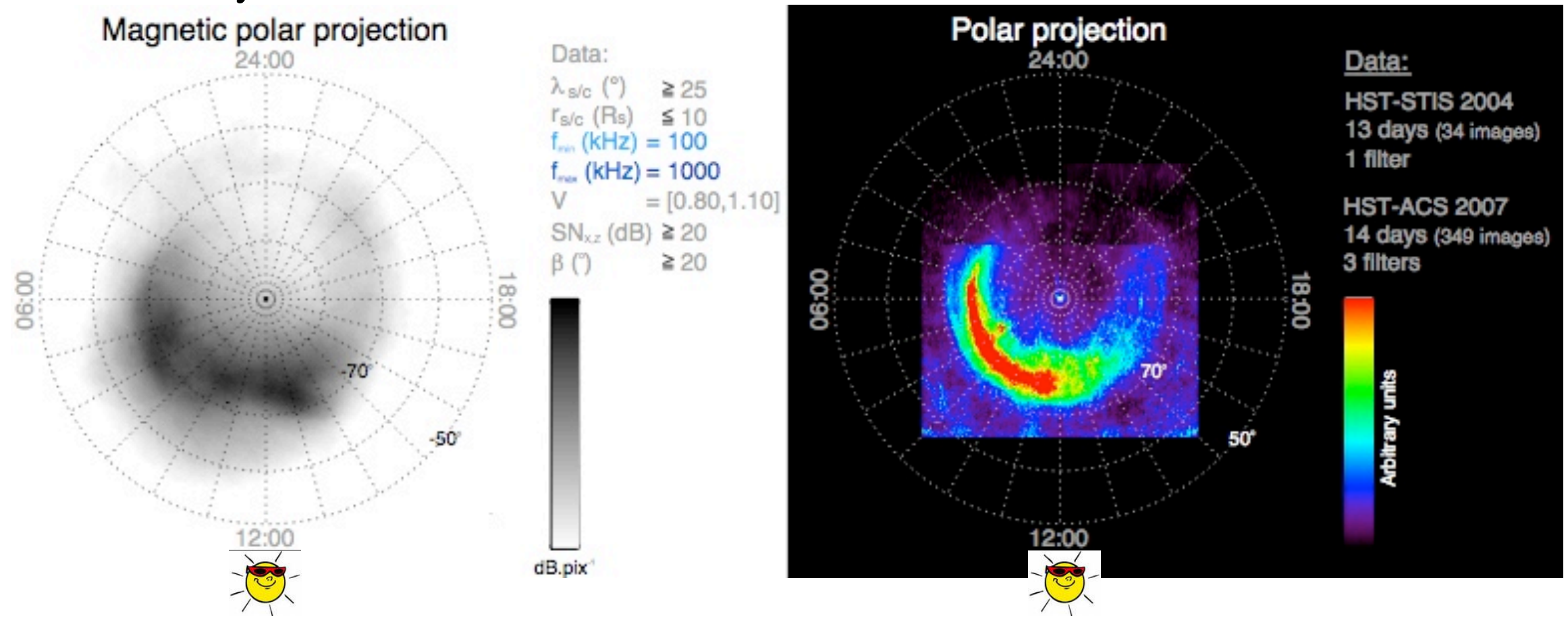
$\neq$ composantes radio liées aux $\neq$ sources de précipitation, fortement corrélées aux aurores UV



• Imagerie radio BF 2D & 3D avec Cassini à Saturne

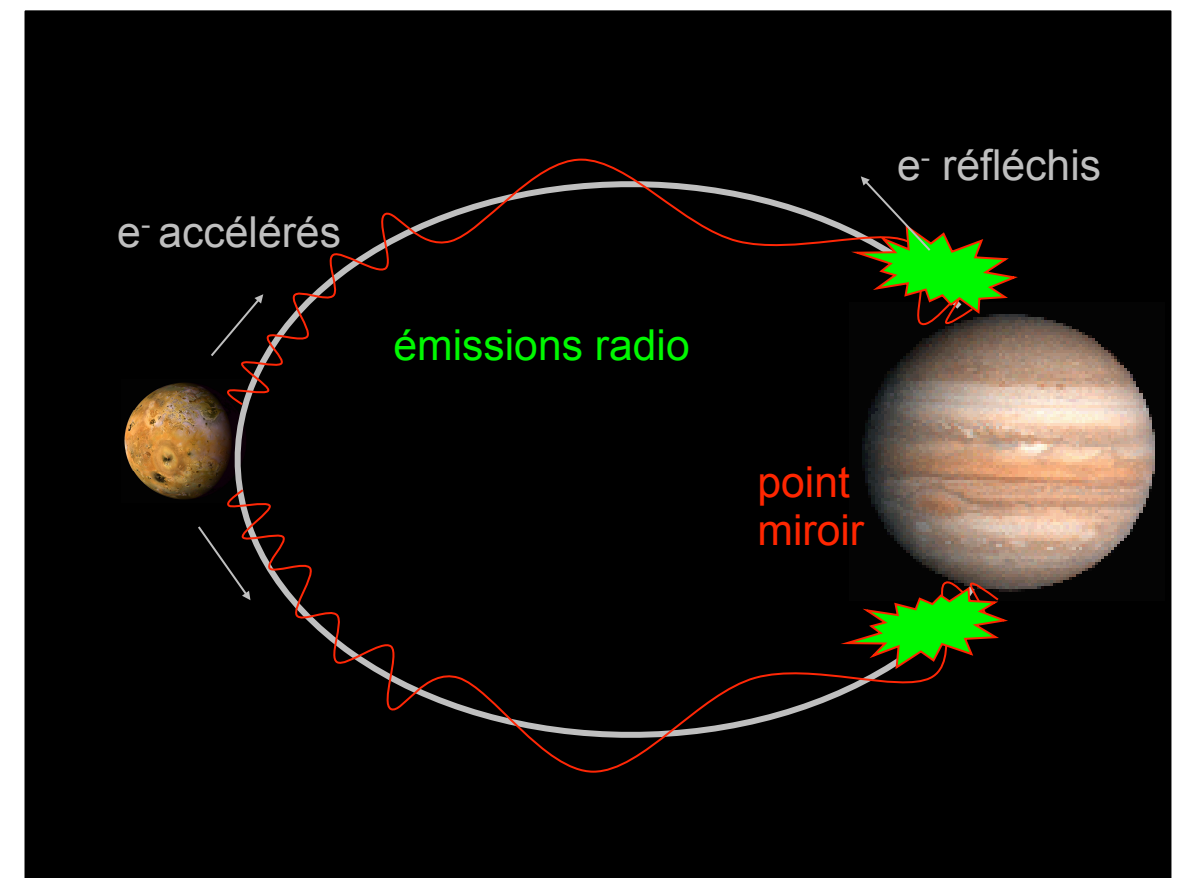
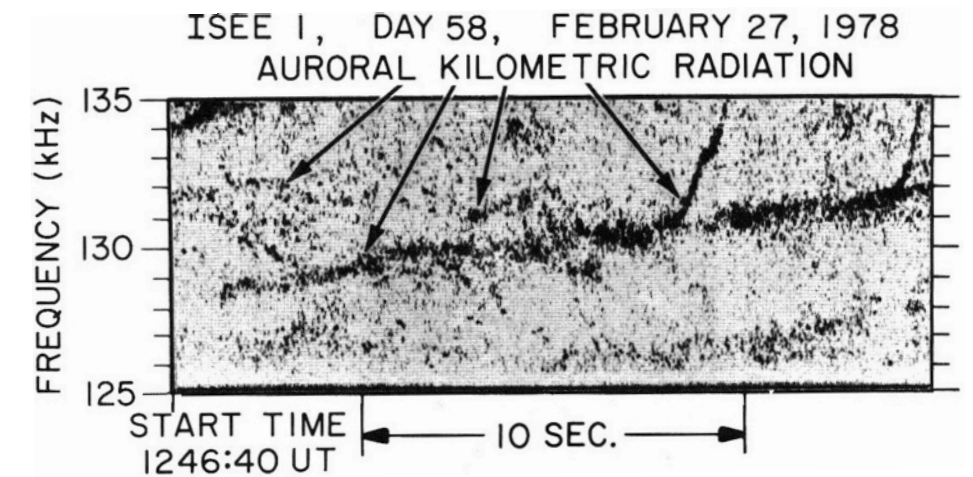
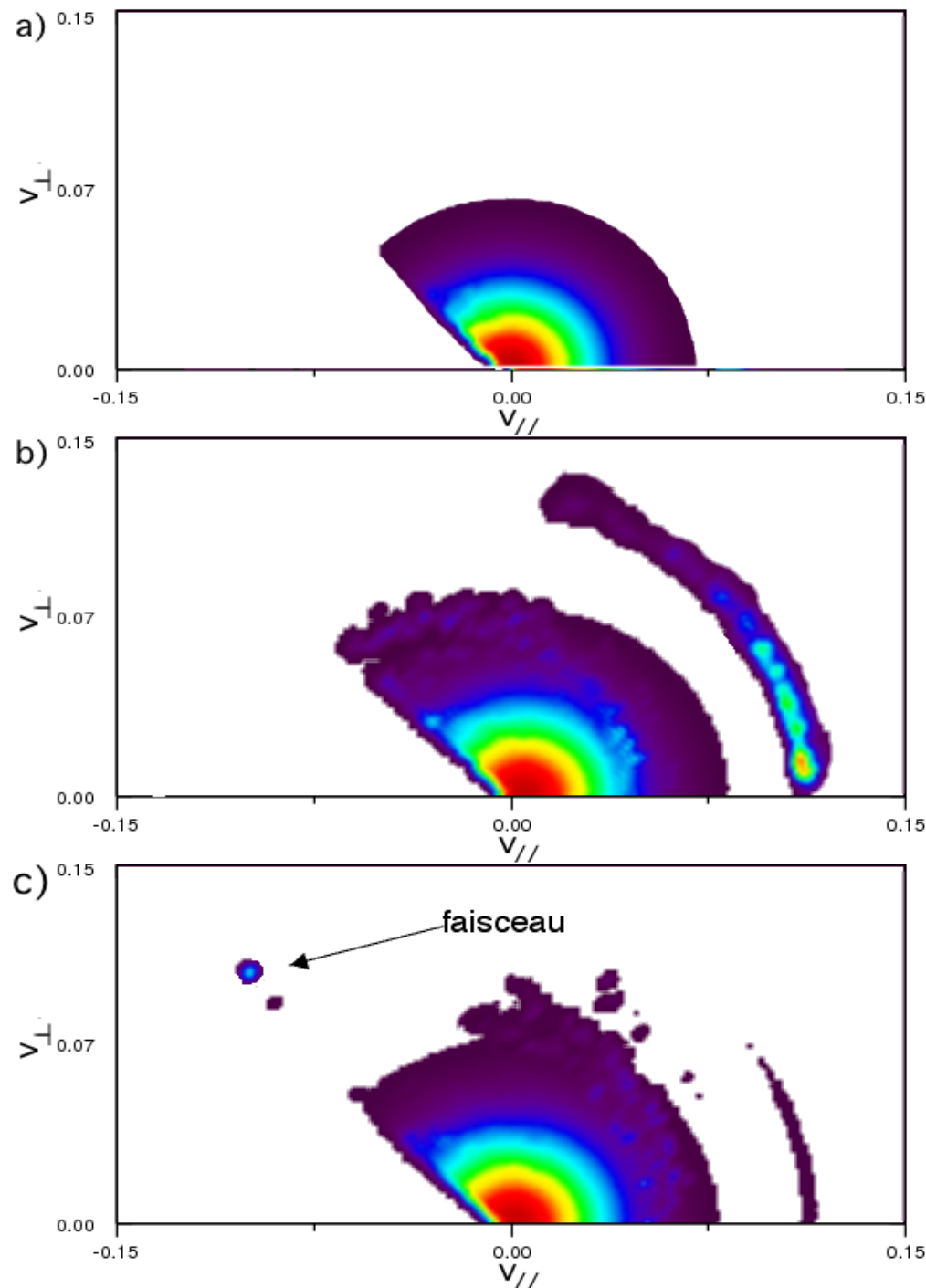


• Ovaes auroraux moyens radio & UV

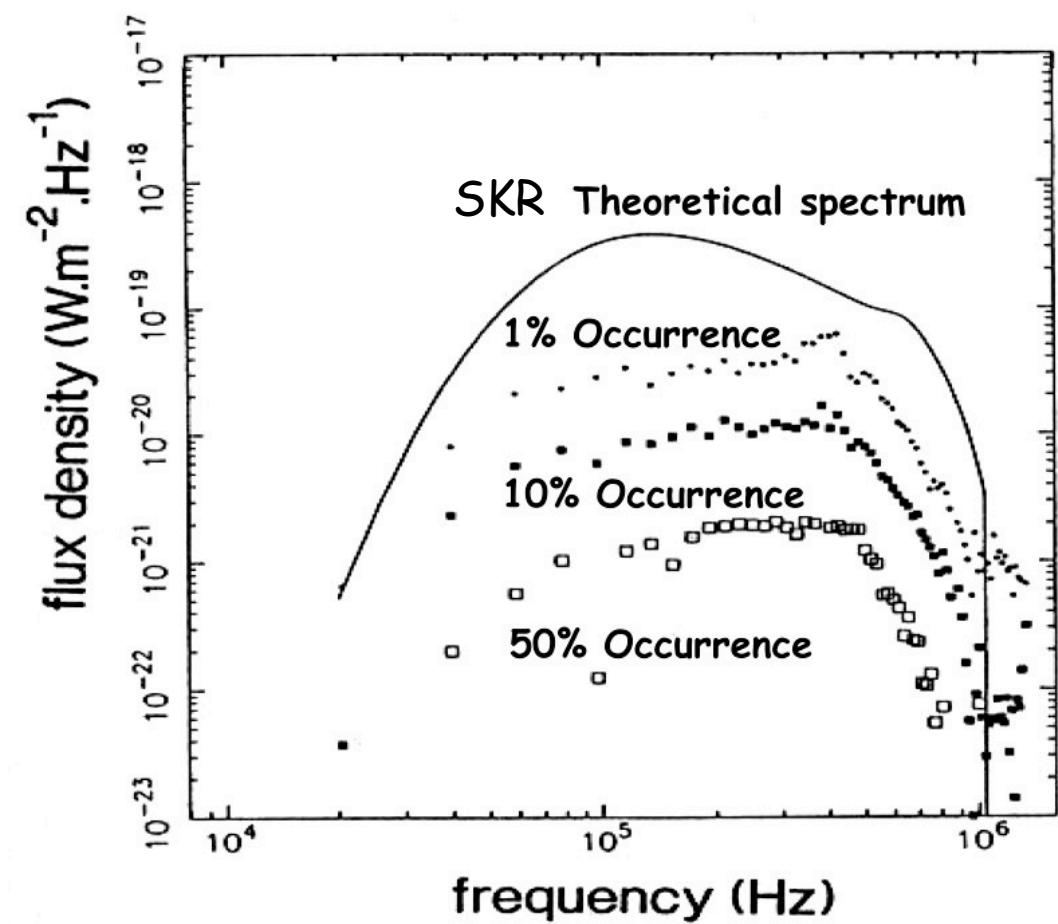
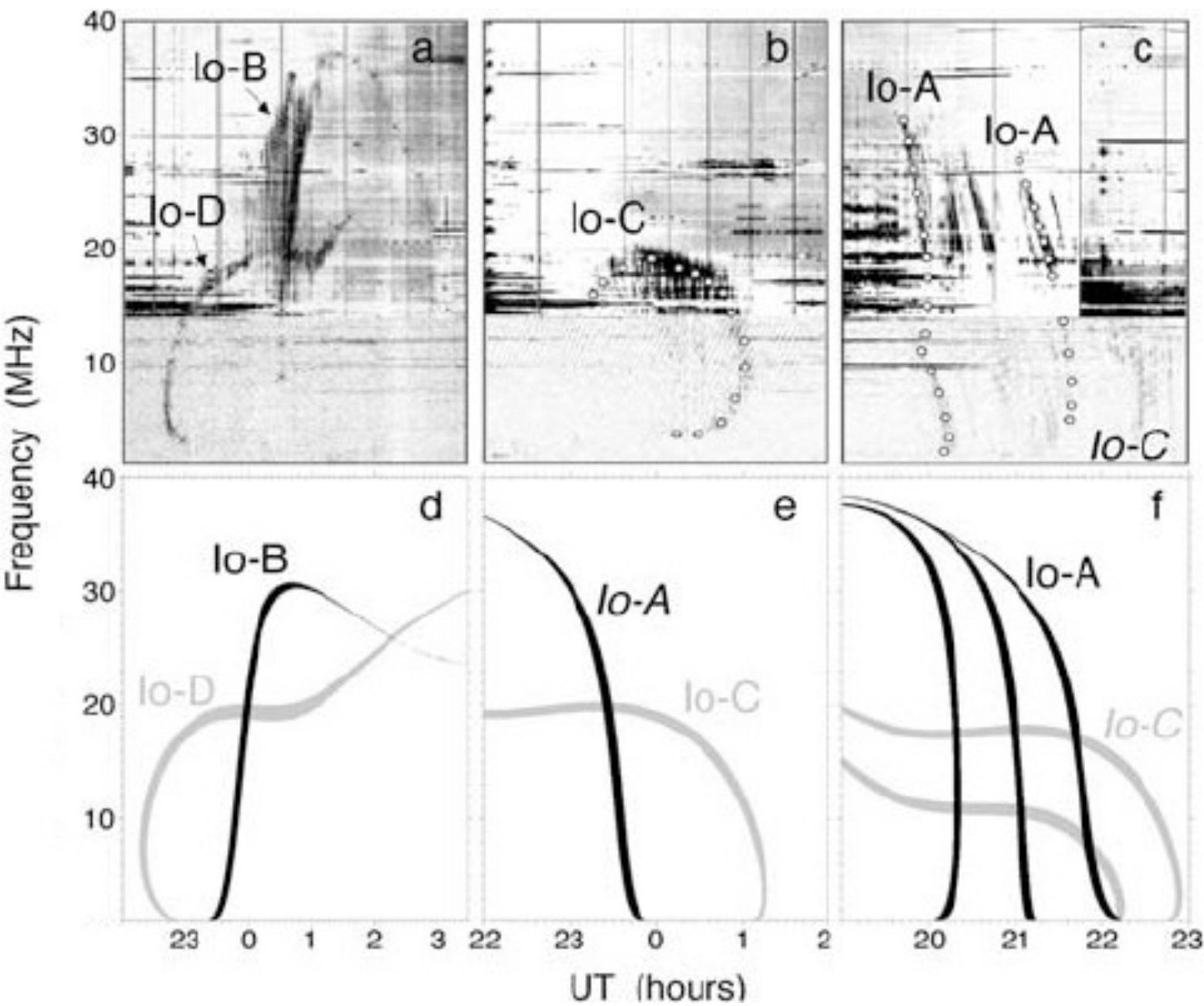


Théorie :

- mécanisme très efficace, cohérent → génération directe des ondes radio (sans conversion e.s. - e.m.)
→ instabilité « Maser-Cyclotron », requiert des électrons énergétiques (keV) avec une distribution non-Maxwellienne
→ émission directe intense à $f \sim f_{ce}$ à grand angle / B
- production possible de structures (t,f) fines

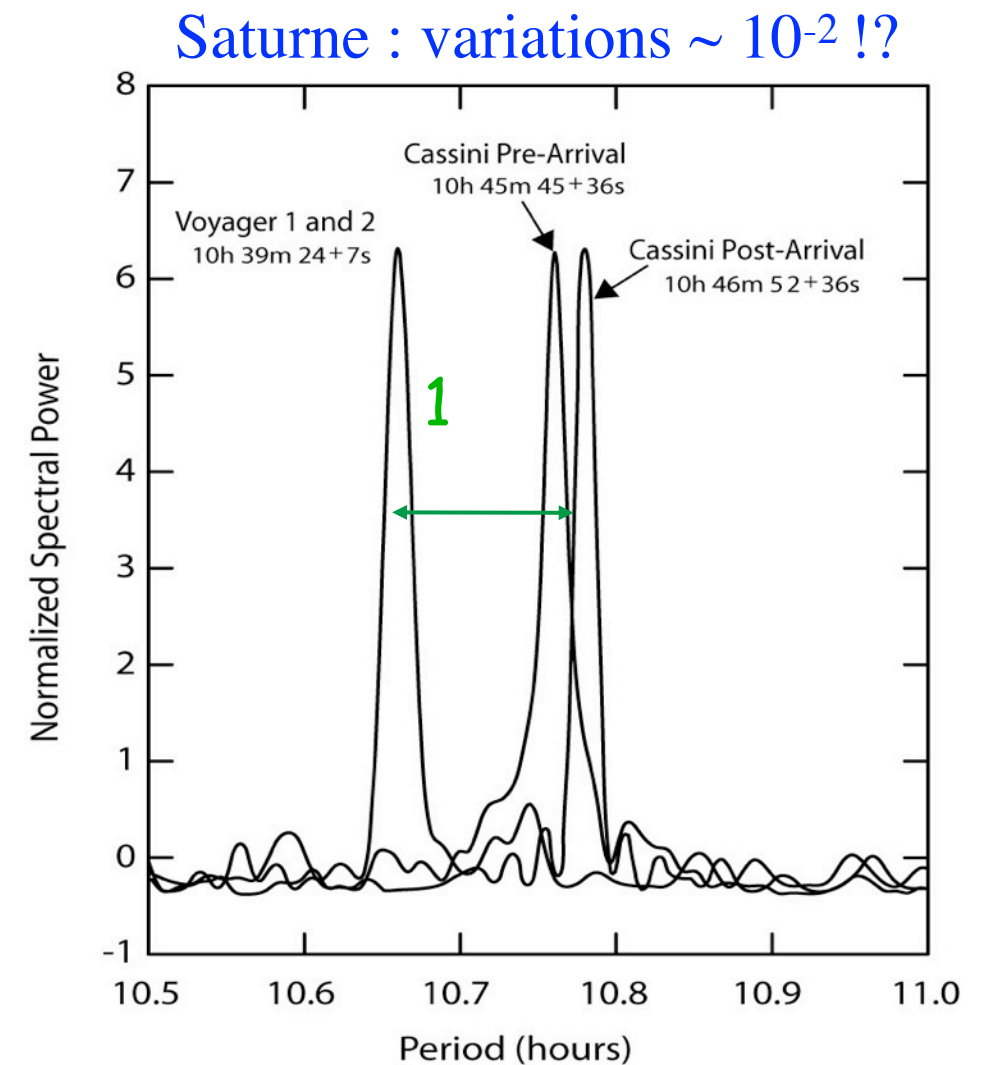
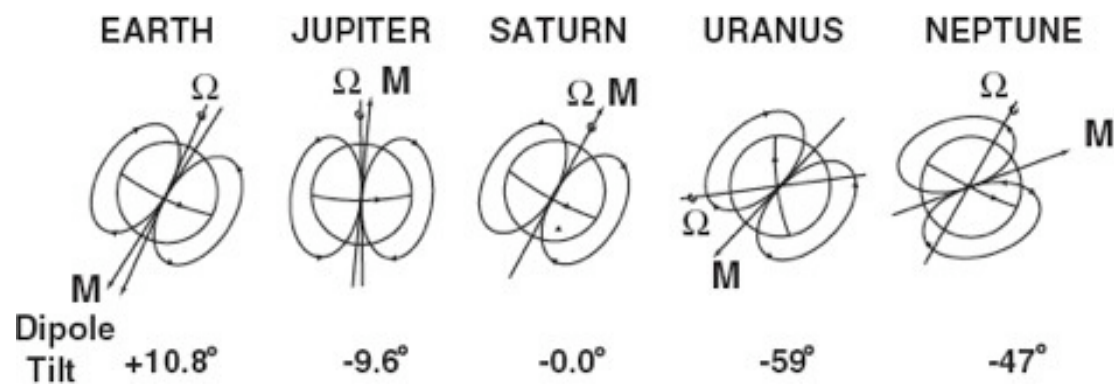
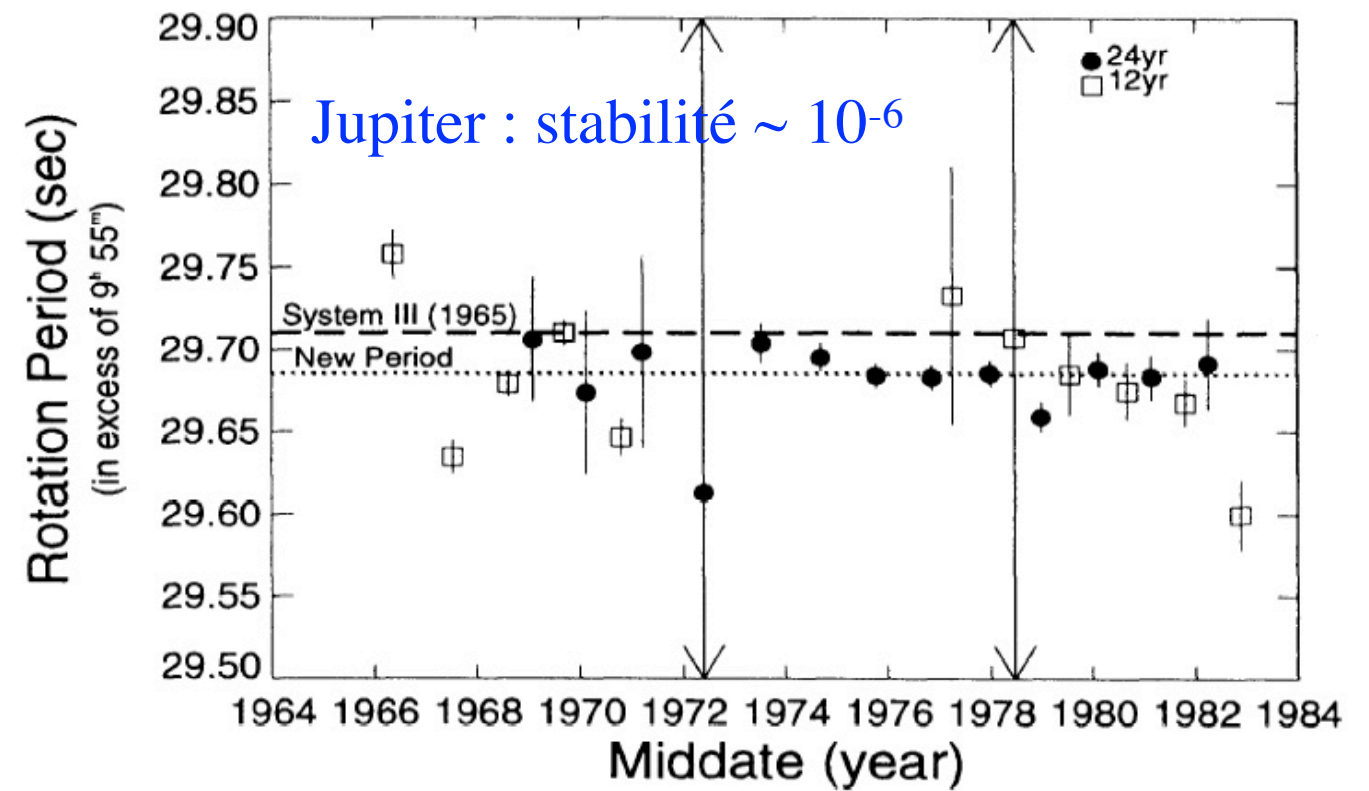
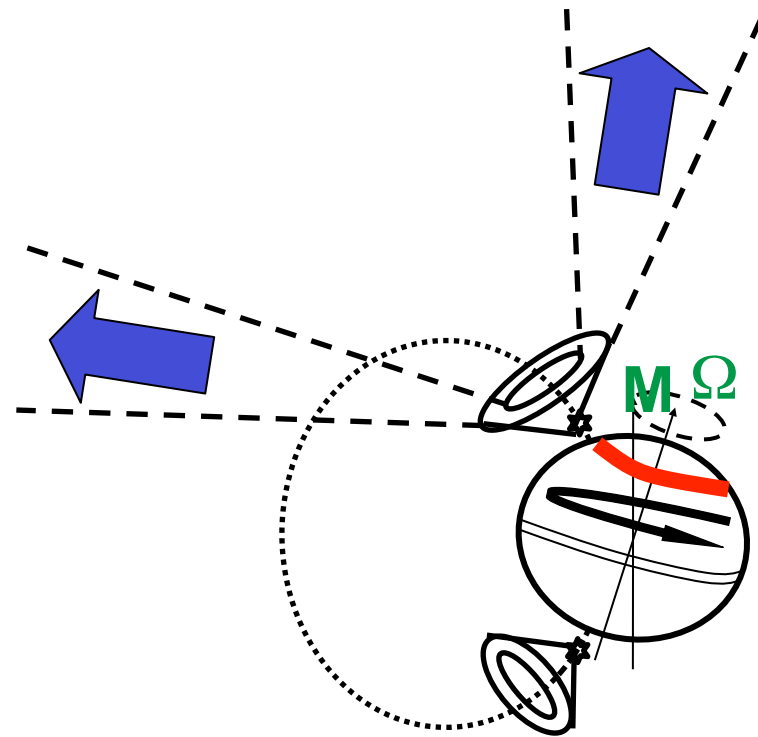


Modélisation des émissions décamétriques de Jupiter



Modélisation du spectre radio de Saturne

Mesure « magnétosphérique » de la période de rotation des planètes géantes



Les planètes magnétisées : de Mercure aux planètes géantes

Philippe Zarka

LESIA, CNRS - Observatoire de Paris
philippe.zarka@obspm.fr

9. Le cas des exoplanètes

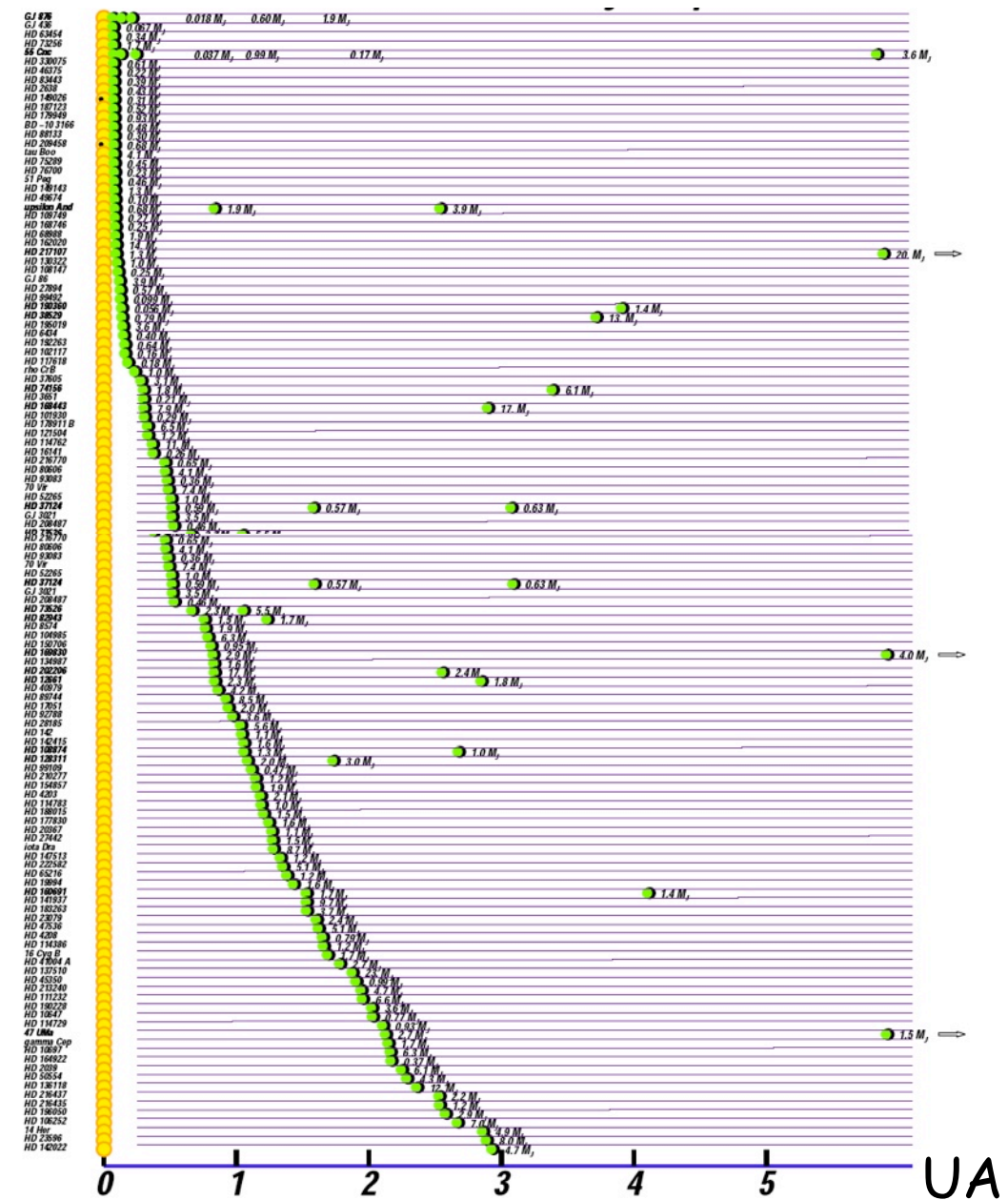
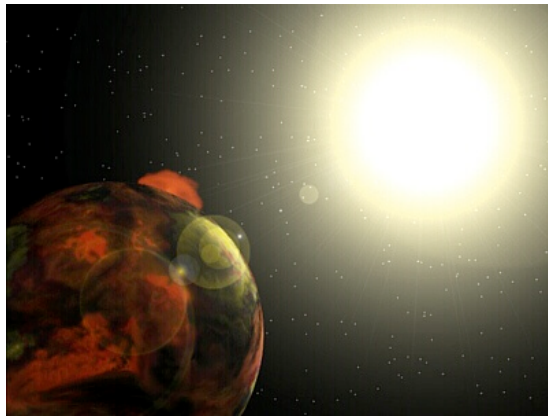
9.1 Interactions

9.2 Emissions électromagnétiques

9.1 Interactions

~862 exoplanètes (dans >678 systèmes)
 ~157 (18%) avec $a \leq 0.05 \text{ AU} = 10 R_s$
 « Jupiters chauds »
 ~272 (32%) avec $a \leq 0.1 \text{ AU}$

exoplanet.eu



Champs magnétique à la surface du Soleil :

→ à grande échelle $\sim 1 \text{ G}$ (10^{-4} T)

→ boucles magnétiques $\sim 10^3 \text{ G}$ sur quelques % de la surface

Étoiles magnétiques : $> 10^3 \text{ G}$

Spectropolarimètres : ESPaDOnS@CFHT & NARVAL@TBL

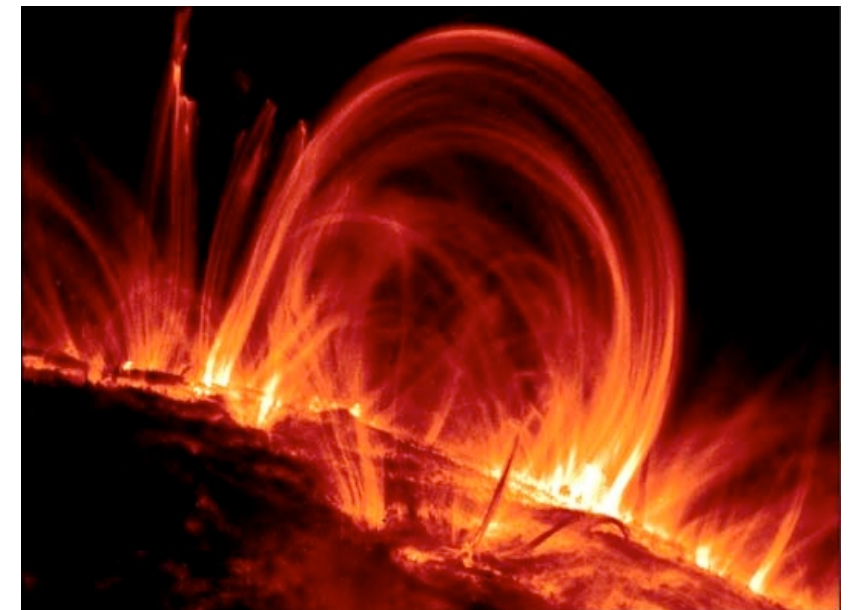
Tau Boo : 5-10 G

HD 76151 : $\sim 10 \text{ G}$

HD 189733 : $> 50 \text{ G}$

HD 171488 : 500G

...



- Puissance dissipée dans l'interaction plasma : interaction magnétosphérique

Flux d'énergie cinétique sur l'obstacle :

$$P_c \sim NmV^2 V \pi R_{obs}^2$$

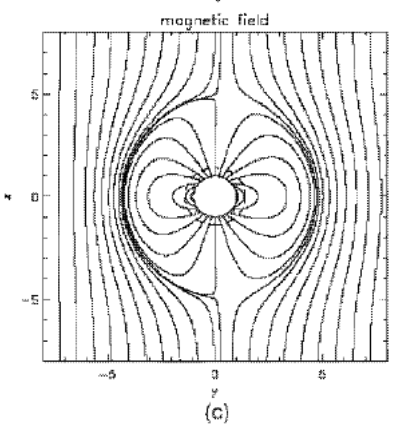
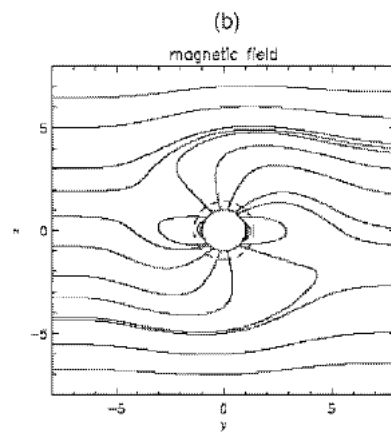
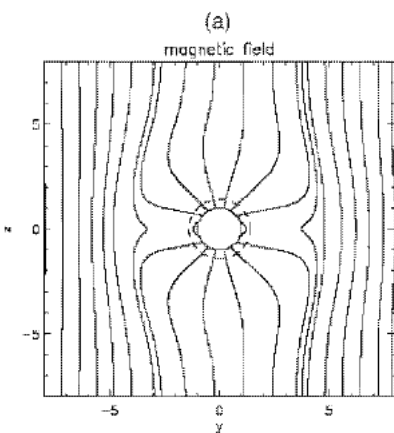
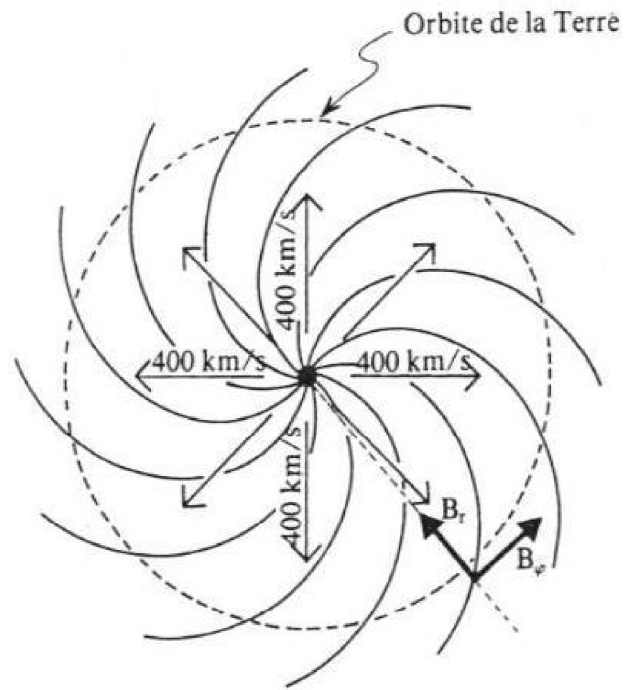
avec $N=N_0/d^2$ $N_0=5 \text{ cm}^{-3} \text{ m} \sim 1.1 \times m_p$

Flux de Poynting de B interplanétaire sur l'obstacle :

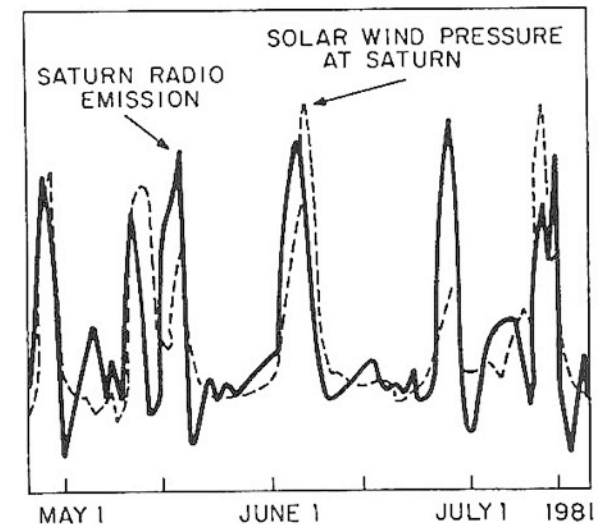
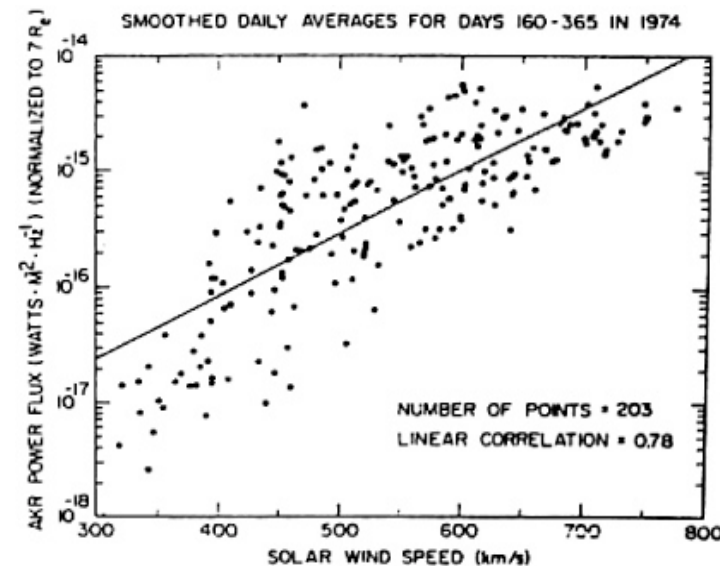
$$P = \int_{obs} (E \times B / \mu_0) \cdot dS$$

avec $E = -V \times B \rightarrow E \times B = VB_{\perp}^2$

$$\Rightarrow P_m = B_{\perp}^2 / \mu_0 V \pi R_{obs}^2$$

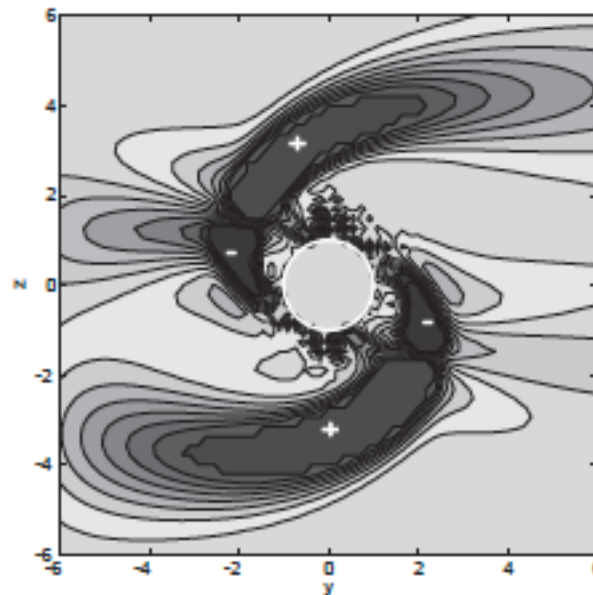
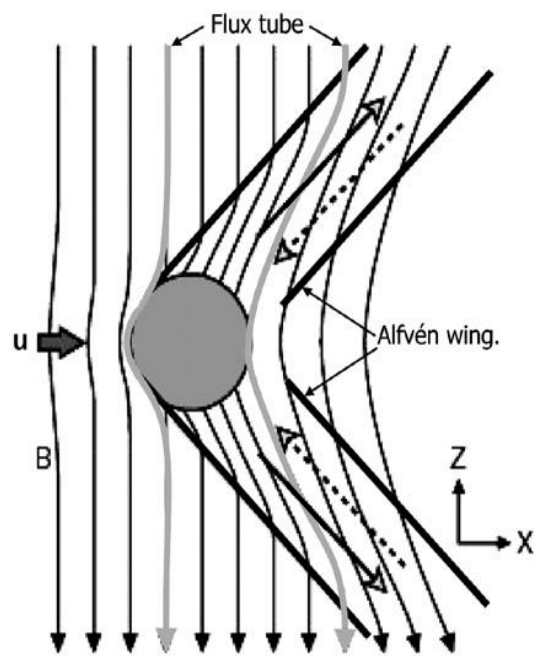
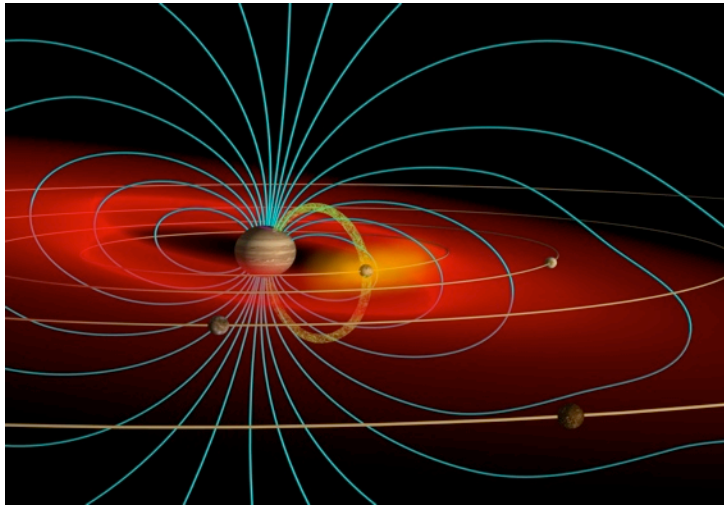


- Corrélation entre Vent Solaire et Émissions radio

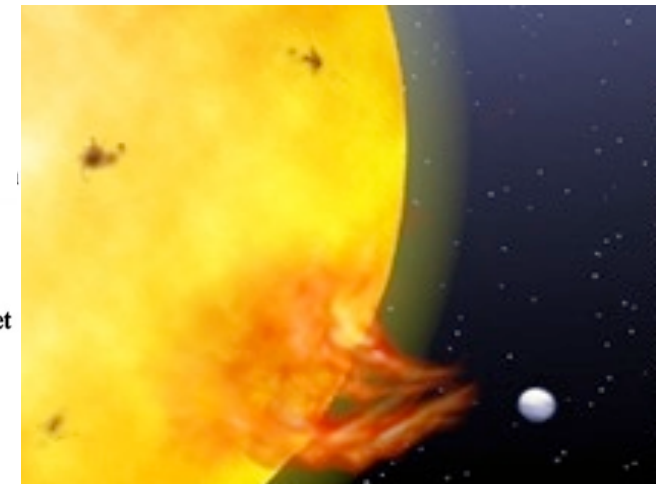
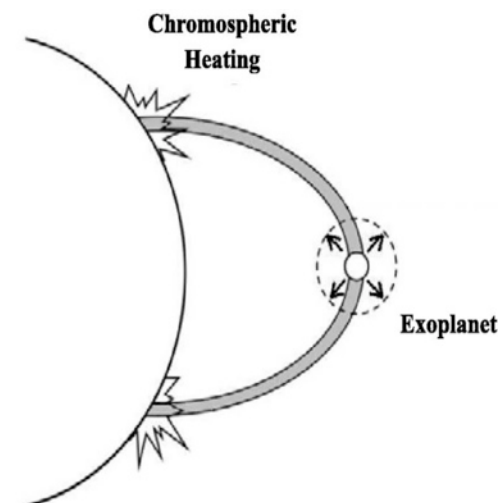
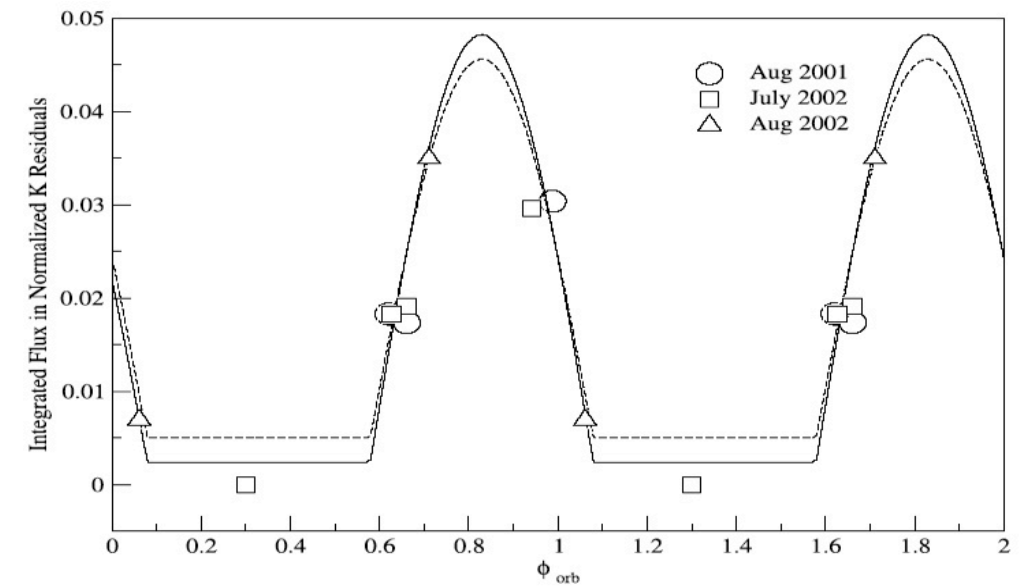


- Puissance dissipée dans l'interaction plasma : interaction (induction) unipolaire

- Io-Jupiter : ondes d'Alfvén & courants



- Point chaud chromosphérique sur HD179949 & υ And ?



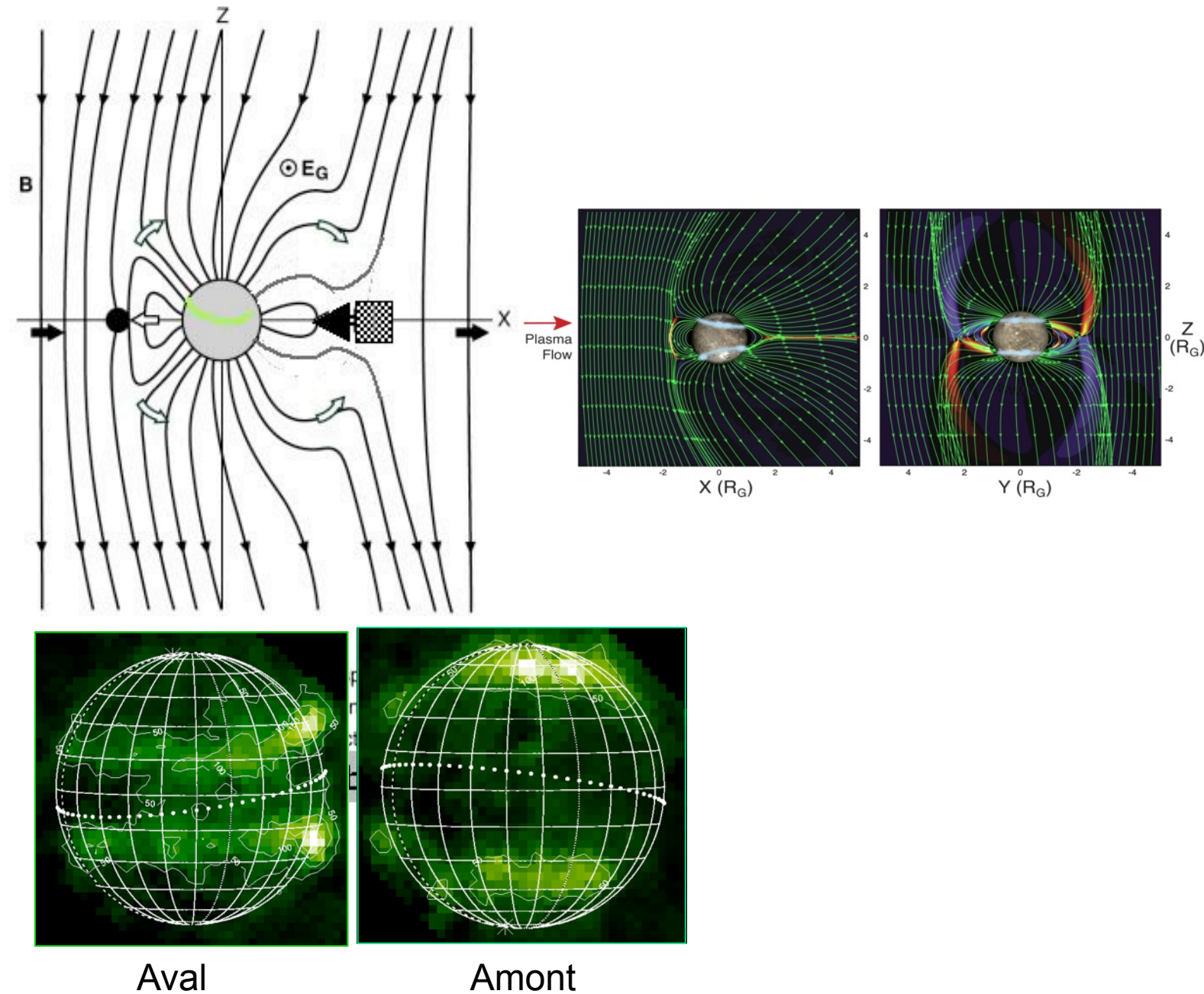
$$\phi = E \times 2R_{obs} = V \times B_{\perp} \times 2R_{obs}$$

$$P_{dissipée} = \epsilon \frac{V B_{\perp}^2}{\mu_0} \pi R_{obs}^2 = \epsilon P_m$$

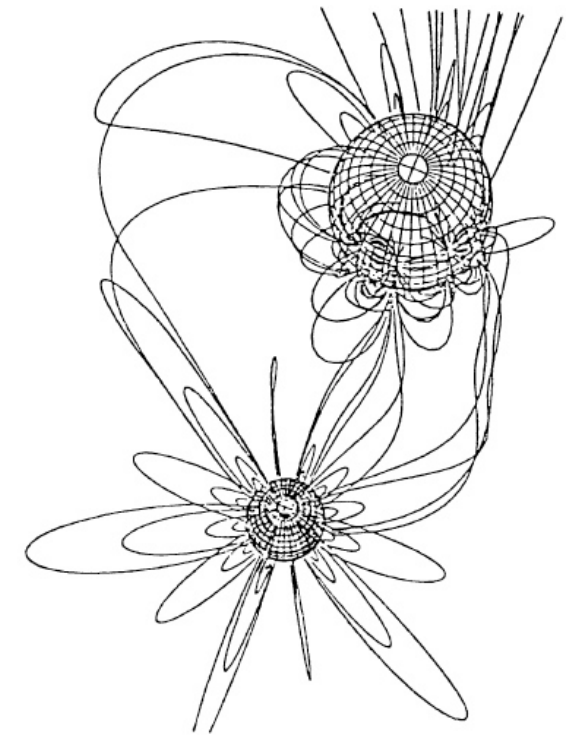
$$M_A \leq \epsilon \leq 1$$

- Puissance dissipée dans l'interaction plasma : interaction dipolaire

- Ganymède-Jupiter : reconnexion



- Binaires magnétiques en interaction, ou systèmes étoile-planète ?



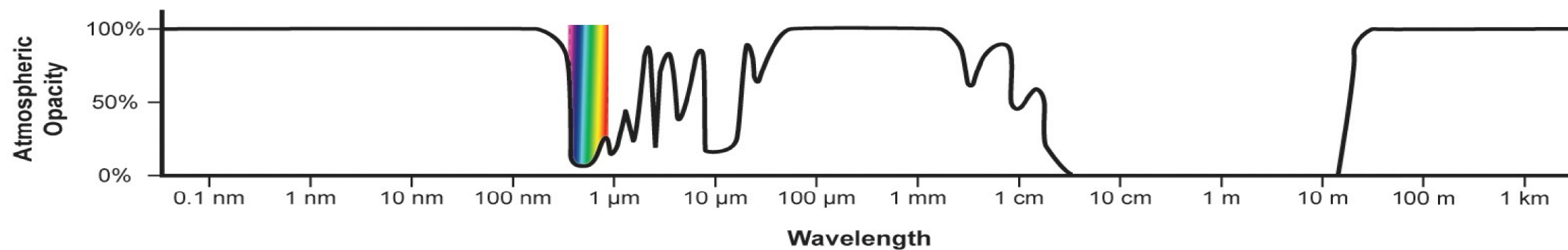
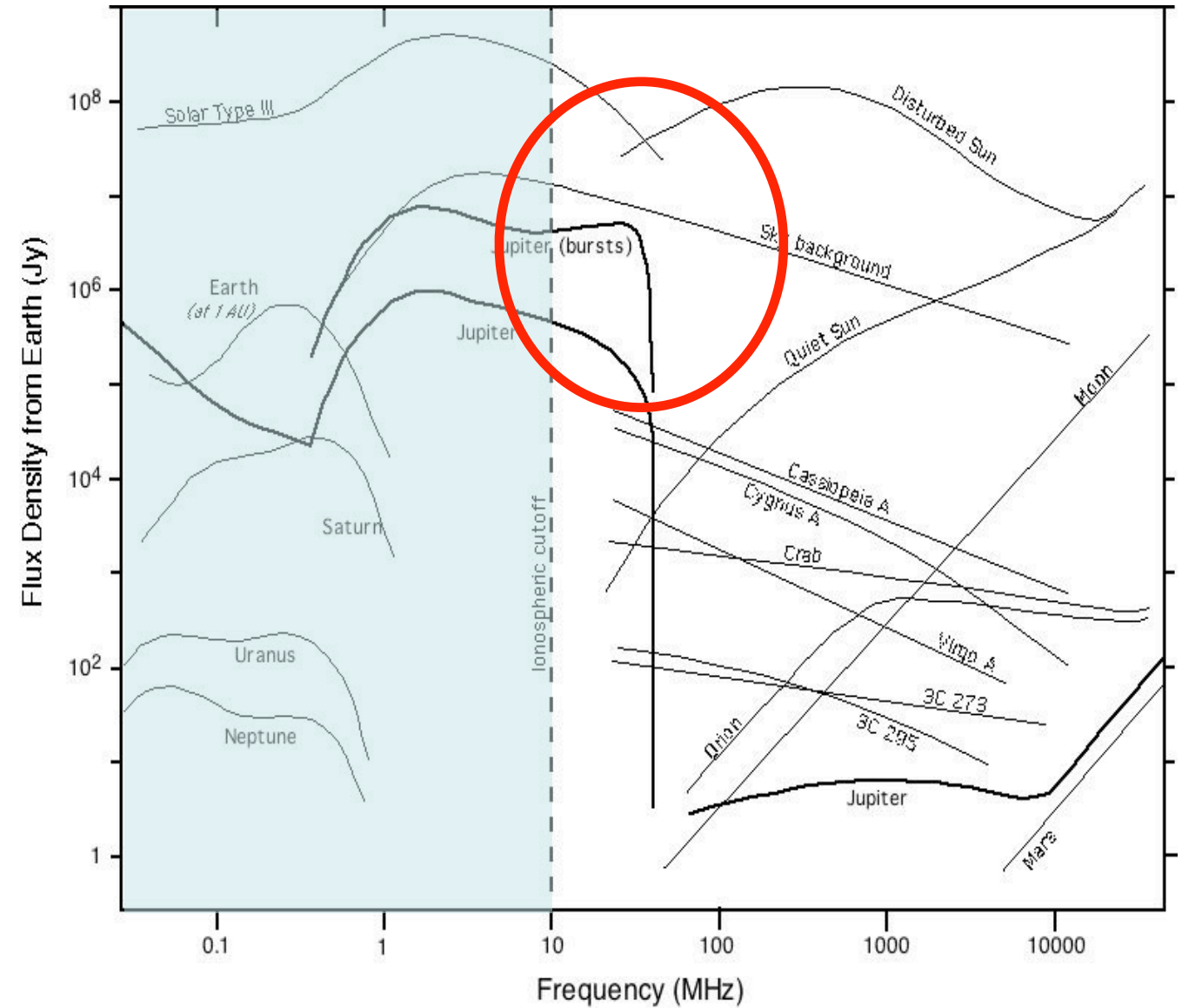
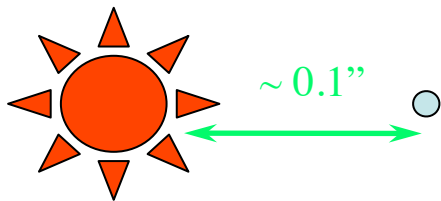
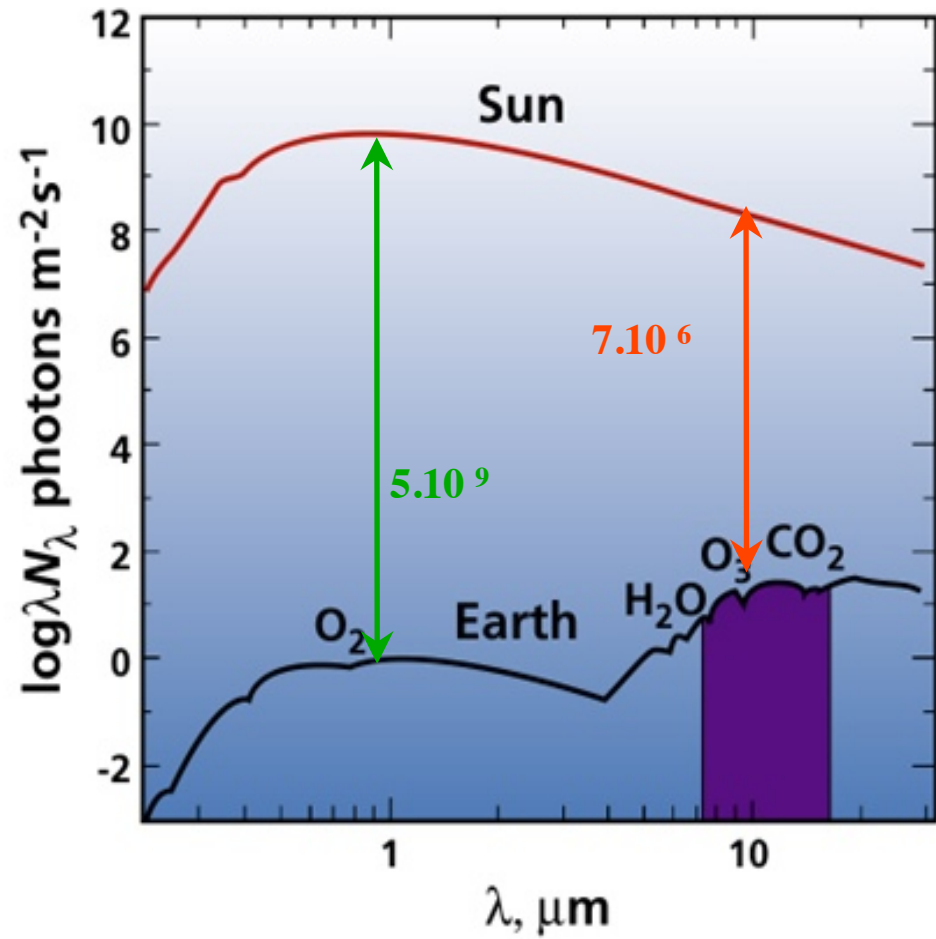
$$P_d = \varepsilon K V B_{\perp}^2 / \mu_0 \pi R_{MP}^2 = \varepsilon K P_m$$

$$K = \sin^4(\theta/2) \text{ or } \cos^4(\theta/2) = 0/1$$

$$\varepsilon \sim 0.1 - 0.2$$

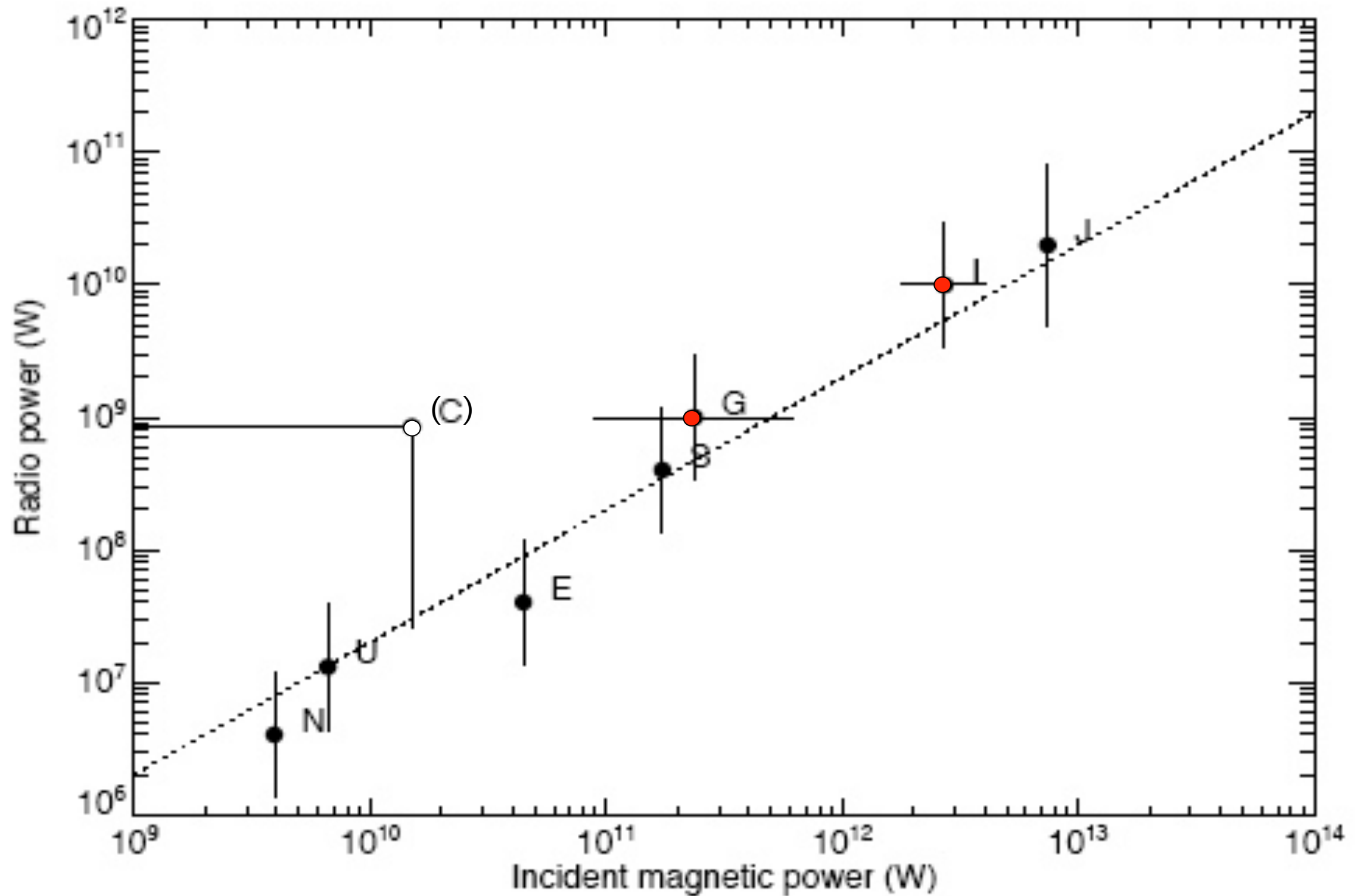
9.2 Emissions électromagnétiques

- UV ?
- Radio ?

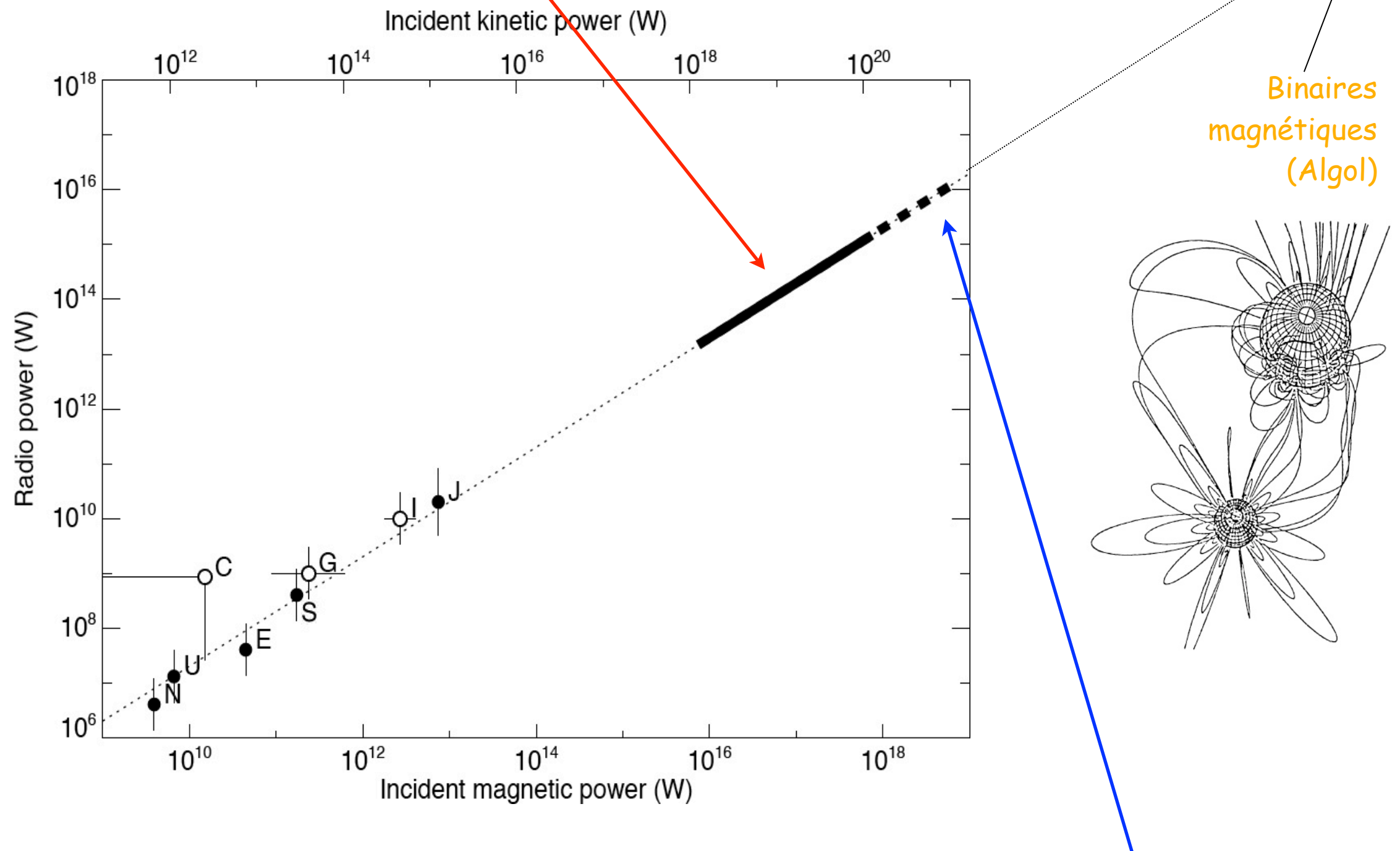


- Loi de Bode radio-magnétique

$\forall$ émission radio, $P_{\text{Radio}} \sim \eta \times P_m$ avec $\eta \sim 2-10 \times 10^{-3}$

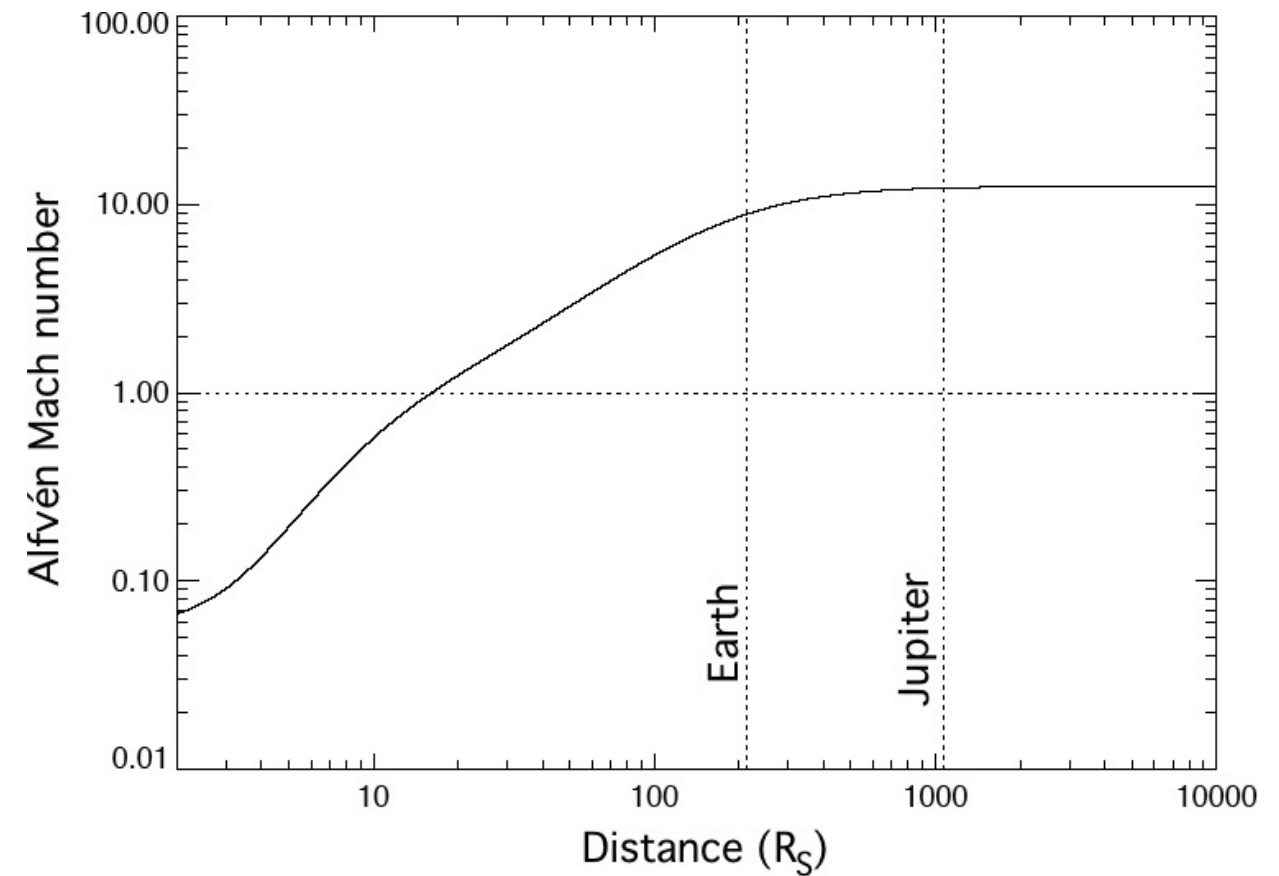
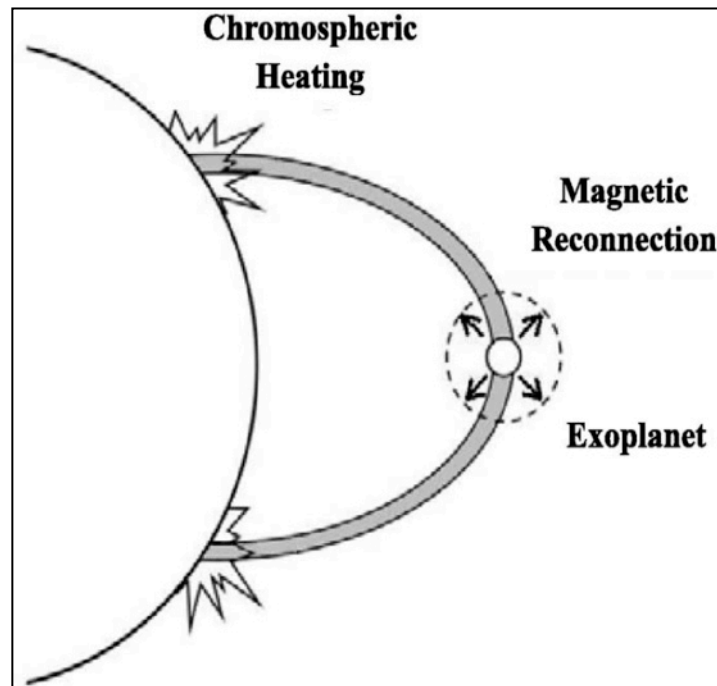


Jupiters chauds $\Rightarrow P_{\text{Radio}} = P_{\text{Radio-J}} \times 10^{3-5}$ en l'absence d'un phénomène de "saturation"
 et de la disparition du champ magnétique planétaire, e.g. par synchronisation spin-orbite
 ($\mathcal{M} \propto P_{\text{sid}}^\alpha$ $-1 \leq \alpha \leq -1/2$)



Inducteur unipolaire $\Rightarrow P_{\text{Radio}} = P_J \times 10^5 \times (R_{\text{exo-ionosphère}}/R_{\text{magnétosphère}})^2 \times (B_*/B_{\text{Soleil}})^2 = P_{\text{Radio-J}} \times 10^6$
 $\Rightarrow$ détectabilité radio possible jusqu'à plusieurs x 10-100 pc

- Inducteur unipolaire en régime sub-Alfvénique ($\sim$ Io-Jupiter)



Émission radio possible seulement si $f_{pe}/f_{ce} \ll 1$

→ B^* intense requis (10-100 $\times B_{\text{Soleil}}$)

→ Émission $\geq 30\text{-}250$ MHz à 1-2 R_S

- Détection radio directe
- Discrimination planète-étoile via polarisation (circulaire/elliptique)
& périodicité (orbitale ?)
- Période de rotation planétaire $\Rightarrow$ verrouillage spin-orbite ?
- Mesure de $B_{\text{planétaire}}$ $\Rightarrow$ contraintes sur loi d'échelle
& modèles de structure interne
- Physique magnétosphérique comparative (interactions * - planète)

Conclusions

- Structures magnétosphériques très diverses
*(fonction de la force du VS, des sources de plasma,
du champ magnétique, de la rotation, etc.)*
- Approche comparative des magnétosphères essentielle
- Prospective pour la physique exo-magnétosphérique