

Magnétosphères comparées (et plus encore ??)

P. Zarka (LESIA)

Voir détails dans toutes les présentations suivantes !

Types d'interaction (Lepping, 1985)

A: VS - absorbant (Lune) \Rightarrow sillage

B: VS - atmosphère+ionosphère sans B (Vénus, Comètes, Titan/VS)
 \Rightarrow MS induite

C: VS - conducteur sans atmosphère: $V_{VS} \times B_{VS} \Rightarrow E \Rightarrow B$
 (pas d'exemple dans le VS)

D: VS - B planétaire suffisant pour que P_B équilibre la pression du plasma incident (pression dynamique domine le VS)
 \Rightarrow MS développée

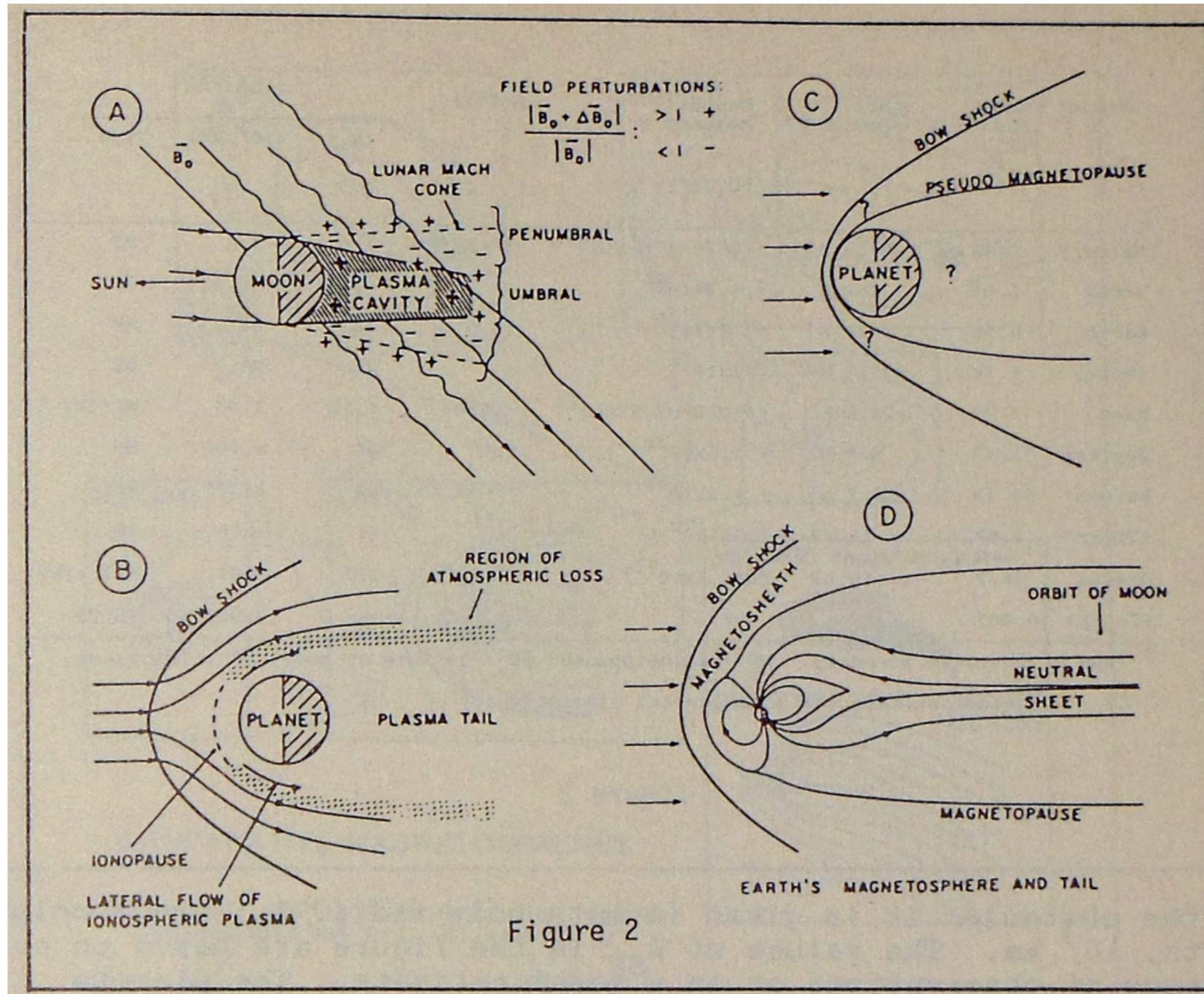


Figure 2

B,C,D: choc en amont, A: pas de choc

GENERALIZED PLANETARY OBSTACLES TO SOLAR WIND FLOW

PROPER MAGNETOSPHERES:

- MERCURY -- VACUUM \vec{B}
- EARTH -- "VACUUM" \vec{B}
- SATURN -- SOMETIMES VACUUM \vec{B} , SOMETIMES PLASMA + \vec{B}
- JUPITER -- \vec{B} AND PLASMA, $R_{SP} \sim P_{SW}^{-1/3}$

POSSIBLE PROPER MAGNETOSPHERES:

- URANUS
- NEPTUNE

INDUCED "MAGNETOSPHERES":

- VENUS (IONOSPHERE INTERACTION)
- TITAN (IONOSPHERE INTERACTION)
- SOME COMETS (THOSE THAT GET SUFFICIENTLY CLOSE TO THE SUN)

MAGNETOSPHERE OR IONOSPHERE?

- MARS (TBD BY MARS OBSERVER MISSION)

HARD, PLASMA ABSORBING BODIES:

- EARTH'S MOON
- ASTEROIDS (PROBABLY)

Figure 1

Depuis 1985:

- Uranus (B tilté à 60° !)
- Neptune
- mini-MS de Mars & Lune (B crustal)
- ...

6 planètes magnétisées (cas D) dans le SS= M,T,J,S,U,N

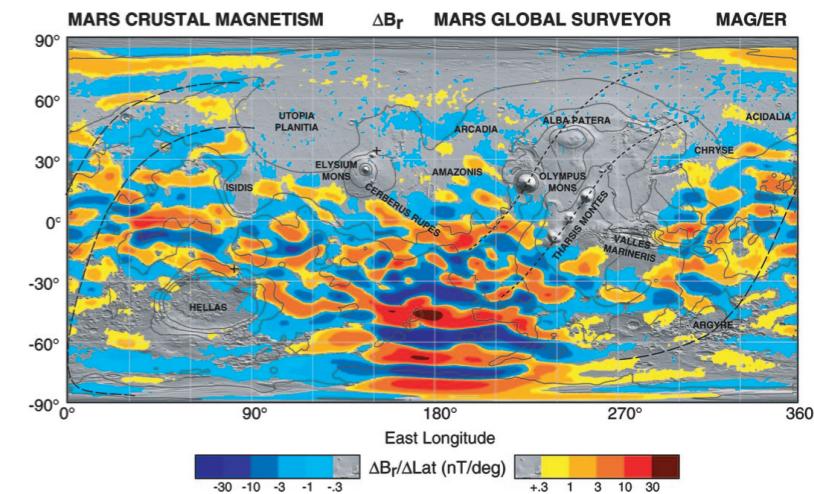
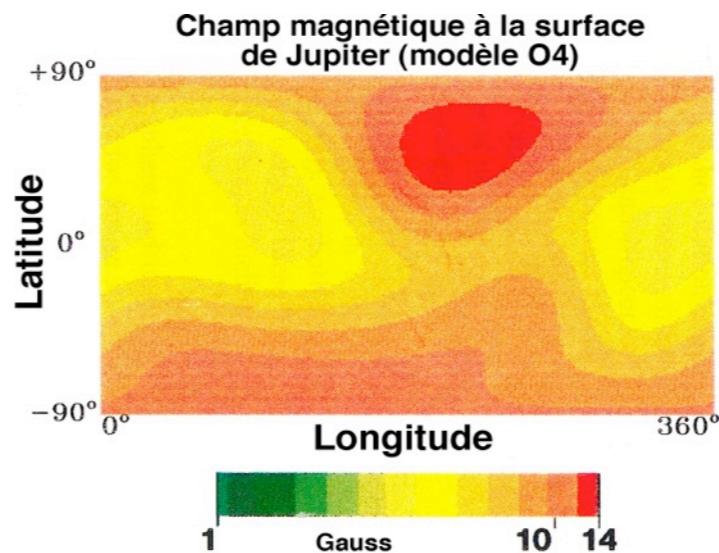
	MERCURY	EARTH	JUPITER	SATURN	URANUS	NEPTUNE
Obliquity	0.1°	23.5°	3.1°	26.7°	97.9°	29.6°
Dipole Tilt	+14°	+10.8°	-9.6°	-0.0°	-59°	-47°

The diagram illustrates the orientation of the magnetic field (M) and the rotation axis (Ω) for six planets. The diagrams show the planet's rotation axis as a vertical line with a curved arrow indicating rotation, and the magnetic field as a vector. The angle between the rotation axis and the magnetic field is labeled as Dipole Tilt. The angle between the rotation axis and the orbital plane is labeled as Obliquity.

- MERCURY:** Magnetic field M is nearly aligned with the rotation axis Ω .
- EARTH:** Magnetic field M is tilted at approximately +10.8° relative to the rotation axis Ω .
- JUPITER:** Magnetic field M is tilted at approximately -9.6° relative to the rotation axis Ω .
- SATURN:** Magnetic field M is nearly aligned with the rotation axis Ω .
- URANUS:** Magnetic field M is tilted at approximately -59° relative to the rotation axis Ω .
- NEPTUNE:** Magnetic field M is tilted at approximately -47° relative to the rotation axis Ω .

Origine de B

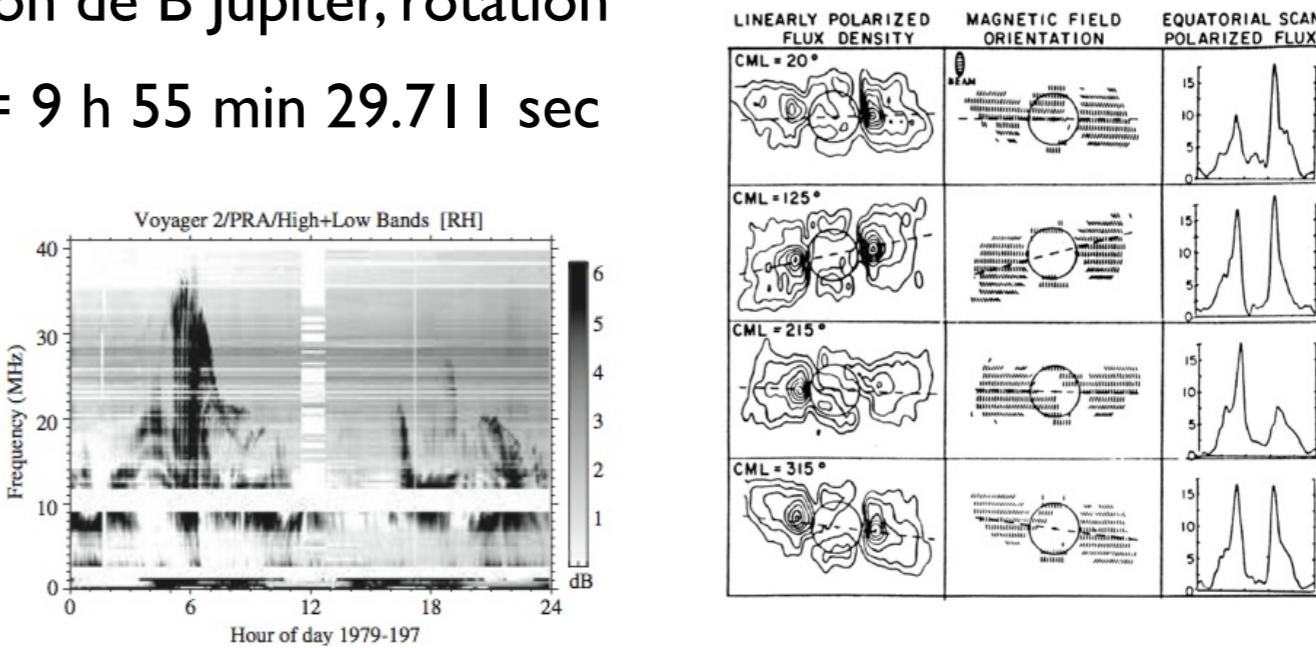
- dynamo (rotation+convection d'un fluide conducteur)
- dynamo rémanente (Mars, Lune)
- induit (J/S satellites)



Planet or satellite	Observed surface field (in T, approximate)	Comments and interpretation [Stevenson, 2003]
Mercury	2×10^{-7}	Not well characterized or understood
Venus	$< 10^{-8}$ (global); no useful constraint on local fields.	No dynamo. Small remanence
Earth	5×10^{-5}	Core dynamo
Moon	Patchy (10^{-9} – 10^{-7}). Impact-generated? No global field	Ancient dynamo?
Mars	Patchy but locally strong (10^{-9} – 10^{-4}) field	Ancient dynamo, remanent magnetic lineations
Jupiter	4.2×10^{-4}	Dynamo (extends to near surface)
Io	$< 10^{-6}$?	Complex (deeply imbedded in Jovian field)
Europa	10^{-7}	Induction response (salty water ocean)
Ganymede	2×10^{-6}	Dynamo likely
Callisto	4×10^{-9}	Induction response (salty water ocean)
Saturn	2×10^{-5}	Dynamo (deep down)
Titan	$< 10^{-7}$	Need more data
Uranus	2×10^{-5}	Dynamo (uncertain depth)
Neptune	2×10^{-5}	Dynamo (uncertain depth)

Mesures & représentation des B planétaires

- à distance = radio \Rightarrow existence, intensité, inclinaison de B Jupiter, rotation
- \Rightarrow system III (1965.0) de longitude magnétique : $P = 9 \text{ h } 55 \text{ min } 29.711 \text{ sec}$

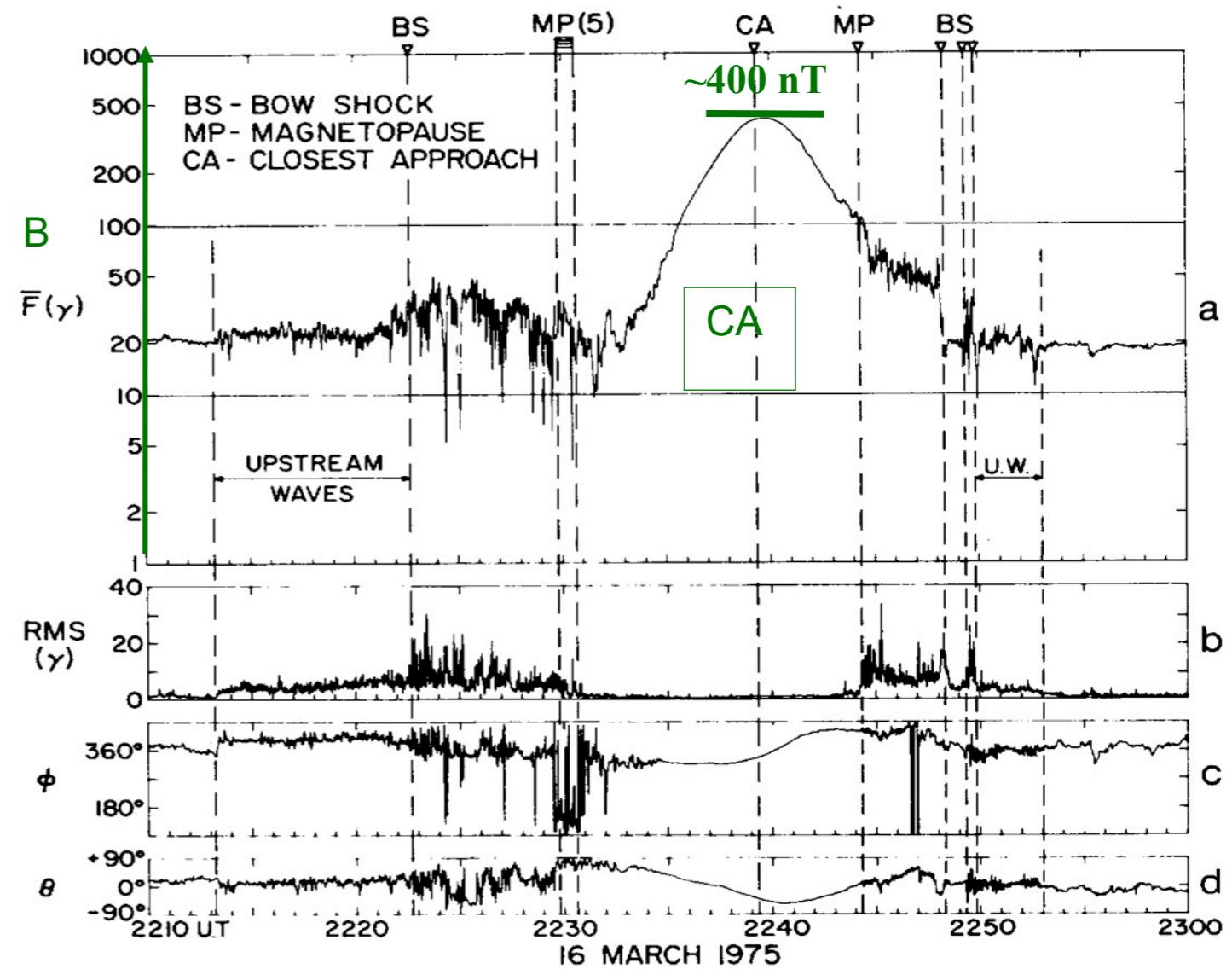
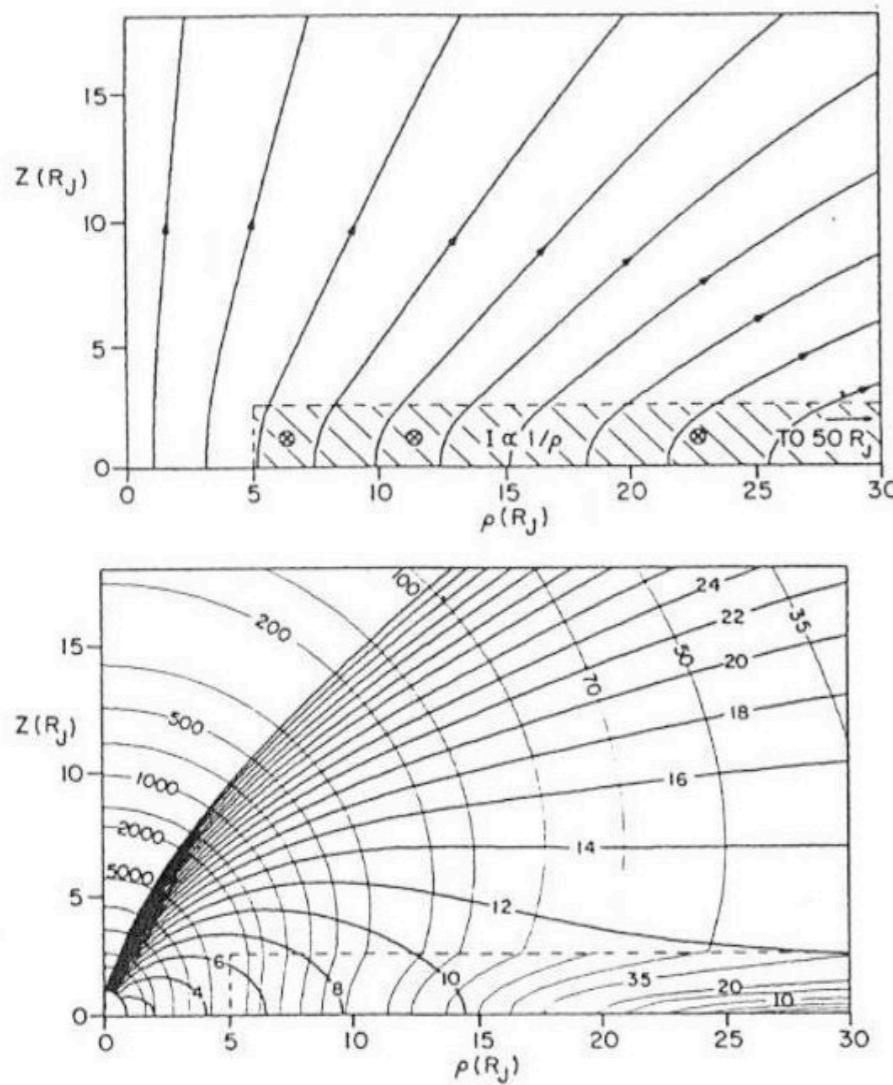


- localement par magnétomètres sur trajectoires orbitales ou fly-bys (+ proches)
- \Rightarrow description via harmoniques sphériques contraintes jusqu'à un ordre 3-5 (Terre = 14)
- = troncature de développements à ordre + élevé

Planète	Terre	Jupiter	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R_p (km)	6378	71372	71372	60330	25600	24765
Modèle	IGRF 2000	O6	VIT4	Z3	Q3	O8
g_1^0	-0.29615	+4.24202	+4.28077	+0.21535	+0.11893	+0.09732
g_1^1	-0.01728	-0.65929	-0.75306	0	+0.11579	+0.03220
h_1^1	+0.05186	+0.24116	+0.24616	0	-0.15685	-0.09889
g_2^0	-0.02267	-0.02181	-0.04283	+0.01642	-0.06030	+0.07448
g_2^1	+0.03072	-0.71106	-0.59426	0	-0.12587	+0.00664
h_2^1	-0.02478	-0.40304	-0.50154	0	+0.06116	+0.11230
g_2^2	+0.01672	+0.48714	+0.44386	0	+0.00196	+0.04499
h_2^2	-0.00458	+0.07179	+0.38452	0	+0.04759	-0.00070
g_3^0	+0.01341	+0.07565	+0.08906	+0.02743	0	-0.06592
g_3^1	-0.02290	-0.15493	-0.21447	0	0	+0.04098
h_3^1	-0.00227	-0.38824	-0.17187	0	0	-0.03669
g_3^2	+0.01253	+0.19775	+0.21130	0	0	-0.03581
h_3^2	+0.00296	+0.34243	+0.40667	0	0	+0.01791
g_3^3	+0.00715	-0.17958	-0.01190	0	0	+0.00484
h_3^3	-0.00492	-0.22439	-0.35263	0	0	-0.00770
M ^t dipolaire ($G \cdot R_p^3$)	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

Mesures & représentation des B planétaires

- Jupiter (& Saturne): disque de courant explicite dans l'équateur centrifuge: 300 MA ($5-50 \times 5 R_J$)
- Saturne: B aligné avec axe de rotation !
- Mercure: asymétrie N/S, équateur magnétique décalé de $0.2 R_M$ vers le Nord



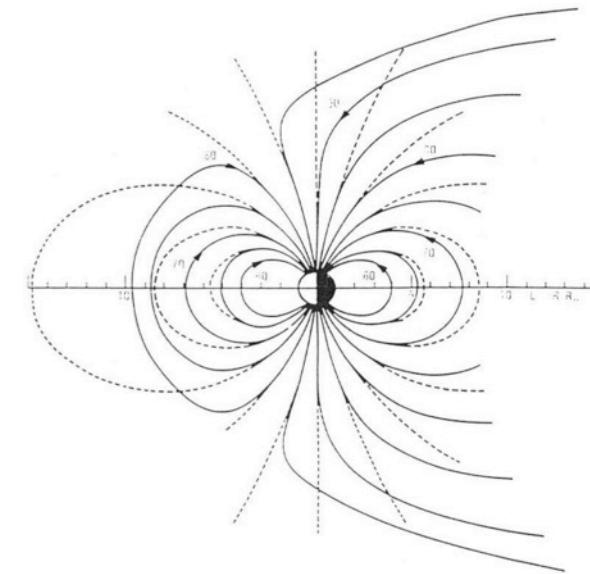
Origine & taille de la magnétosphère

- Équilibre de pression VS / B planétaire :

$$P_{VS} = KNmV^2 \cos^2 \chi \quad = \quad P_{MS} = (2B_p)^2 / 2\mu_0 \quad (K = 1-2)$$

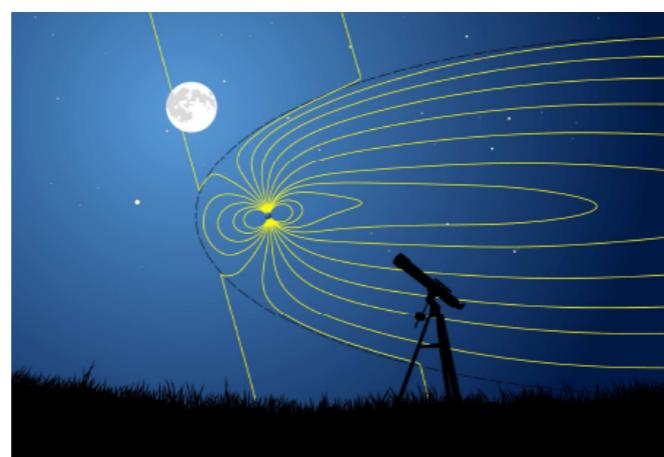
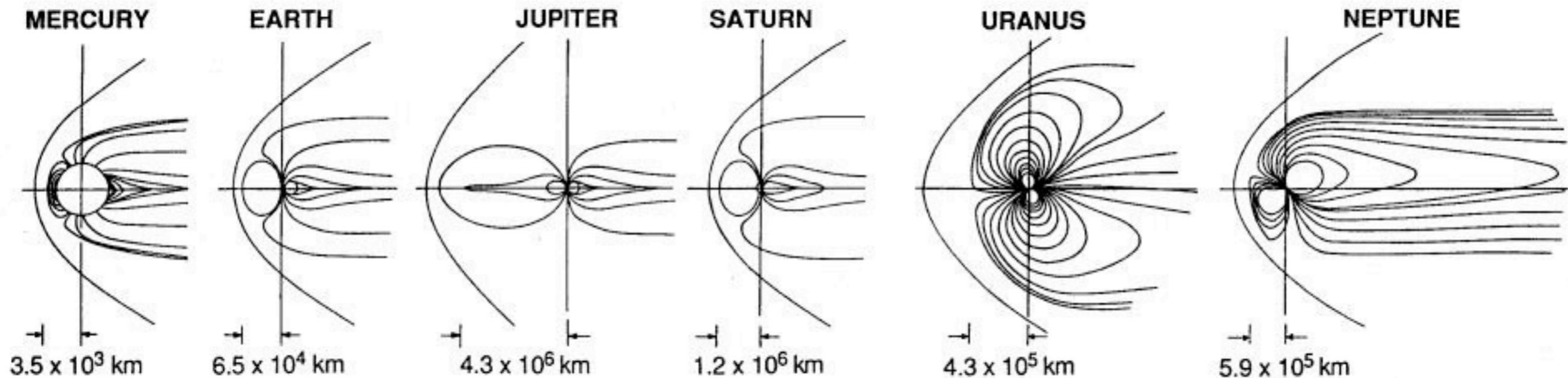
- Magnétopause (point subsolaire) : $R_{MP} = (2 B_{eq}^2 / \mu_0 K N m V^2)^{1/6}$

Champ dipolaire : $B_p = B_{eq} (1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2} / R^3$

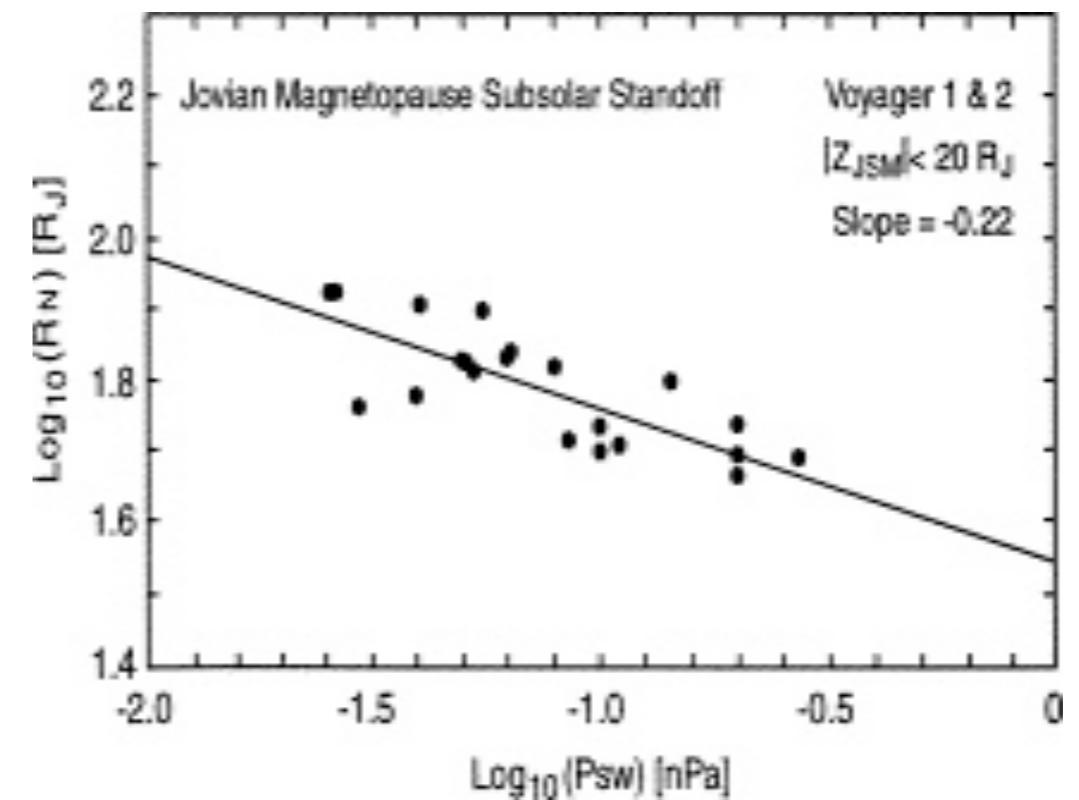


	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R_p (km)	2 439	6 378	71 492	60 268	25 559	24 764
D orbitale (UA)	0.39	1	5.2	9.5	19.2	30.1
M_{dip} (G.km ³)	5.5×10^7	7.9×10^{10}	1.6×10^{15}	4.7×10^{13}	3.8×10^{12}	2.2×10^{12}
Champ à l'équateur B_e (G)	0.003	0.31	4.3	0.21	0.23	0.14
Inclinaison [B, Ω] (°)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

Origine & taille de la magnétosphère

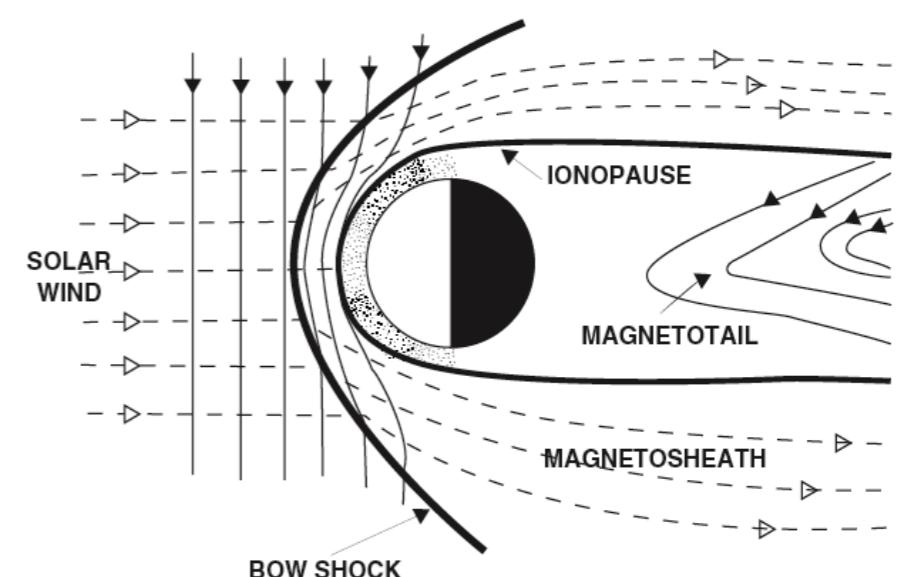
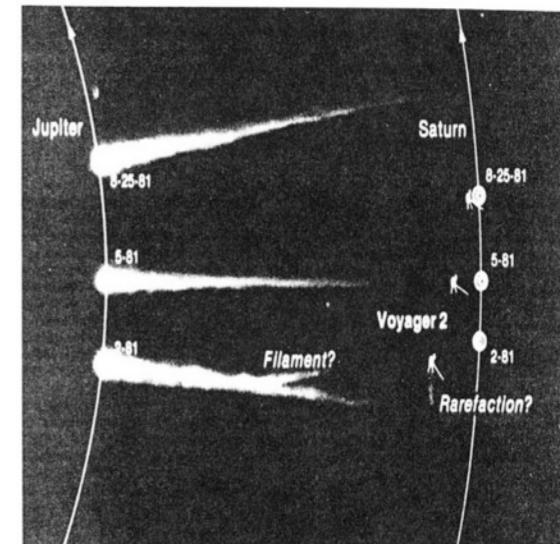
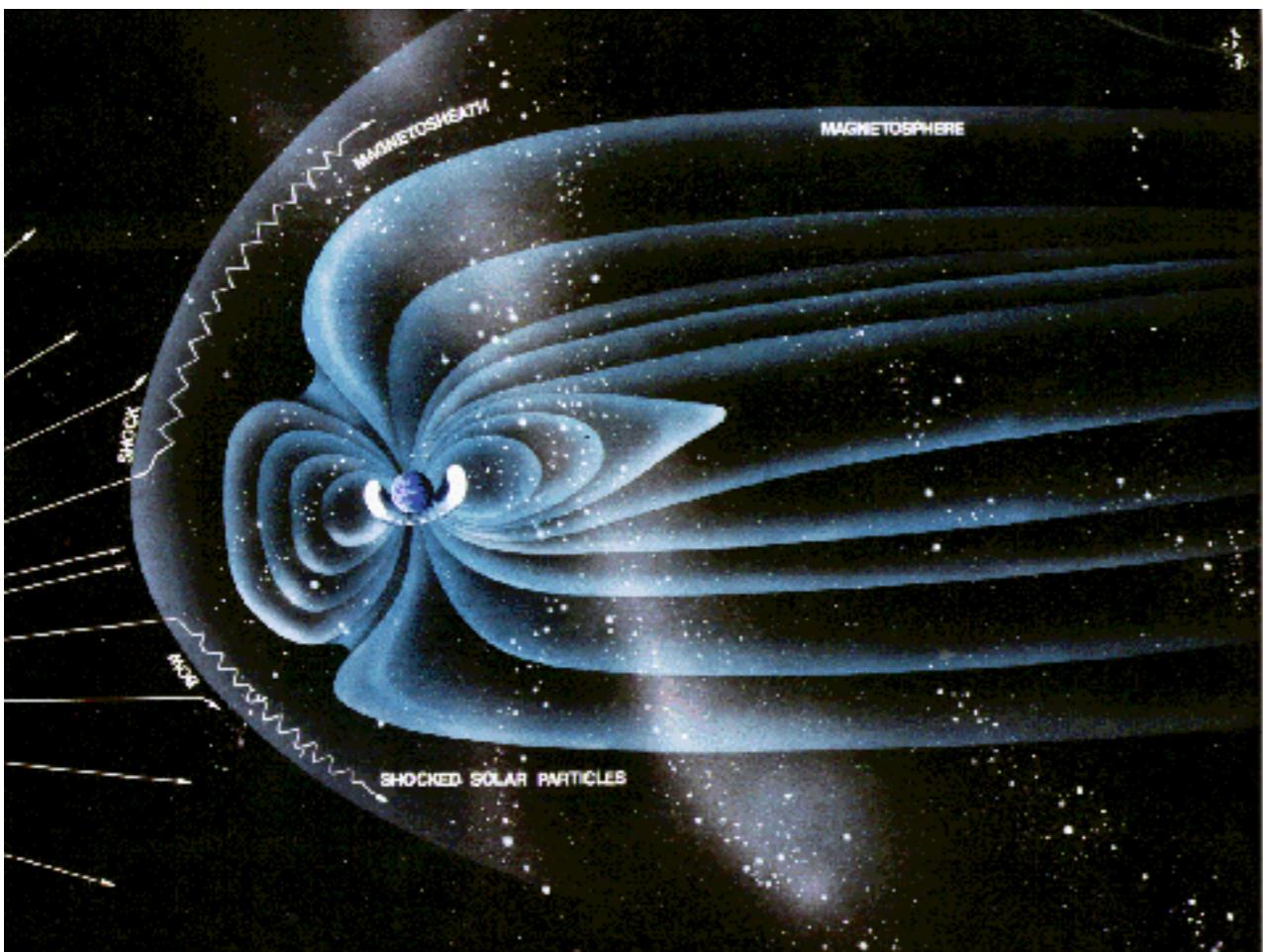


MS de Jupiter + compressible ($R_{MP} \propto P_{VS}^{-1/4.5}$)
⇒ pression de plasma interne



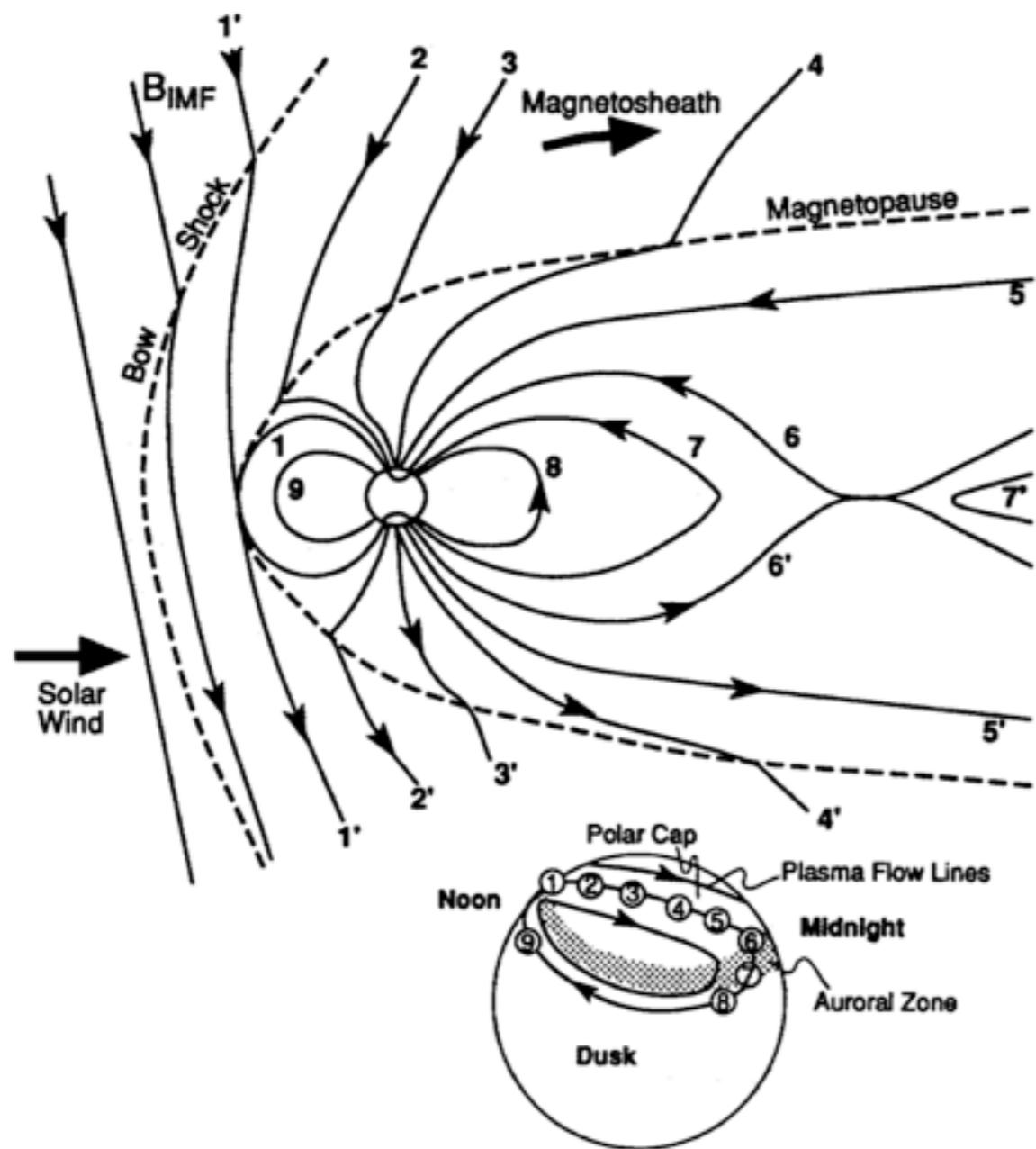
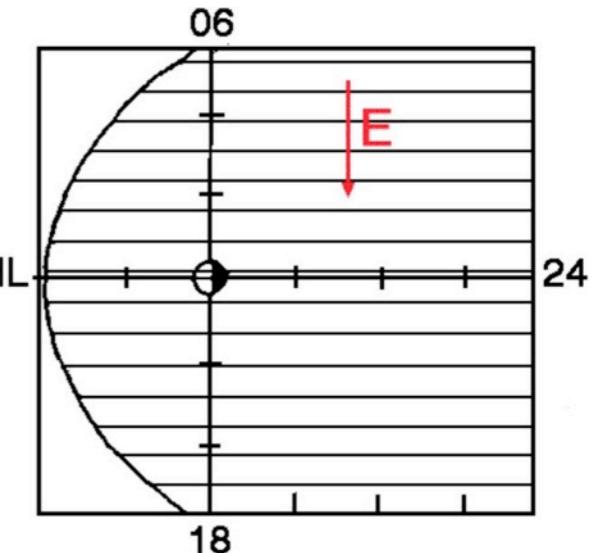
Forme de la magnétosphère

- Choc en amont, Cusp près des pôles magnétiques, B "draping" (id. comètes)
⇒ queue (jusqu'à Saturne pour Jupiter)
- Si pas de B intrinsèque, MS induite, BS, B draping, queue & choc mais pas de cusp
- Mercure: cusp S très ouvert (B asymétrique) ⇒ bombardement de la surface par le VS



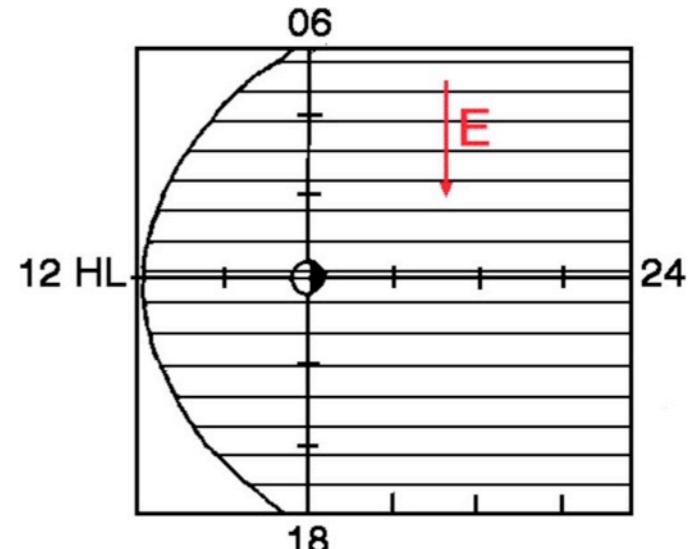
Dynamique interne

$$\varphi_{\text{conv}} \sim \varepsilon V_{\text{SW}} B_{\text{SW}} R R_j \sin \theta_{12-24h} \quad (\text{Convection} = \text{Cycle de Dungey})$$



Dynamique interne

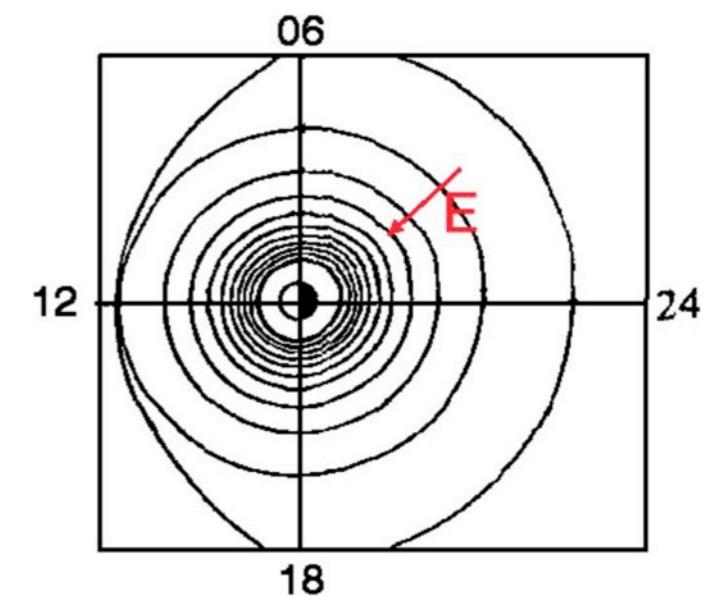
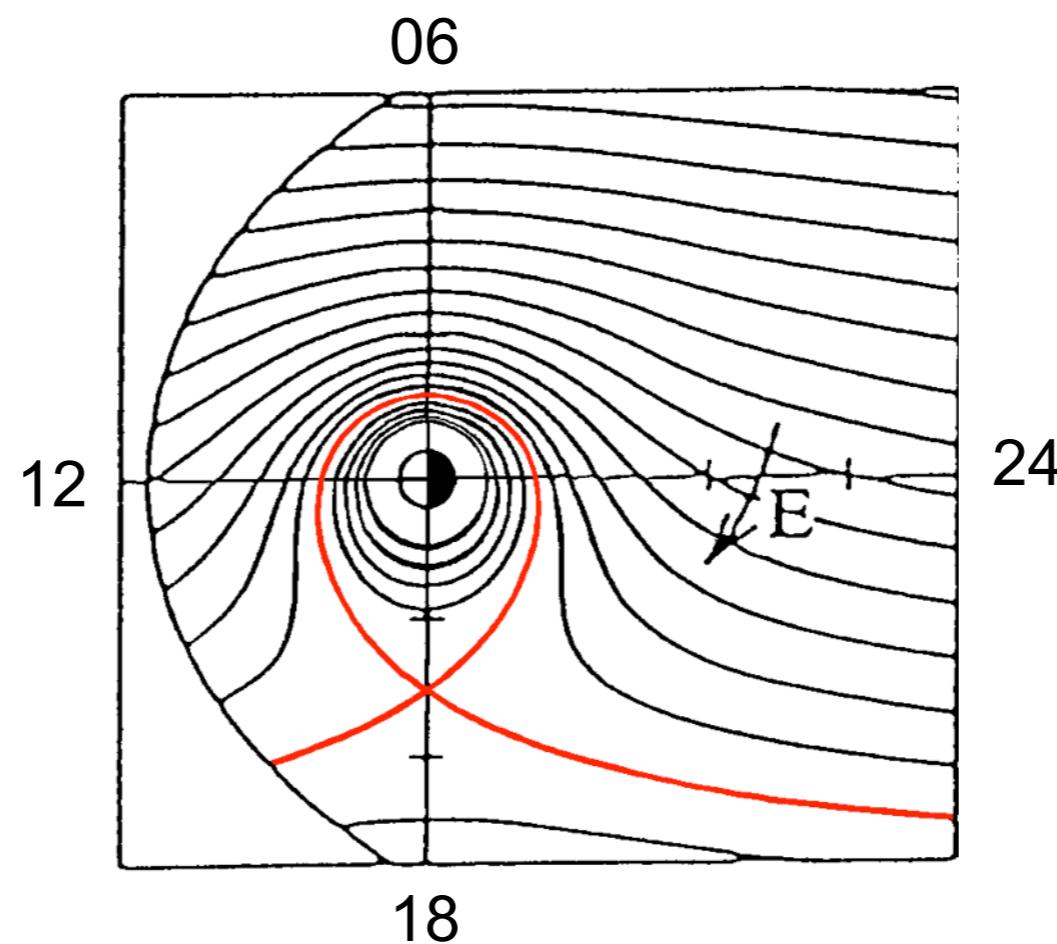
$$\varphi_{\text{conv}} \sim \varepsilon V_{\text{SW}} B_{\text{SW}} R R_p \sin \theta_{12-24h} \quad (\text{Convection} = \text{Cycle de Dungey})$$



$$\varphi_{\text{corot}} \sim \Omega B_e R_p^2 / R \quad (\text{Corotation} \Rightarrow \text{plasmasphère})$$

équipotentielles = lignes d'écoulement du plasma thermique

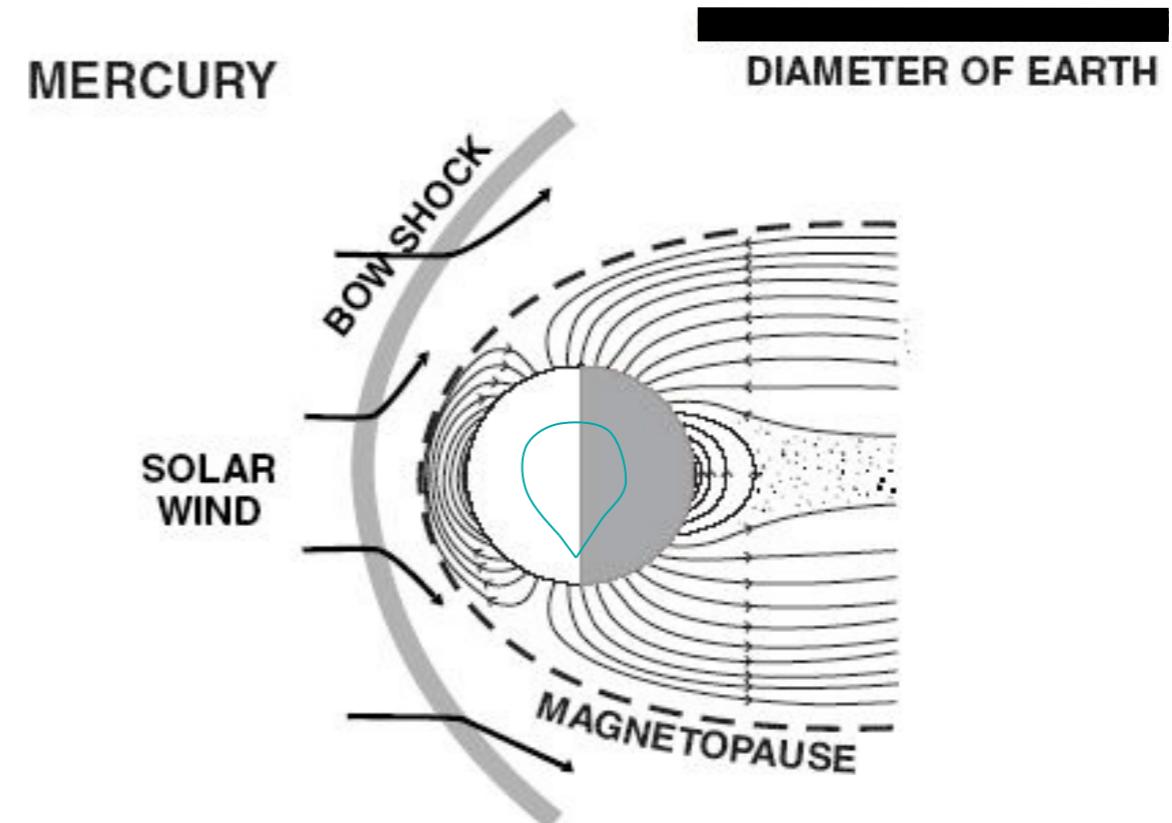
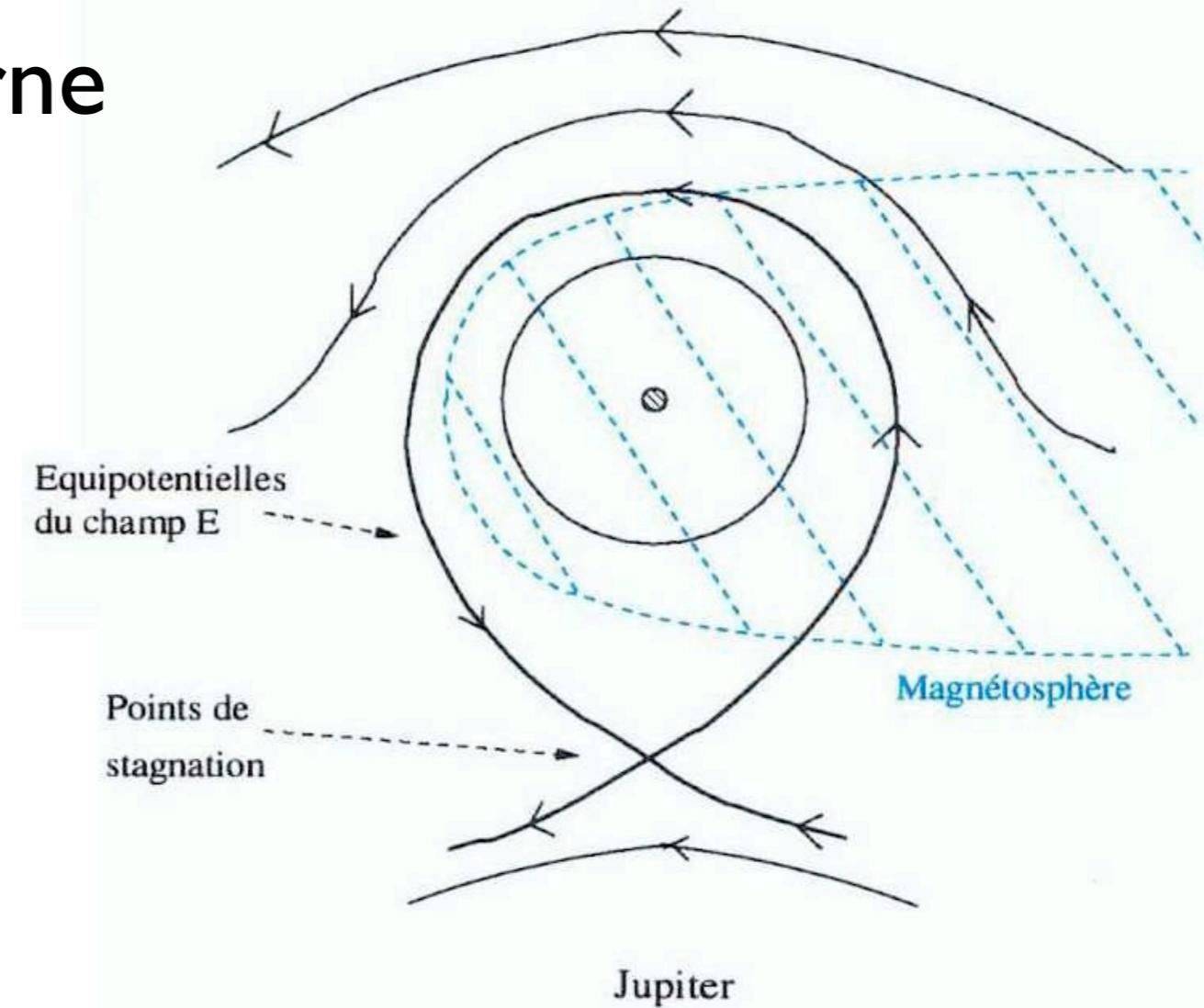
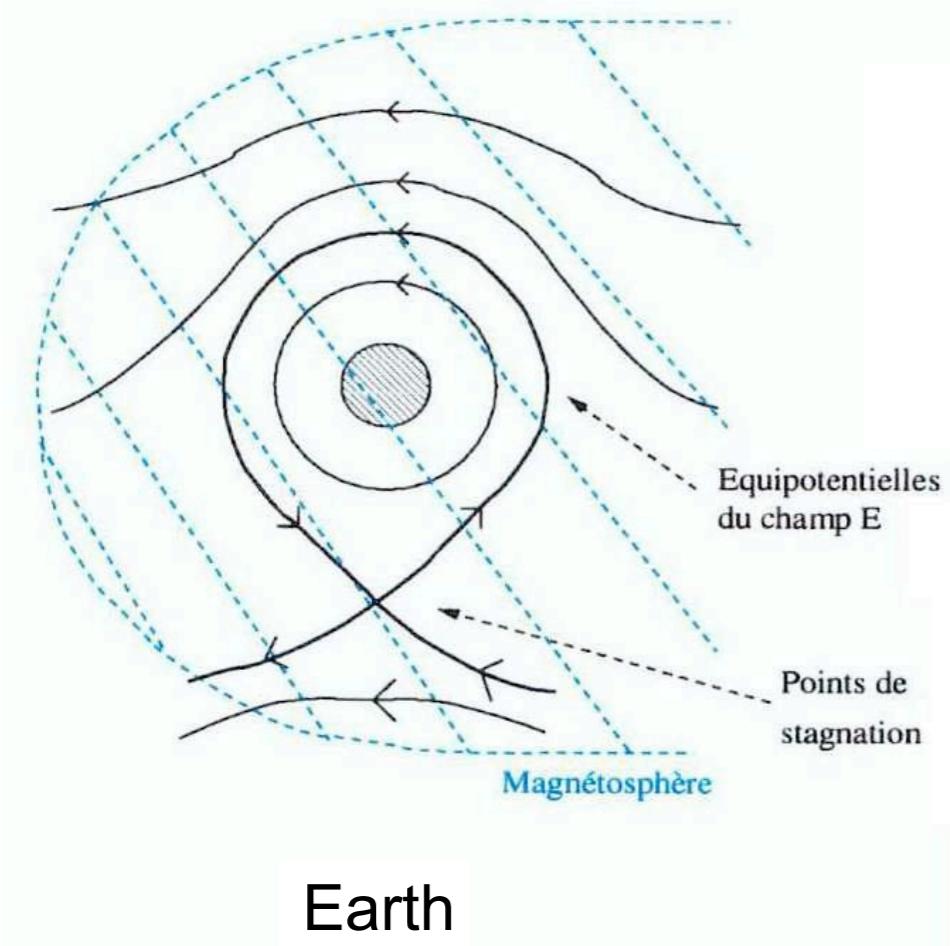
\Rightarrow superposition = circulation globale



Dynamique interne

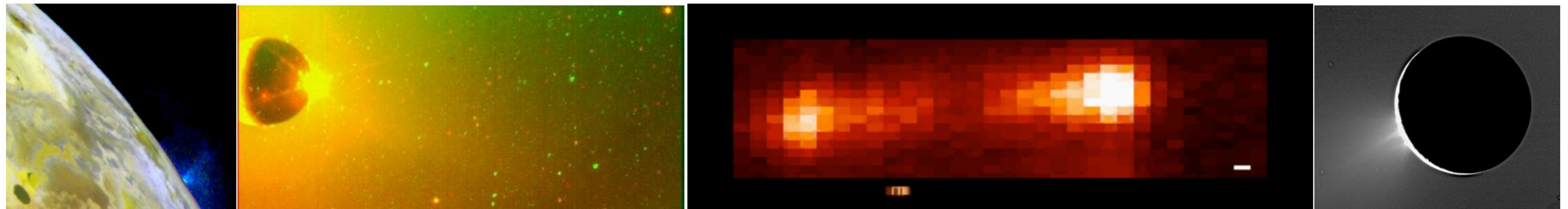
	Mercure	Terre	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
R _p (km)	2 439	6 378	71 492	60 268	25 559	24 764
M _{dip} (G.km ³)	5.5×10^7	7.9×10^{10}	1.6×10^{15}	4.7×10^{13}	3.8×10^{12}	2.2×10^{12}
Champ à l'équateur B _e (G)	0.003	0.31	4.3	0.21	0.23	0.14
R _{MP} (R _p) calculée [mesurée]	1.4 [~1.5]	9 [~10]	40 [~90]	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

Dynamique interne



Sources de plasma

- VS, ionosphère, satellites (surface, anneaux)

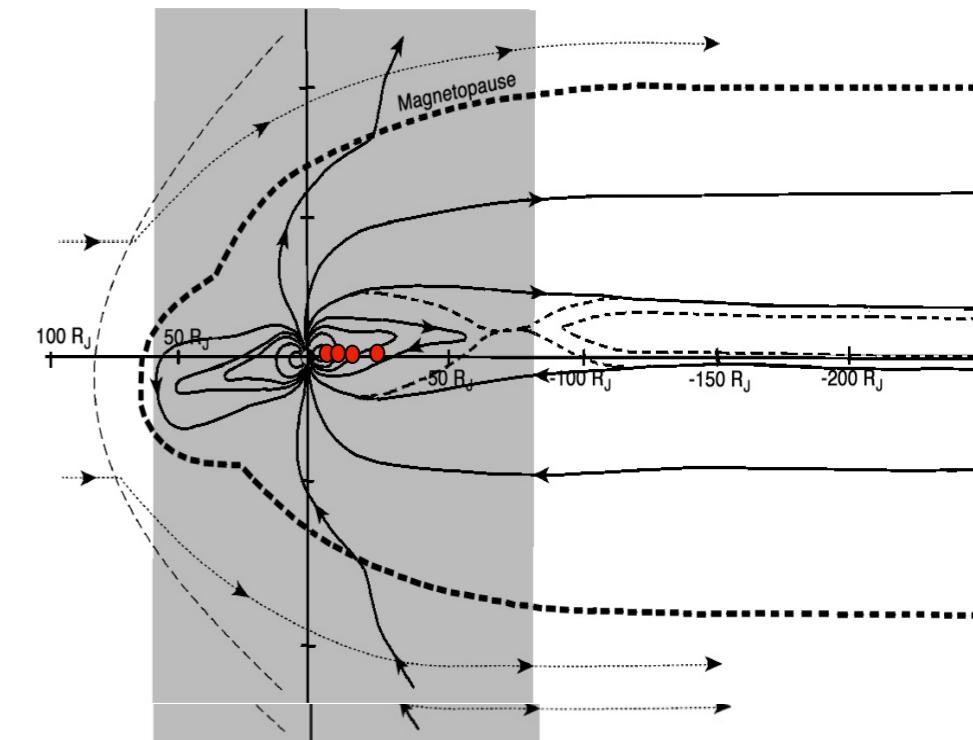
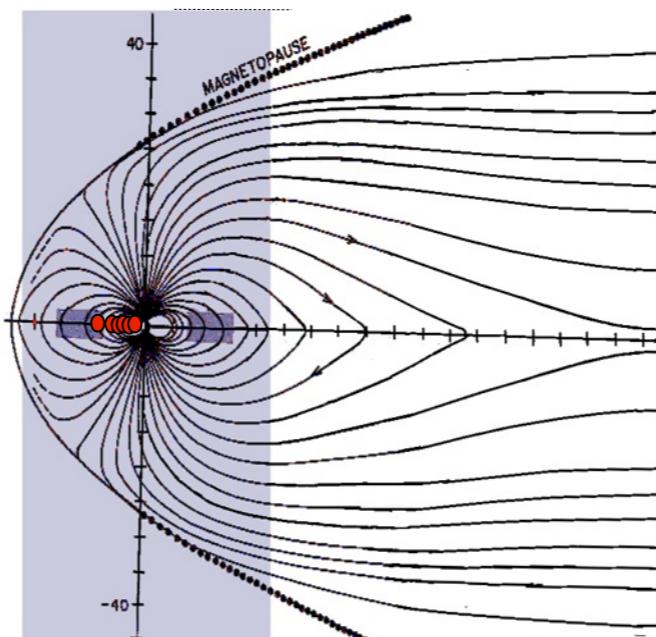
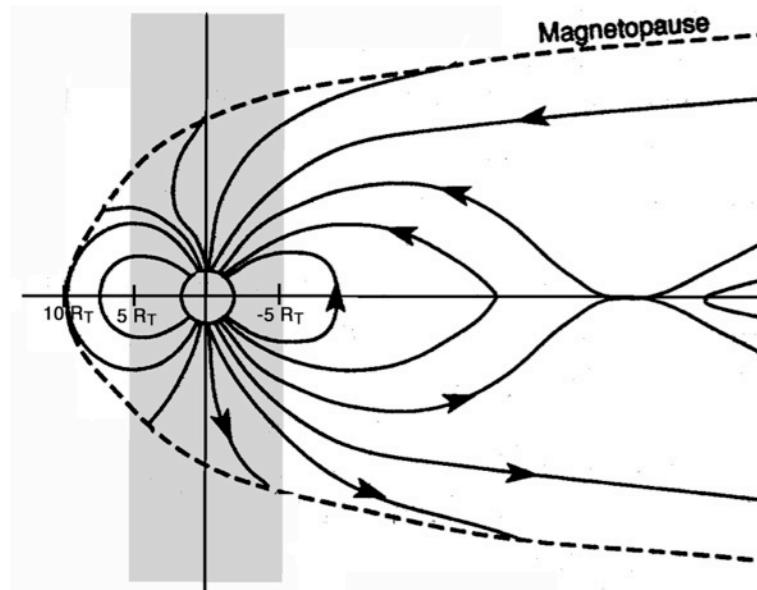


- Sources Jupiter >> Saturne, Uranus, Neptune
- $N_{\text{neutres}}/N_{\text{plasma}} = 100 @ \text{Saturne}, 0.003 @ \text{Jupiter}$
- Masse du plasma stockée $\sim 10^7 \text{ kg} @ \text{Terre}, \sim 10^{10} \text{ kg} @ \text{Jupiter}$

Sources de plasma

⇒ satellites = sources de plasma dans la région de corotation, au delà de l'orbite synchrone ($J, S\dots$)

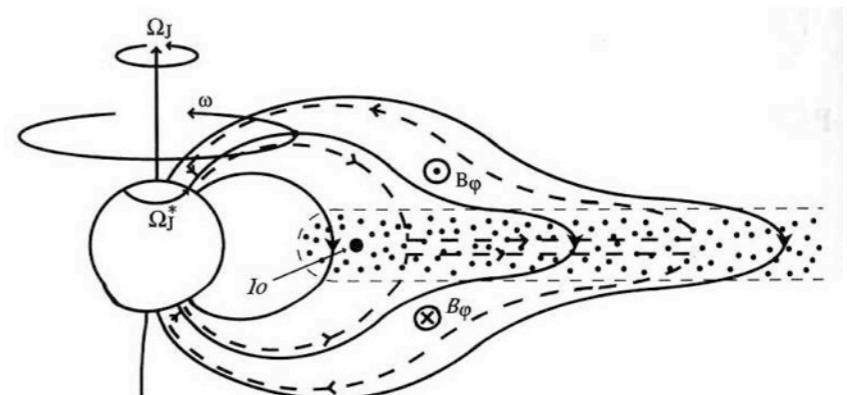
$$F_{\text{centrifuge}} = F_{\text{gravitation}}$$



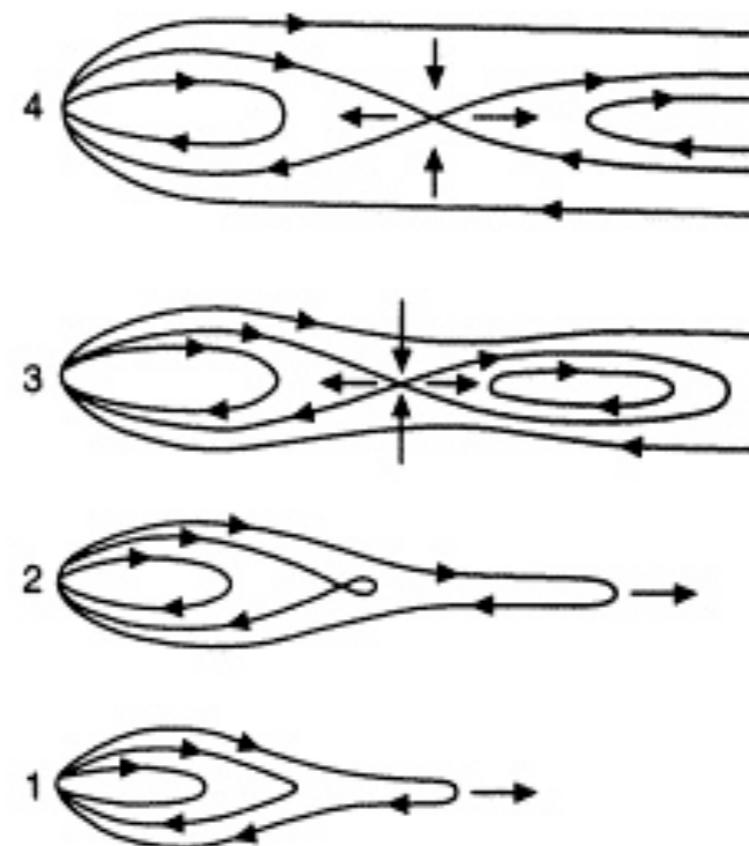
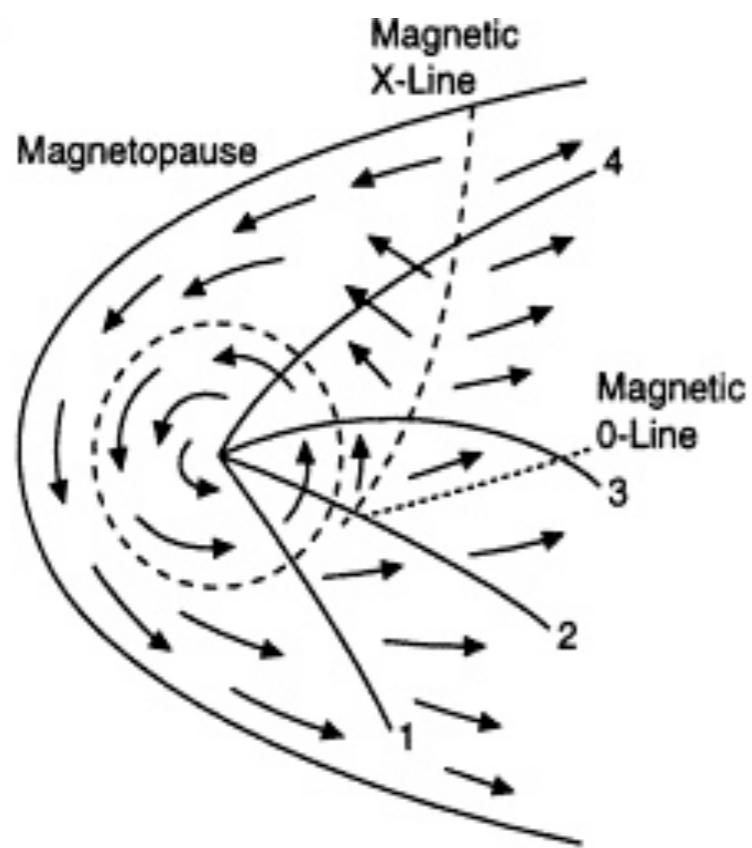
Planet	R_p [km]	Ω [rads/s]	G_{surf} [ms^{-2}]	$R_{\text{synch}}/R_{\text{planet}}$	Plasma sources
Mercury	2440	1.24×10^{-6}	3.3	96	None
Earth	6371	7.29×10^{-5}	9.8	6.6	Ionosphere
Jupiter	70000	1.77×10^{-4}	25.6	2.3	Io
Saturn	60000	1.71×10^{-4}	10.8	1.8	Rings, moons
Uranus	25500	1.01×10^{-4}	8.6	3.2	Moons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

Dynamique interne

- pickup / mass-loading \Rightarrow mise en corotation
- + force centrifuge (instabilité d'interchange) \Rightarrow transport radial \Rightarrow de corotation à sous-corotation
- \Rightarrow dynamique "rotationnelle", dominée en interne

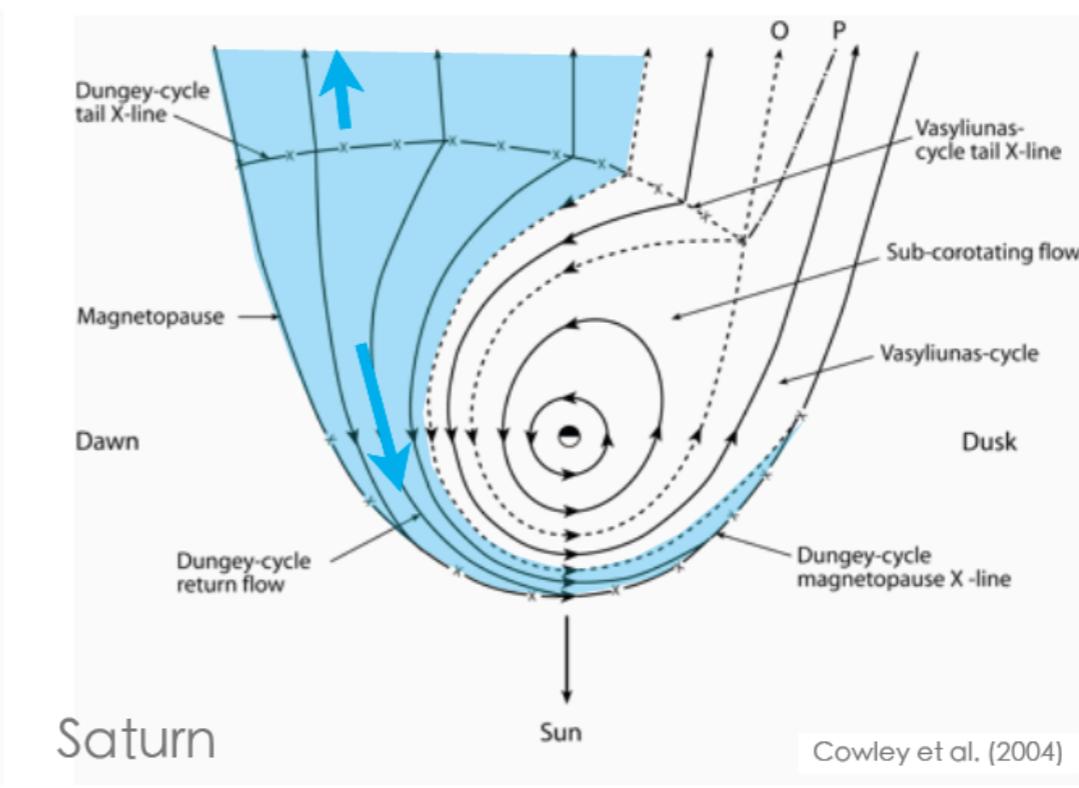
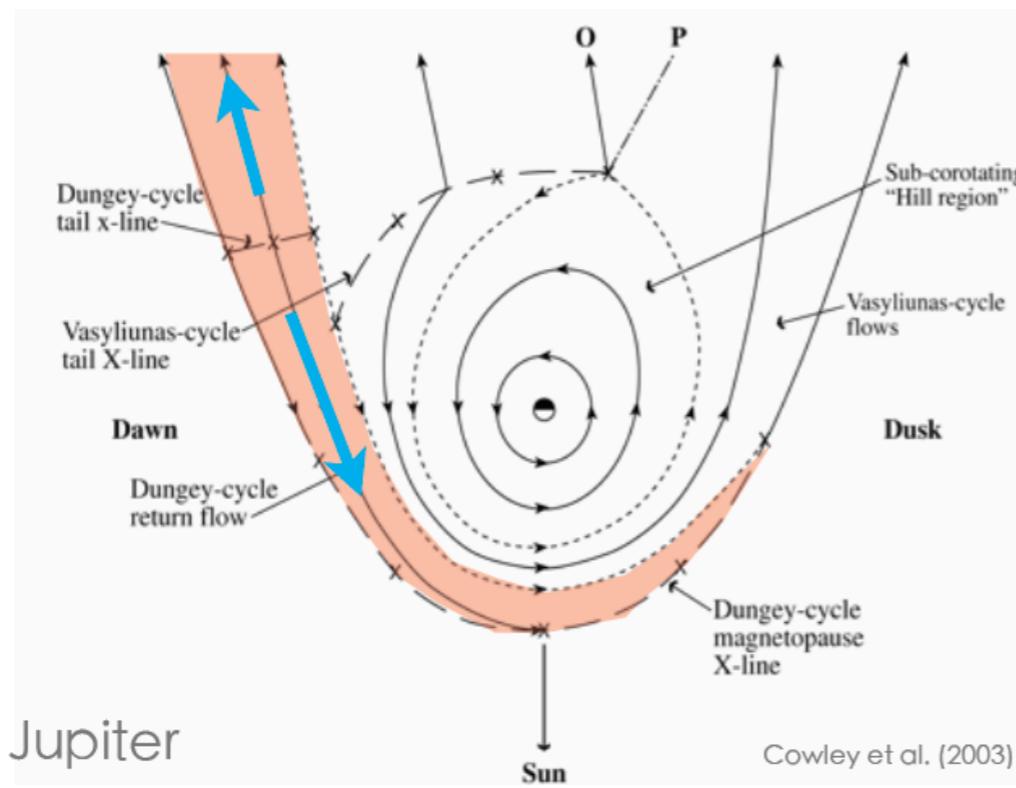
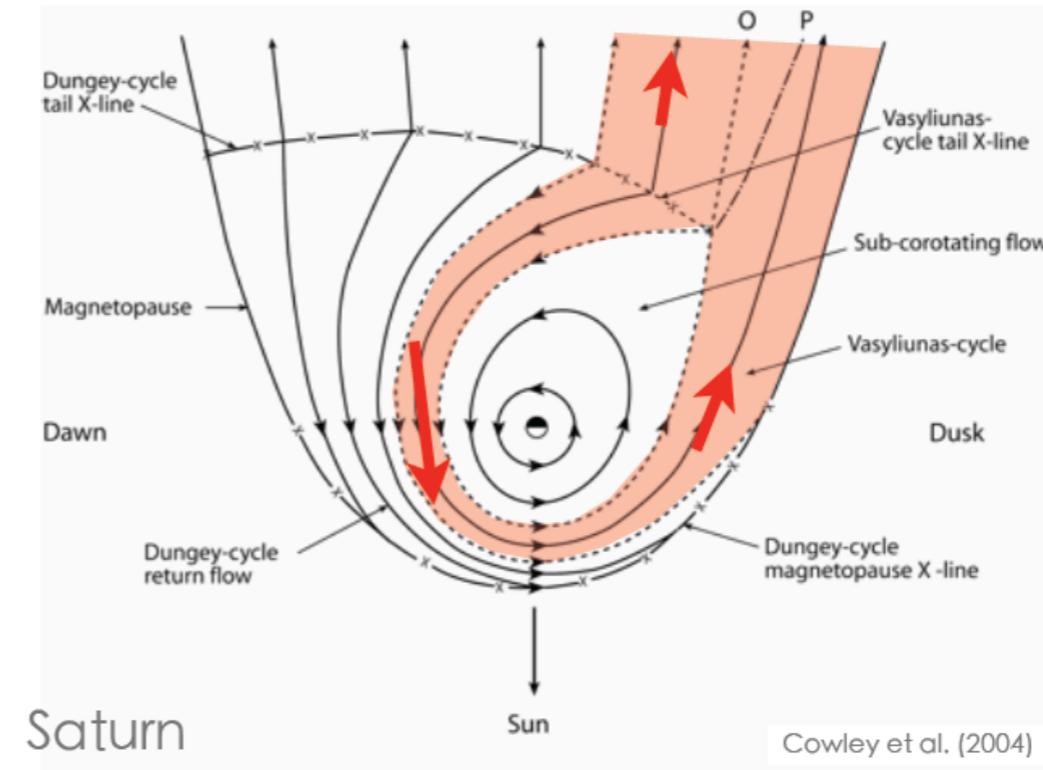
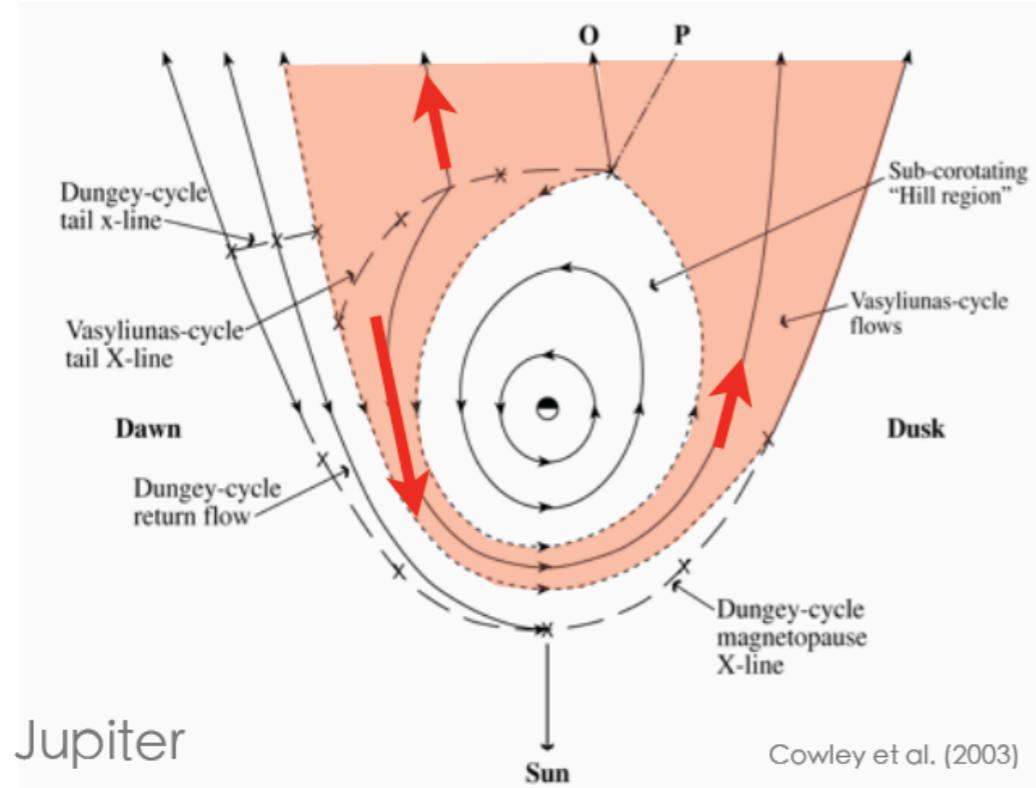


\Rightarrow cycle de Vasyliunas (dépend de B , R , vitesse de rotation)



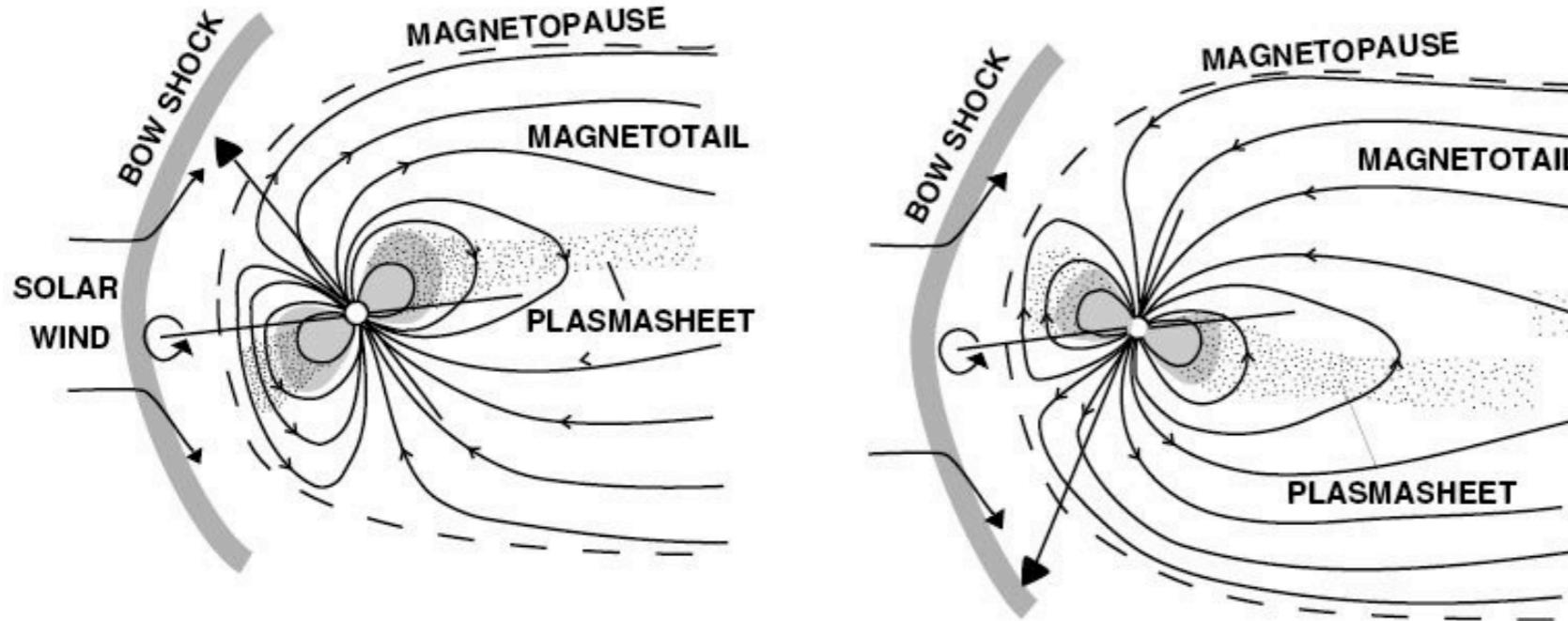
Dynamique interne

- Saturne = cas intermédiaire avec superposition des cycles de Dungey & Vasyliunas ?

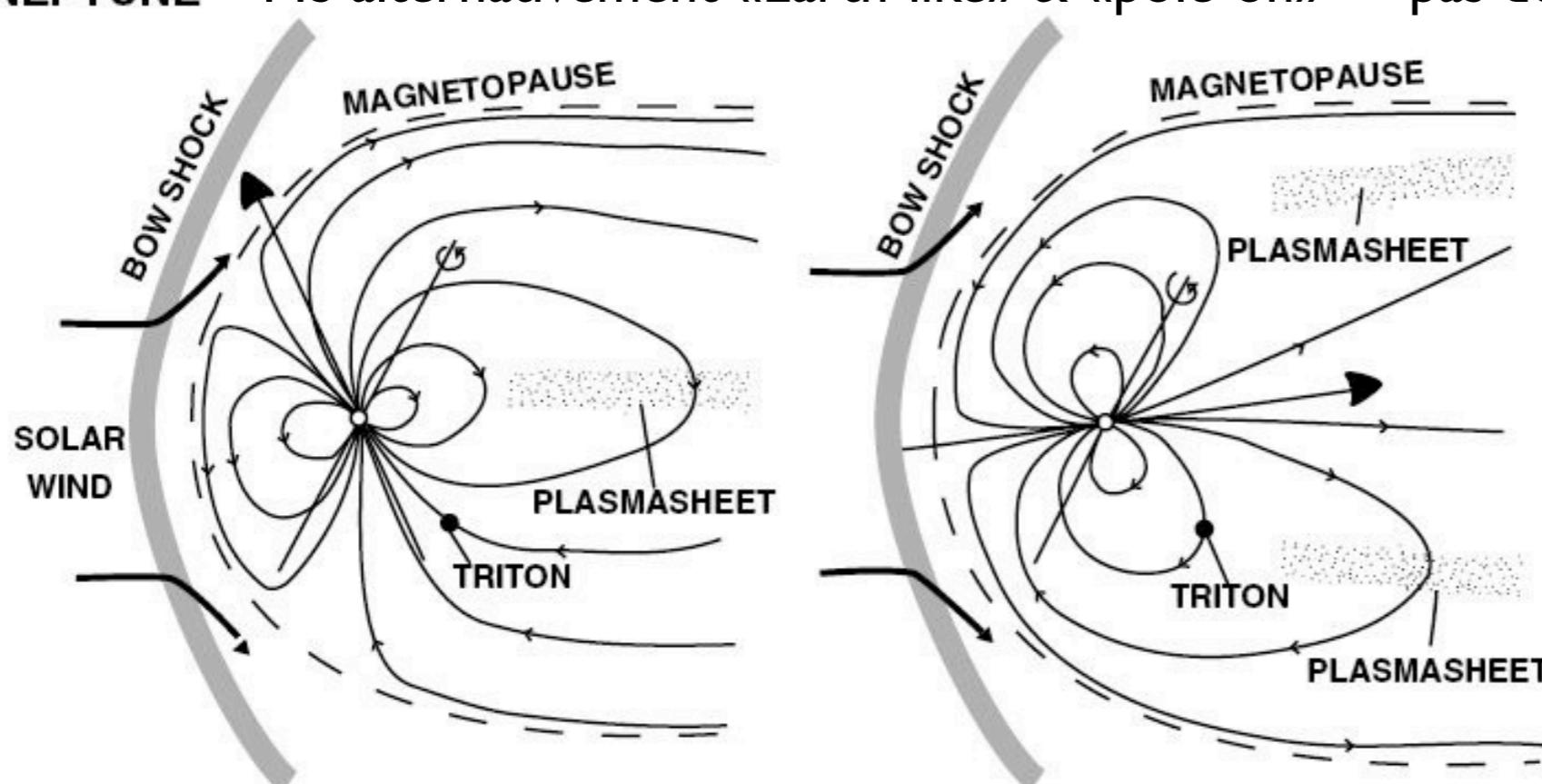


Dynamique interne

URANUS convection \perp corotation \Rightarrow trajectoires hélicoïdales du plasma ?

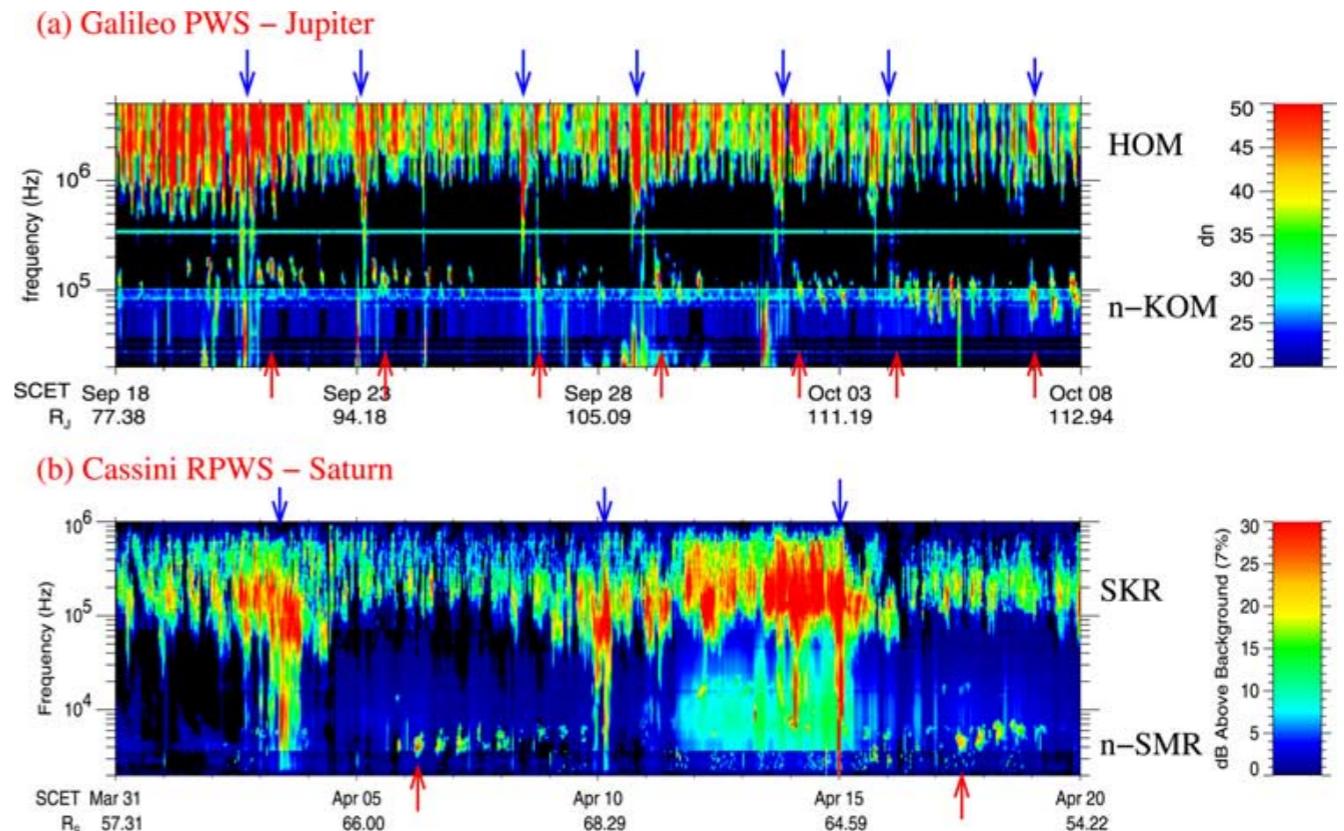


NEPTUNE MS alternativement «Earth-like» & «pole-on» \Rightarrow pas de plasmasphère, aurores à moyennes latitudes



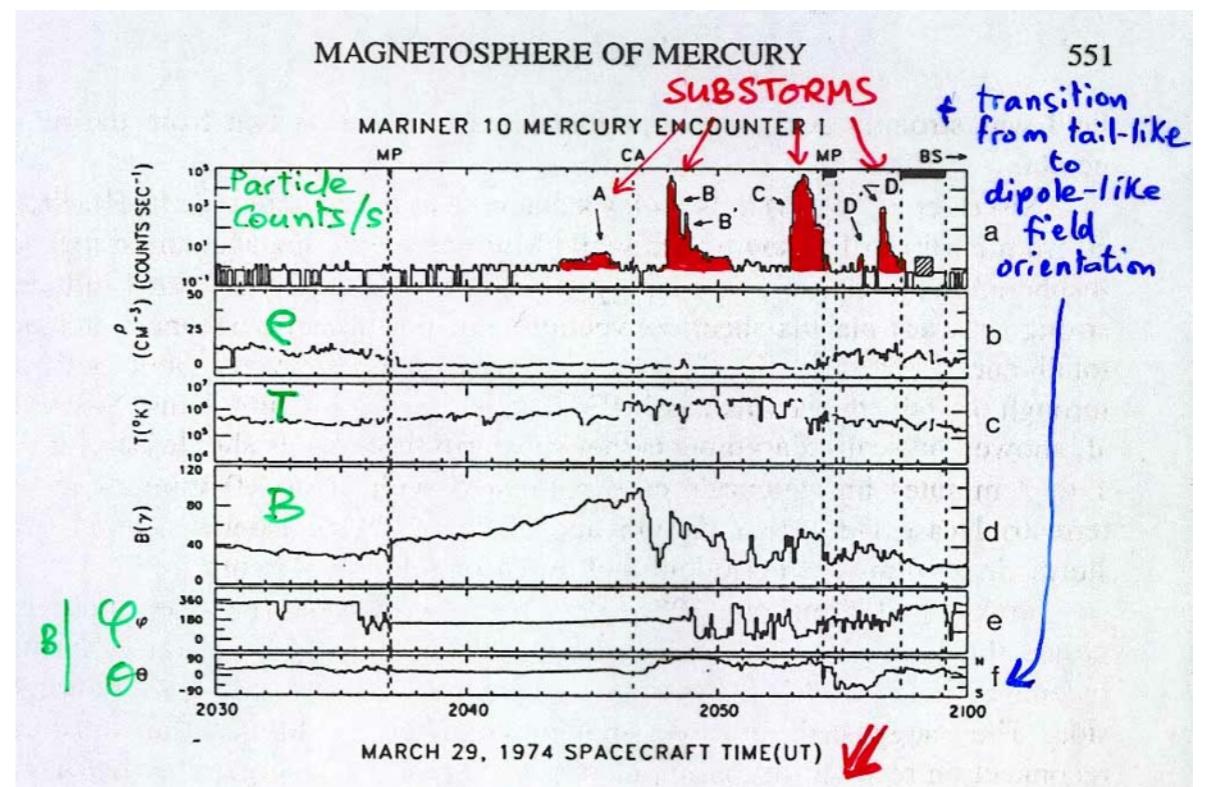
Dynamique interne / externe

- Reconfigurations de la MS due à la dynamique interne = événements énergétiques @ J & S



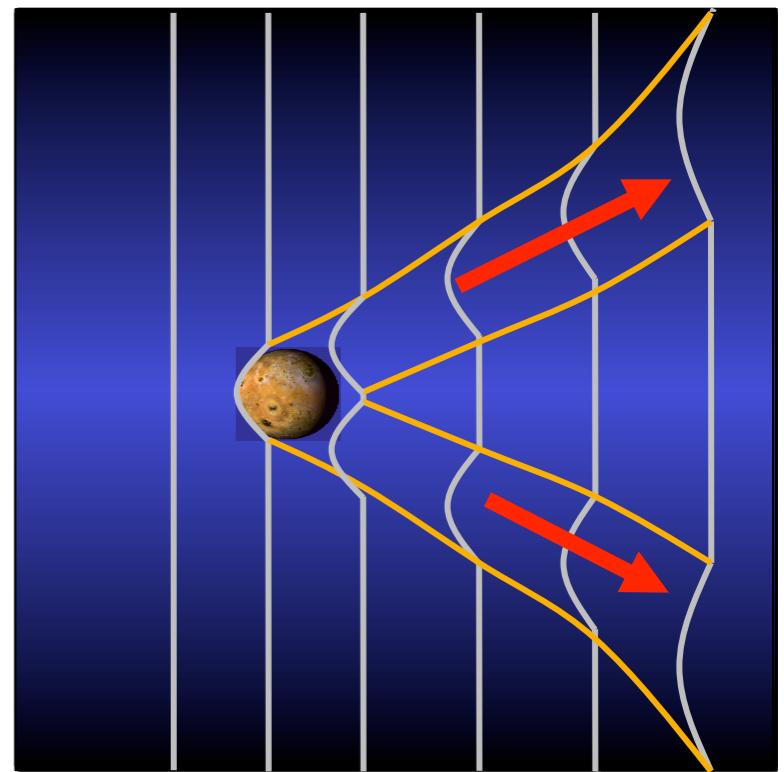
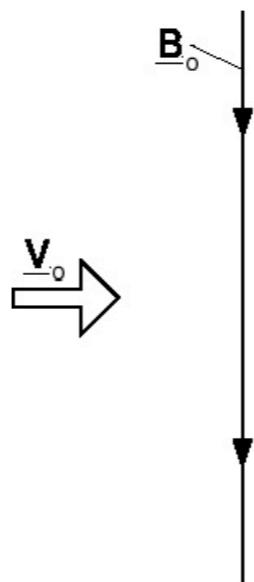
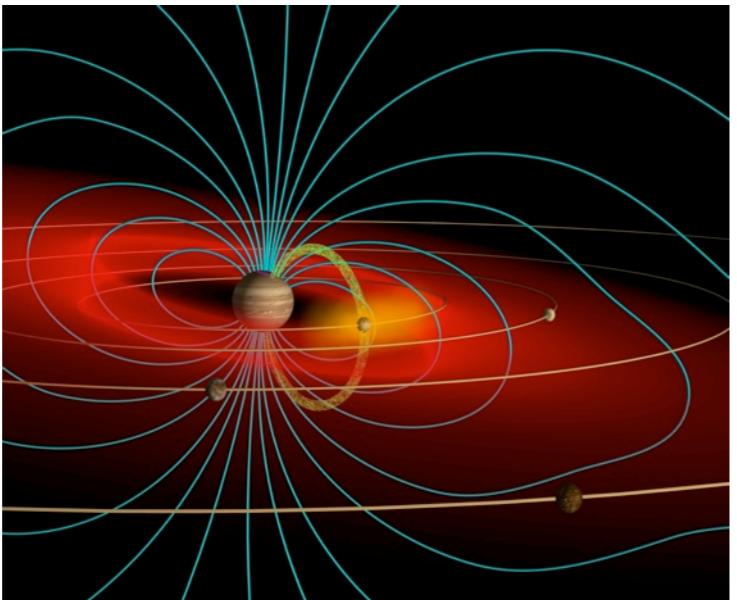
- Reconfigurations de la MS due à la dynamique externe (sous-orages / space weather @ T, S, M ... J?, U?)
J, U : compressions MS ~ orages ?

- Reconnexion / FTE observés par Mariner 10 & Messenger @ Mercure
⇒ burts d'e- 30-200 keV
⇒ sous-orages (brefs) ?

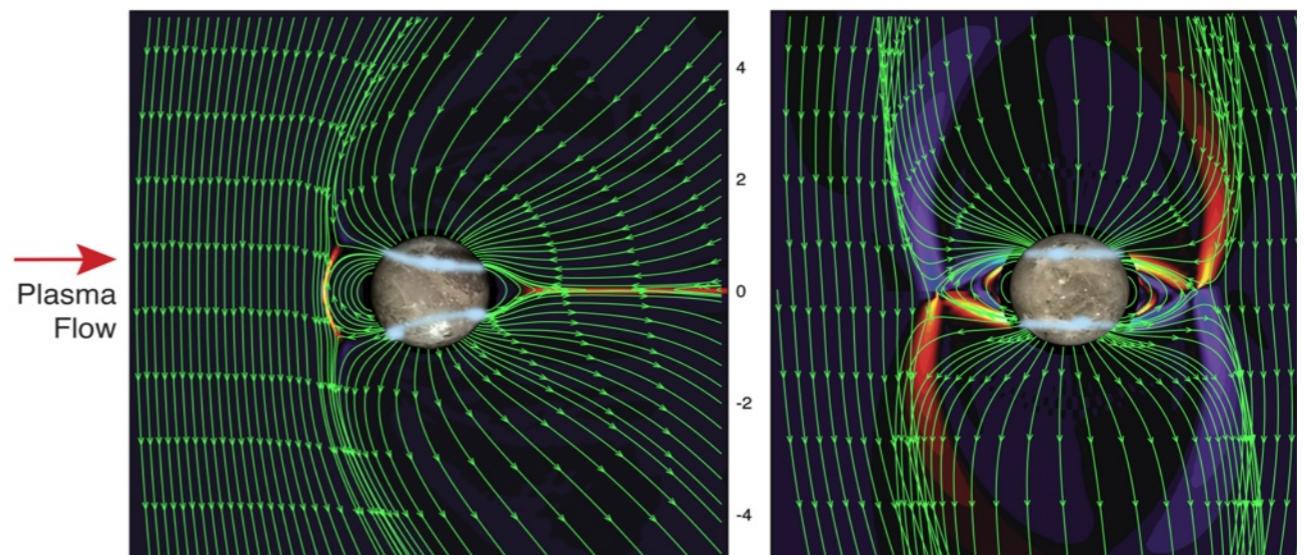
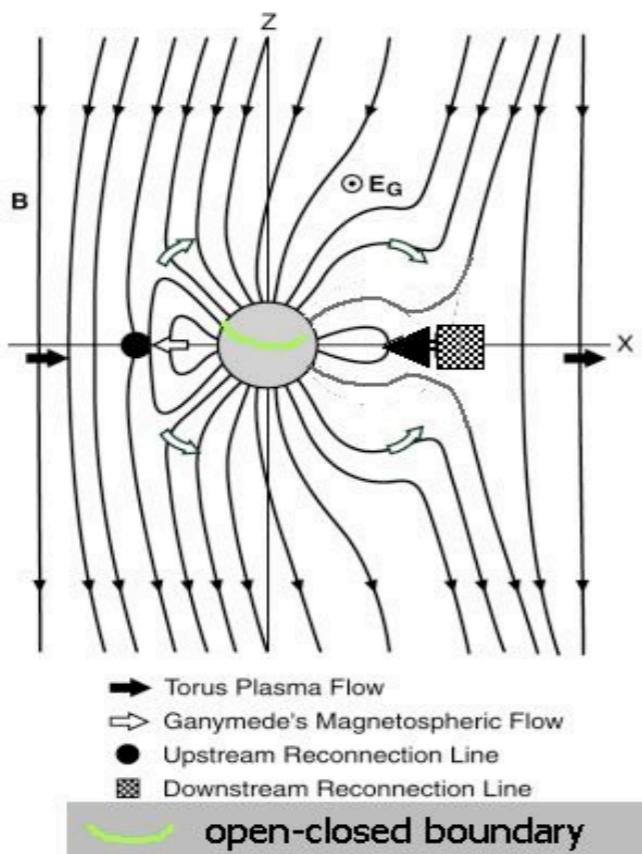


Interaction MS - satellites

- non magnétisés (= Io \Rightarrow ondes d'Alfvén / Inducteur Unipolaire)



- magnétisés ($=$ Ganymede \Rightarrow reconnexion)



Pas de bow shock

Energétique des interactions

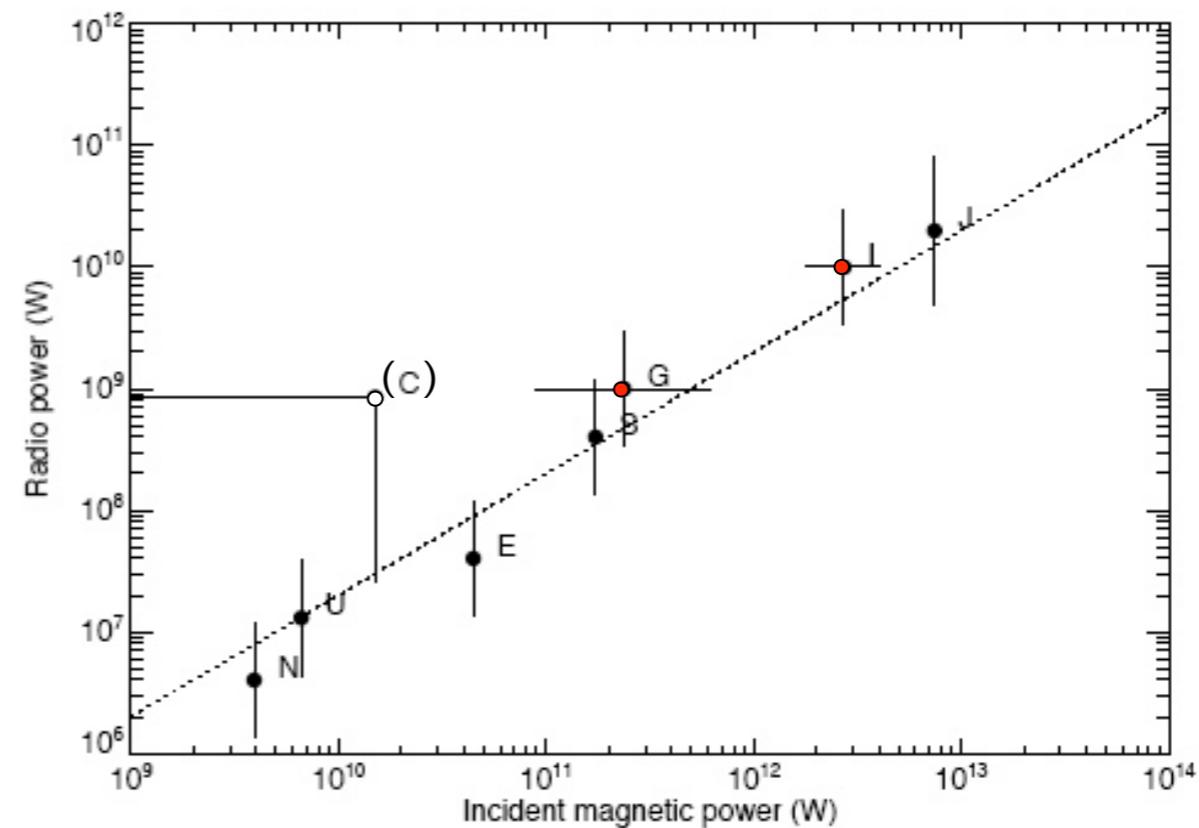
- Énergétique de l'interaction VS-MS & MS-satellites semble dominée par le flux du vecteur de Poynting sur l'obstacle (Akasofu, Zarka)

$$P_{\text{dissipée}} = \varepsilon B^2 / \mu_0 V \pi R_{\text{obs}}^2 \quad (\varepsilon \sim 0.1 - 0.2)$$

(bien que l'équilibre de pression fasse intervenir la pression cinétique du VS, mais les 2 varient = au-delà de l'orbite terrestre)

⇒ Lois d'échelle générales UV & Radio

$$P_{\text{radio}} \& P_{\text{UV}} \propto P_{\text{dissipée}}$$



Phénomènes "rotationnels"

- Jupiter: tous les phén. MS modulés par la rotation \Rightarrow Système III (1965.0) :

$\omega = 870.536^\circ/\text{day}$, $P = 9\text{h } 55\text{m } 29.71\text{ s}$ (méridien origine à 0h UT on 1/1/1965)
adopté par l'UAI en 1976 (précision ~ 40 msec $\sim 10^{-6}$), stable / décennies (ex:VIPAL)
= référence pour mesures de B, particules énergétiques, émissions radio ...

nKOM & variations de brillance d'ion S dans l'IPT & arcs DAM \Rightarrow période 1-10% + longue
 \Rightarrow système IV ? (rotation différentielle interne ?)

La plupart de ces phénomènes sont marginaux & à basse latitude \Rightarrow lag / interchange / transport
radial combiné au système III (le système IV n'existe pas, il couvre des lags $\sim 1\text{-}10\%$ / système III)

- Saturne : B + faible et aligné / Ω , pourtant modulation rotationnelle claire (\neq dans les 2 hémisphères!) \Rightarrow indépendante du tilt à l'ordre 0

Mais phénomènes variables + visibles qu'à Jupiter, où la corotation domine, & influence du VS + importante

\Rightarrow variations à long & court terme de P_rot_radio (SKR)

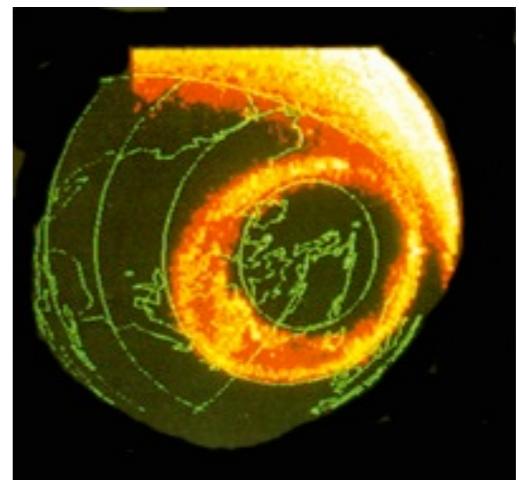
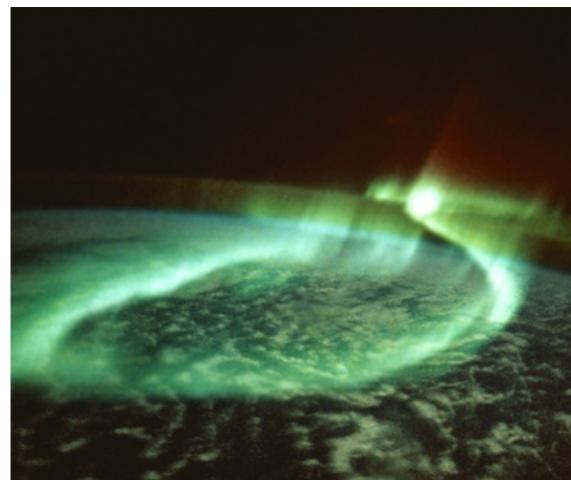
Très \neq Système IV car variation de la (DES) périodes & phases \sim continues

- Terre : modulation rotationnelle faible, peut-être mise en évidence via AKR (Lamy, Panchenko)
- U & N : modulation rotationnelle par le tilt de B probablement dominante

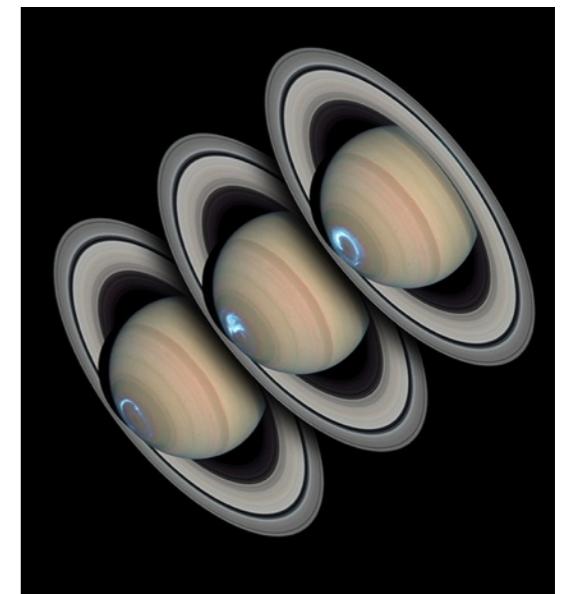
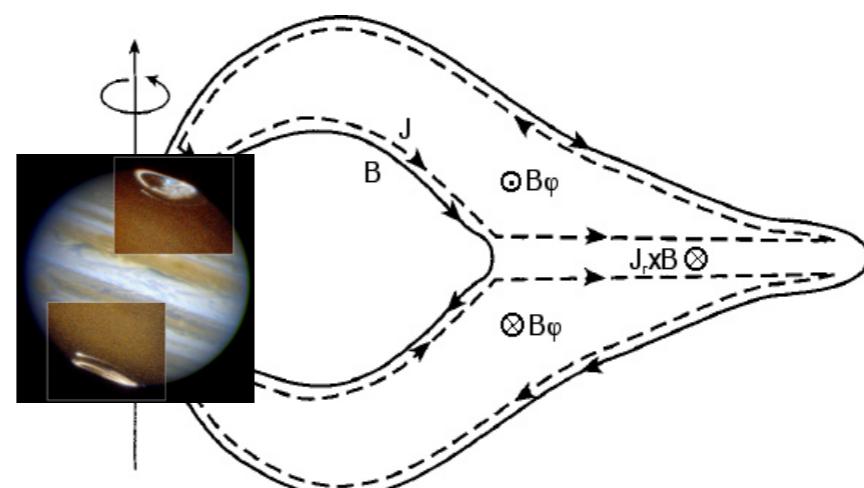
Aurores & émissions radio

liées à des courants alignés :

- lignes de champs ouvertes / fermées

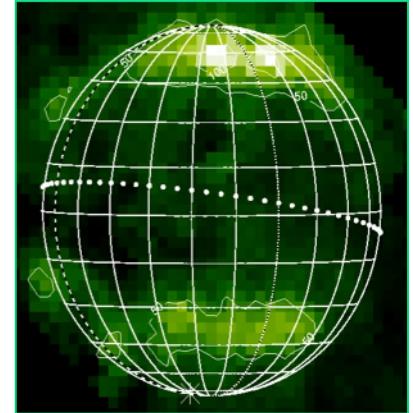
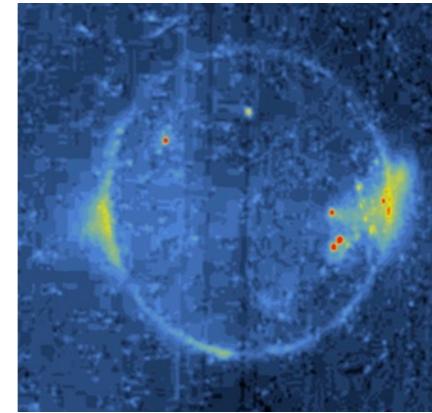


- sous-corotation ≥ 20 RJ @ Jupiter
⇒ ovale auroral principal



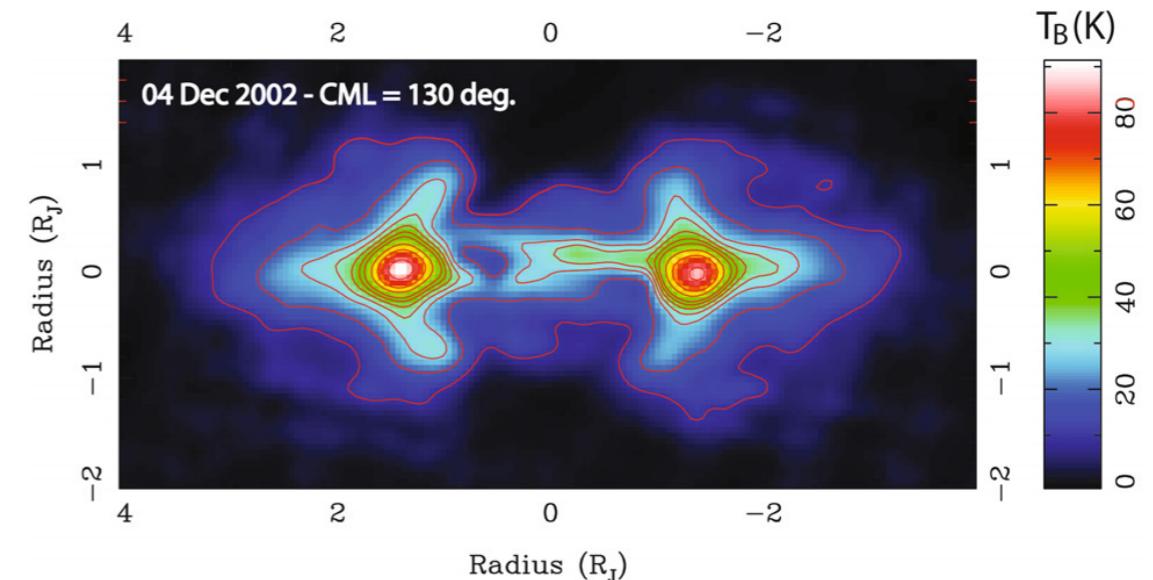
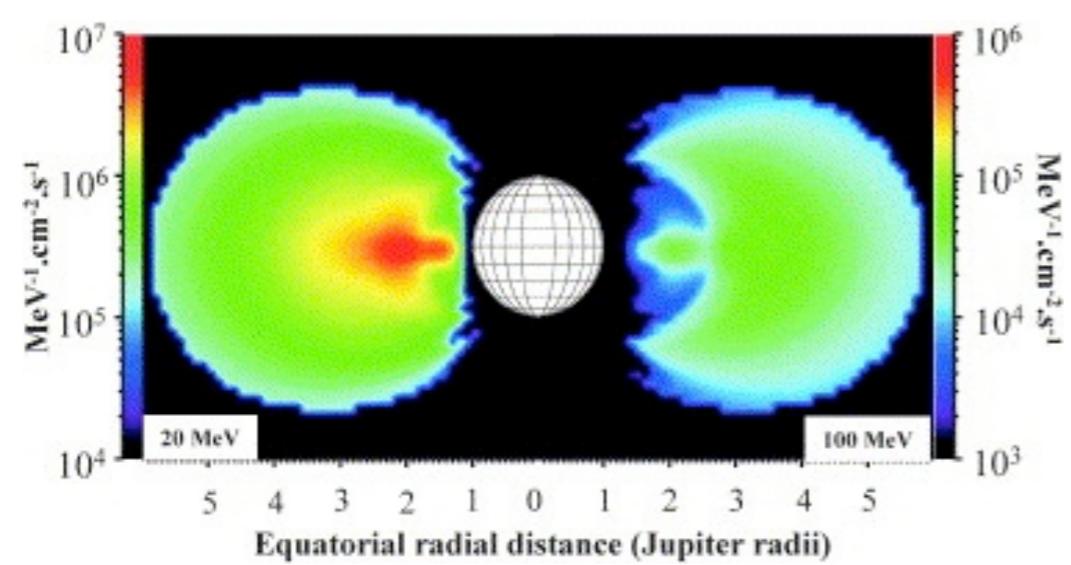
⇒ corrélation ou anticorrélation entre compressions MS & aurores ?

- induits par les satellites

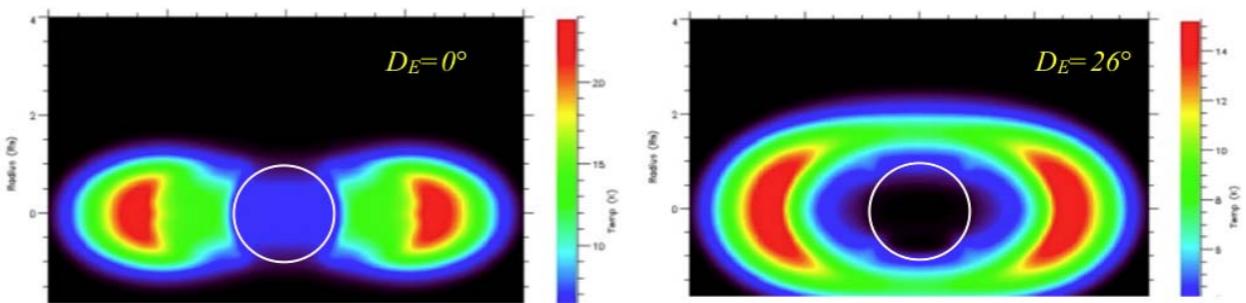


Particules énergétiques & Émission synchrotron

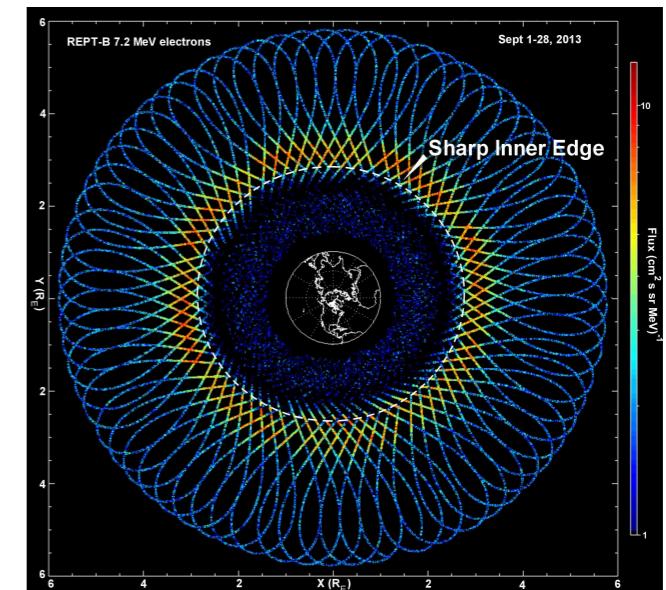
- Ceintures de «radiations» développées & rayonnement intense @ Jupiter



- Ceinture interne + externe (absorption par les anneaux) et peut-être flux synchrotron faible @Saturne (modélisation) \Rightarrow LOFAR ?



- Ceintures de Van Allen @ Terre mais synchrotron non détecté: background d'ondes de plasma
 \Rightarrow pertes très rapides dans les ceintures d'e- internes ?



- Pas de ceinture sur Mercure

Explorations passées & à venir

- passées
 - sol: radio (RDN,VLA etc.)
 - spatiales: Voyager 1 & 2, Ulysses, Galileo, Cassini, Wind, Cluster, Themis, Mariner 10, Messenger, MGS, Lunar prospector, New Horizons, HST + Stereo...
- à venir:
 - sol: LOFAR, NenuFAR, SKA
 - spatiales: BepiColombo, Juno / Juice ...

JUNO va construire un B de référence qui donnera un cadre précis pour réinterpréter toutes les observations passées (MAG, radio...)

U & N : MS "spéciales" ⇒ à réexplorer : Uranus pathfinder ? (à minima: Farside, HST)

et plus encore ...

- Dynamique MS externe \Rightarrow «upscalable» aux exoplanètes (Jupiters chauds) (Zarka, Grießmeier & al.)
- Dynamique interne \Rightarrow plus difficile mais possible (Nichols)
- MS d'* (héliosphère), de pulsars, de galaxies ...