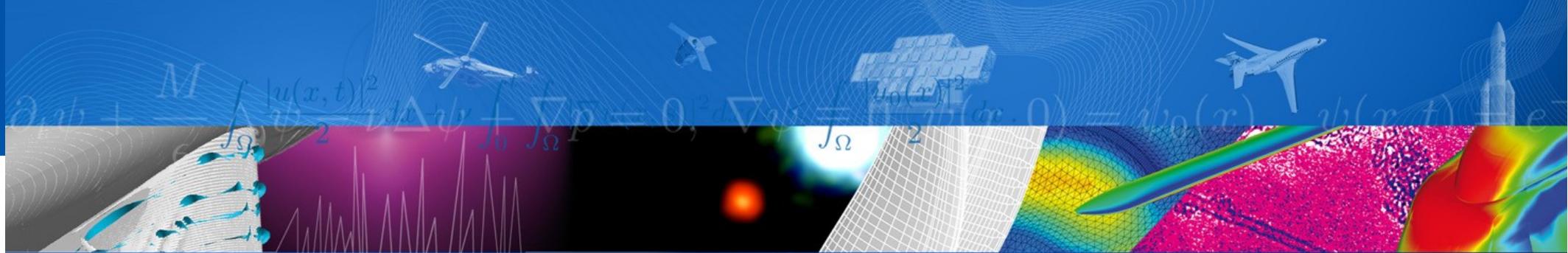


# ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation

[www.onera.fr](http://www.onera.fr)

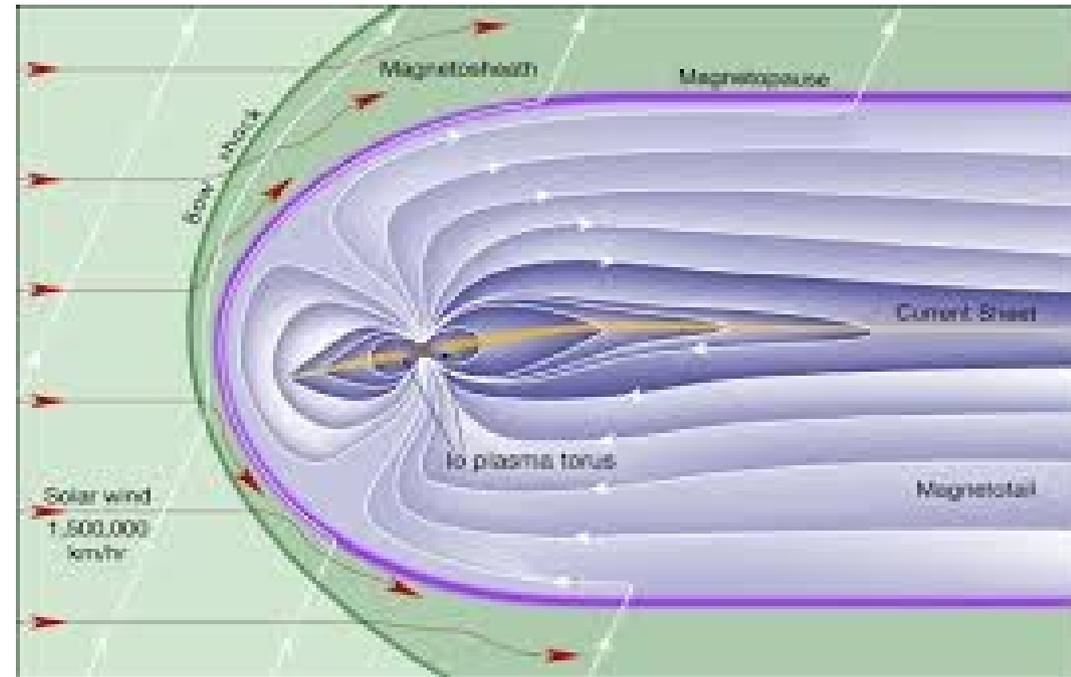
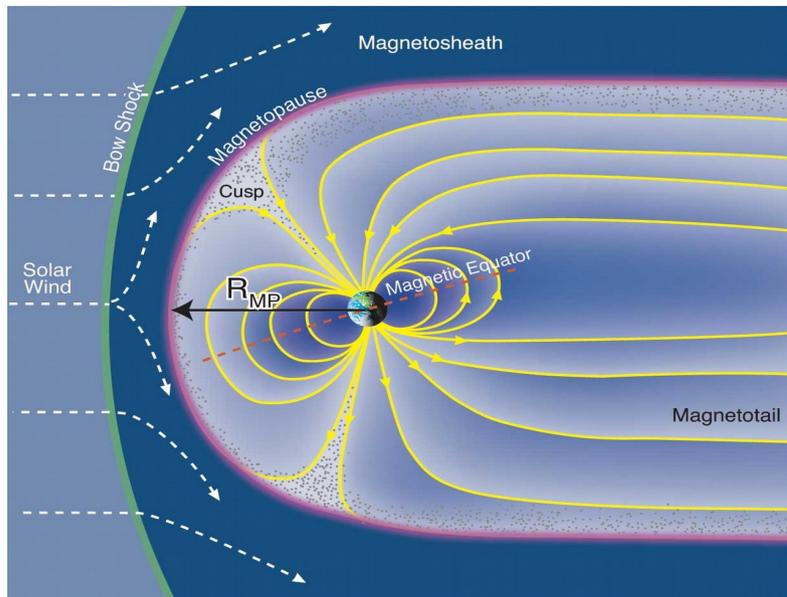


# La magnétosphère de Jupiter avant JUNO

S. Hess



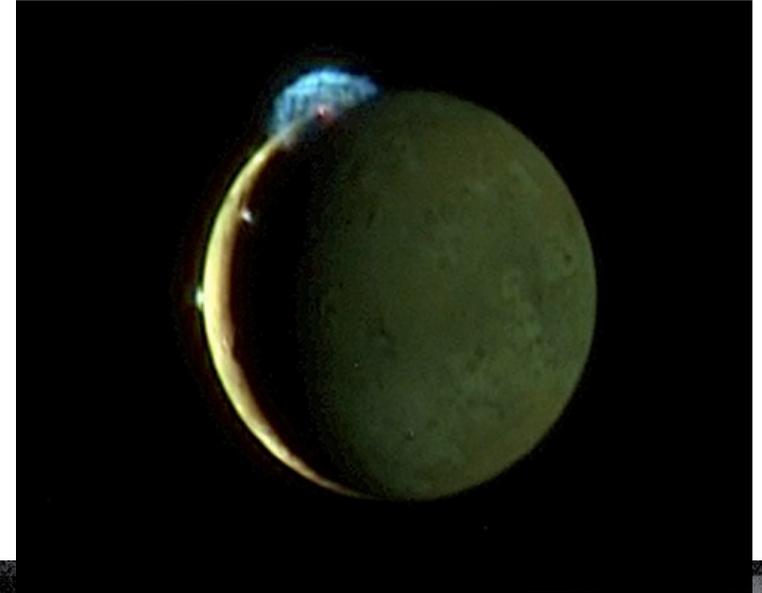
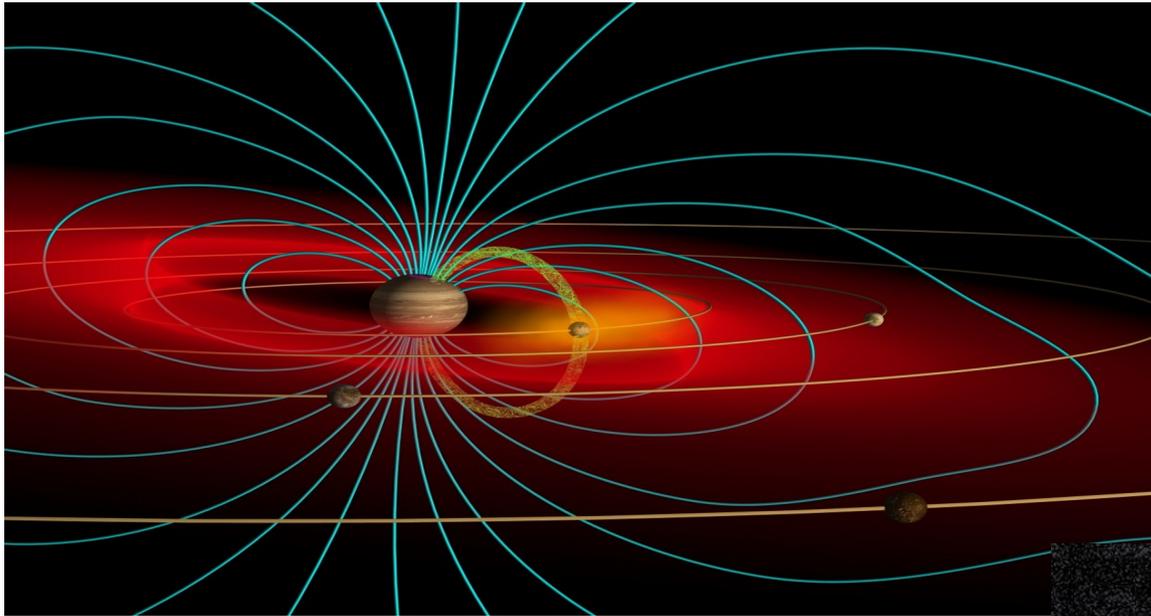
retour sur innovation



Le moment dipolaire de Jupiter est 18 000 fois celui de la Terre.

La magnétosphère Terrestre est plus petite que Jupiter

La dynamique de la magnétosphère Jovienne est **TOTALEMENT** différente de celle de la Terre

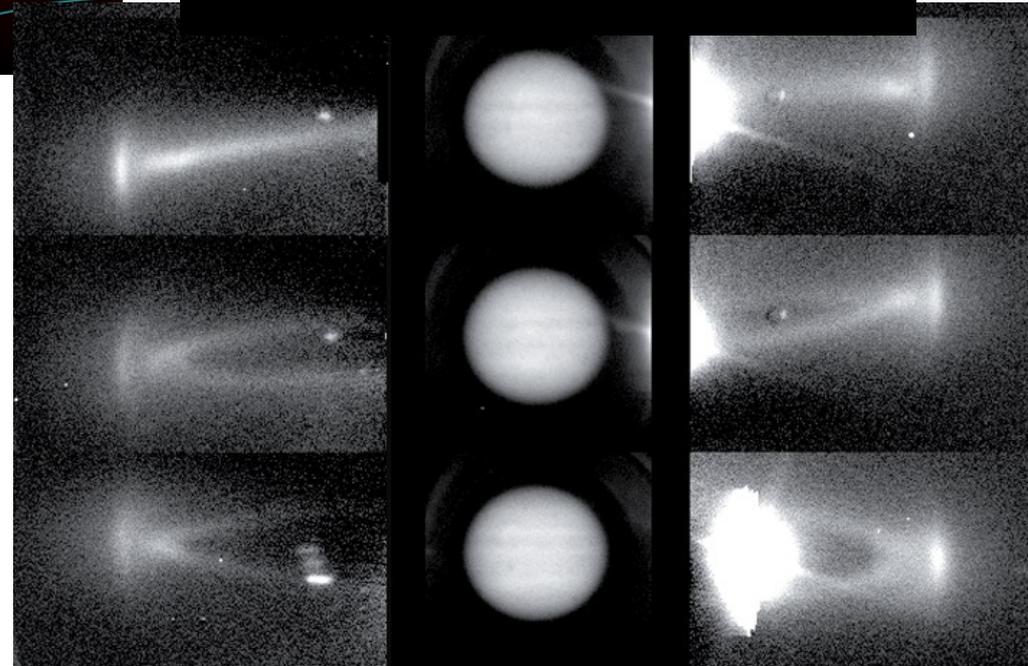


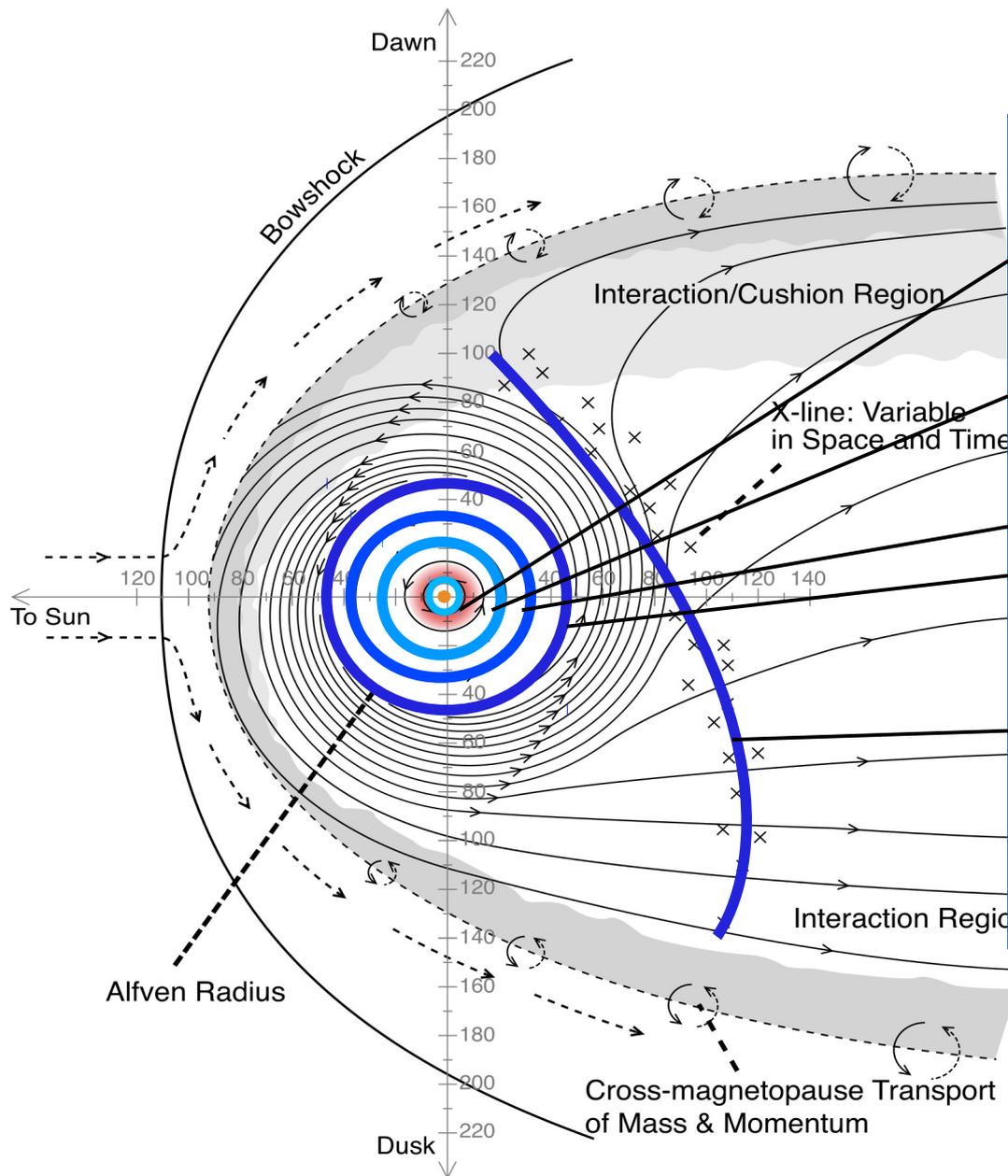
Trois grandes différences avec la Terre

Rotateur rapide

Source de Plasma interne

Taille de la magnétosphère





**I) Les ceintures de radiation**

- Orbite de Io

**II) La magnétosphère interne**

- Orbites de Ganymède/Callisto

**III) La magnétosphère moyenne**

- Rupture de corotation

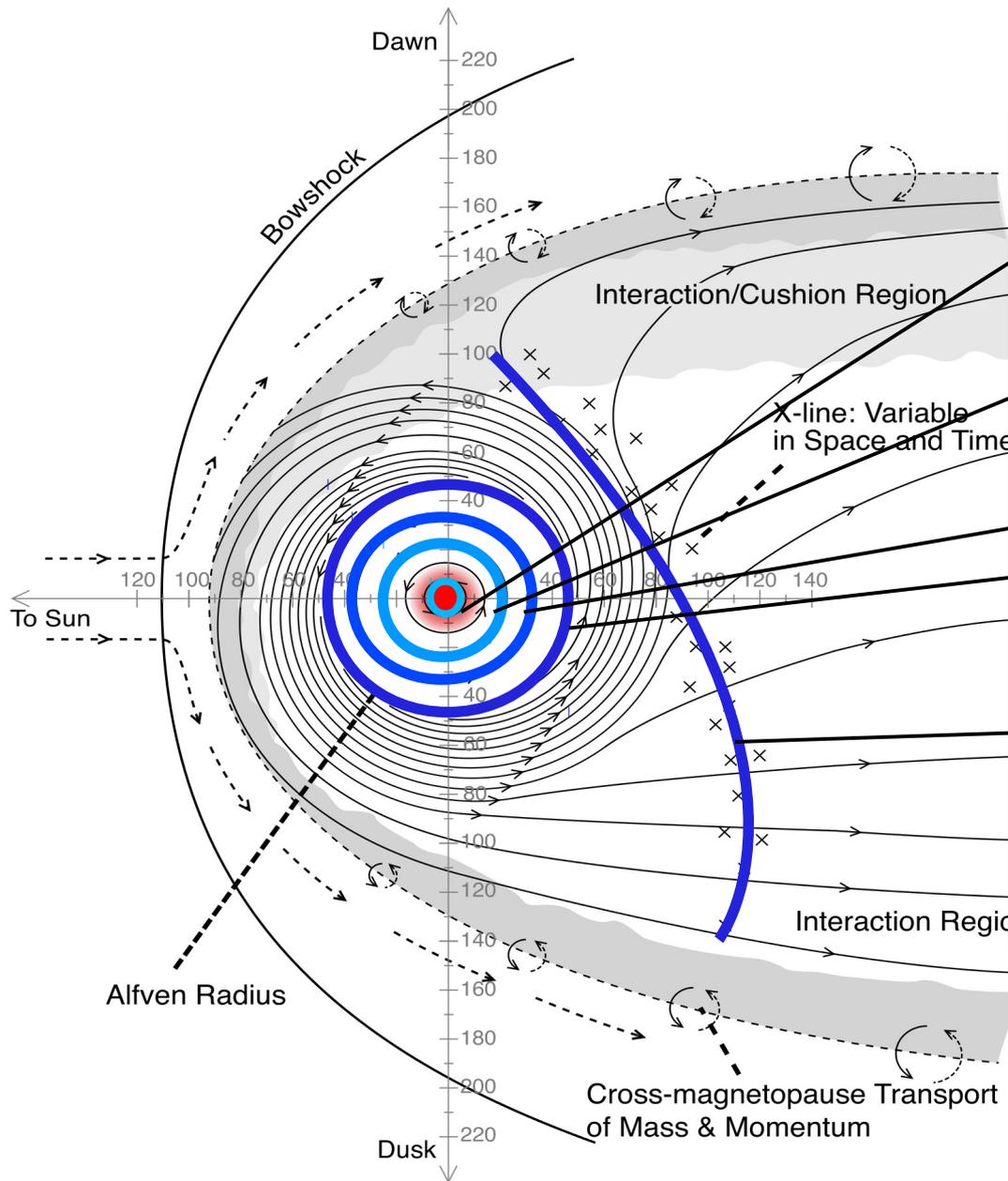
- Rayon d'Alfvén

**IV) La magnétosphère externe fermée**

- Vasylunas X-Line

**V) Les bords de la magnétosphère**

et la queue



**I) Les ceintures de radiation**

- Orbite de Io

**II) La magnétosphère interne**

- Orbites de Ganymède/Callisto

**III) La magnétosphère moyenne**

- Rupture de corotation

- Rayon d'Alfvén

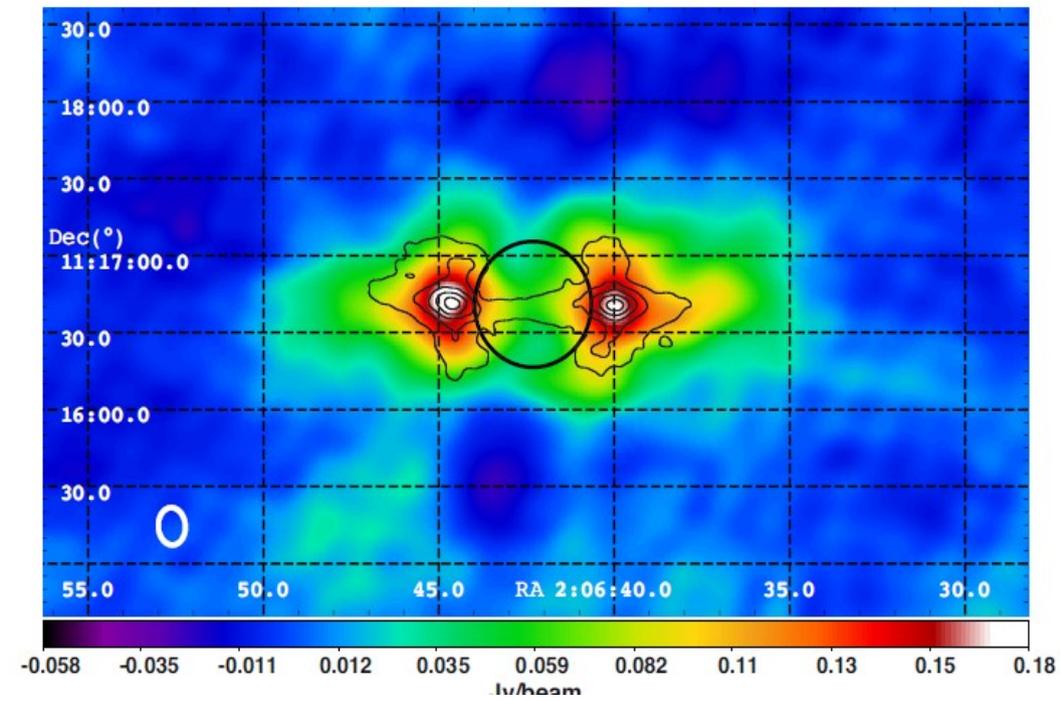
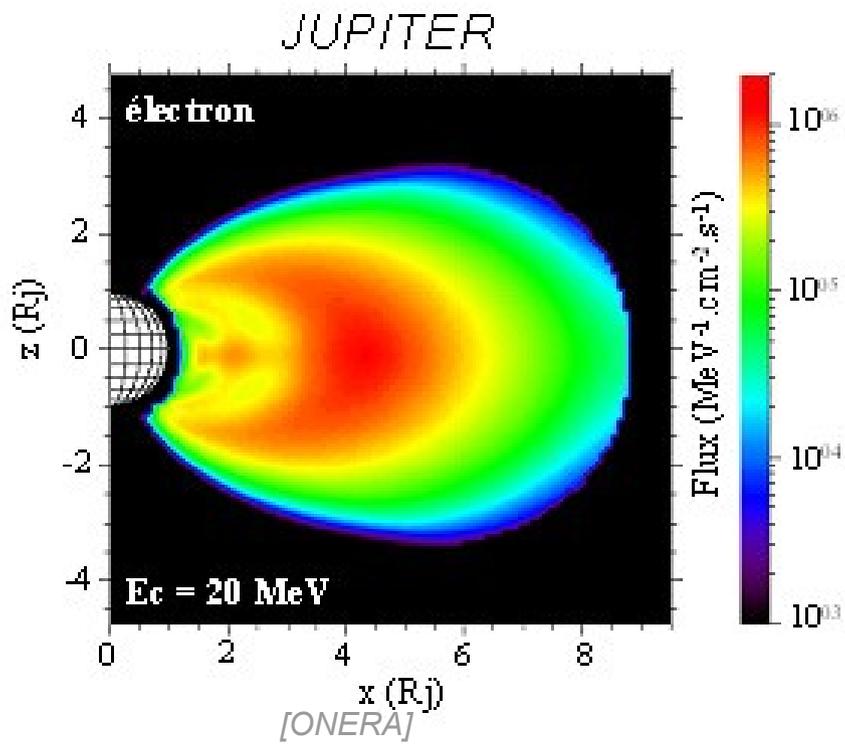
**IV) La magnétosphère externe fermée**

- Vasylunas X-Line

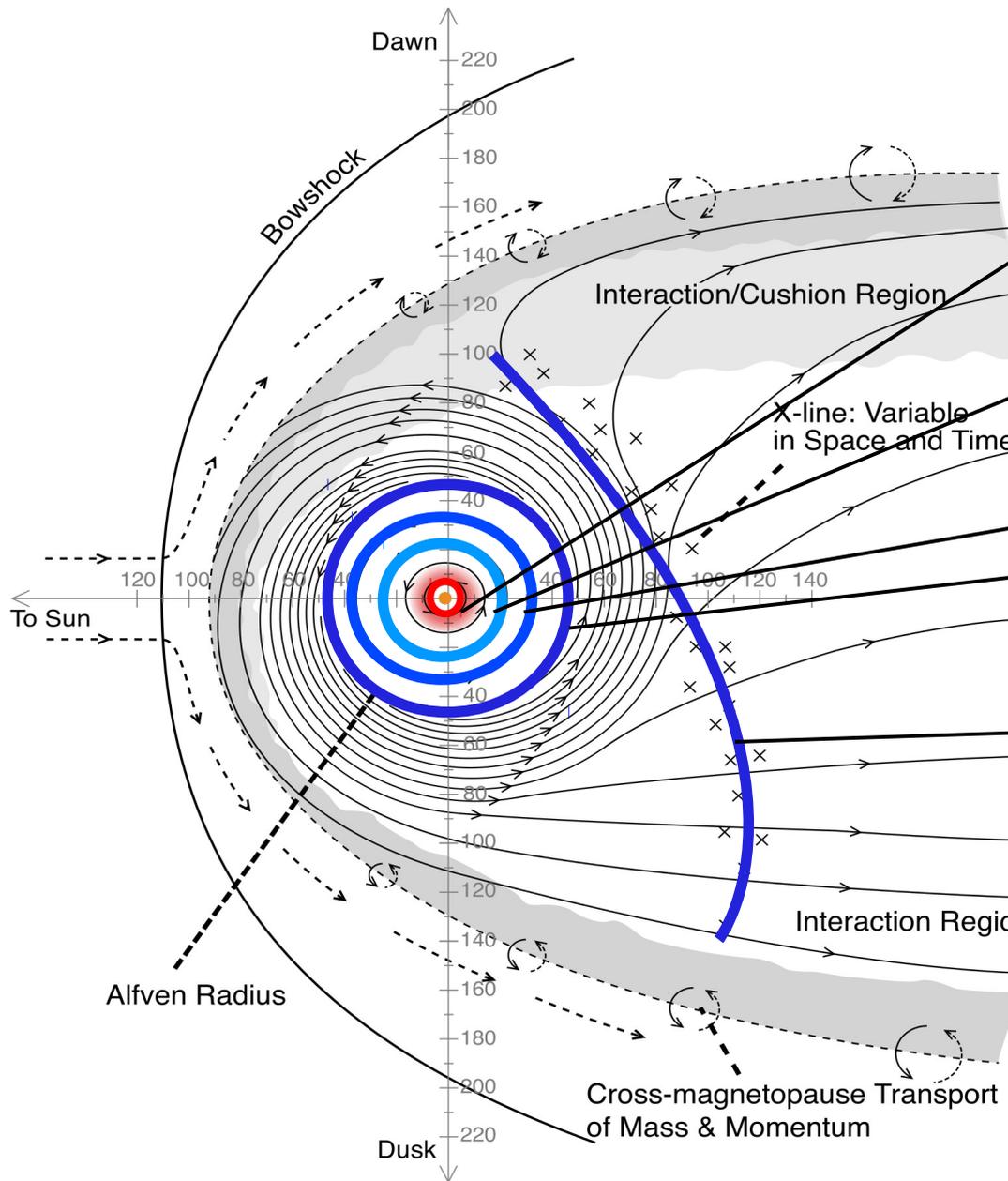
**V) Les bords de la magnétosphère**

et la queue

Particules piégées dans le champ B  
Hautes énergies (>MeV)  
Rayonnement synchrotron



[Girard,Zarka,Tasse,Hess; 2012]



**I) Les ceintures de radiation**

**- Orbite de Io**

**II) La magnétosphère interne**

**- Orbits de Ganymède/Callisto**

**III) La magnétosphère moyenne**

**- Rupture de corotation**

**- Rayon d'Alfvén**

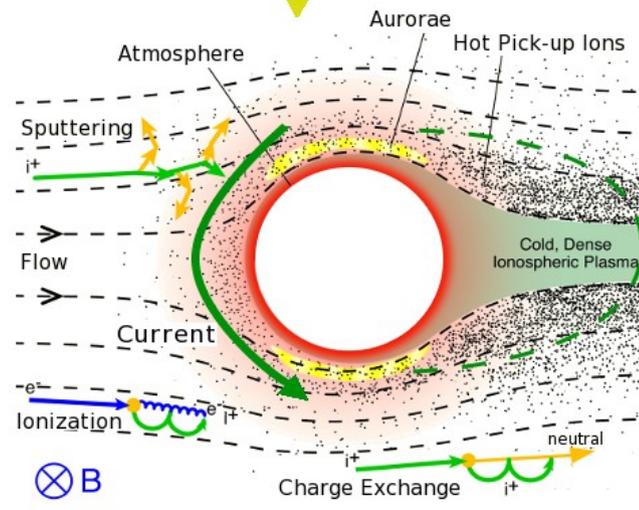
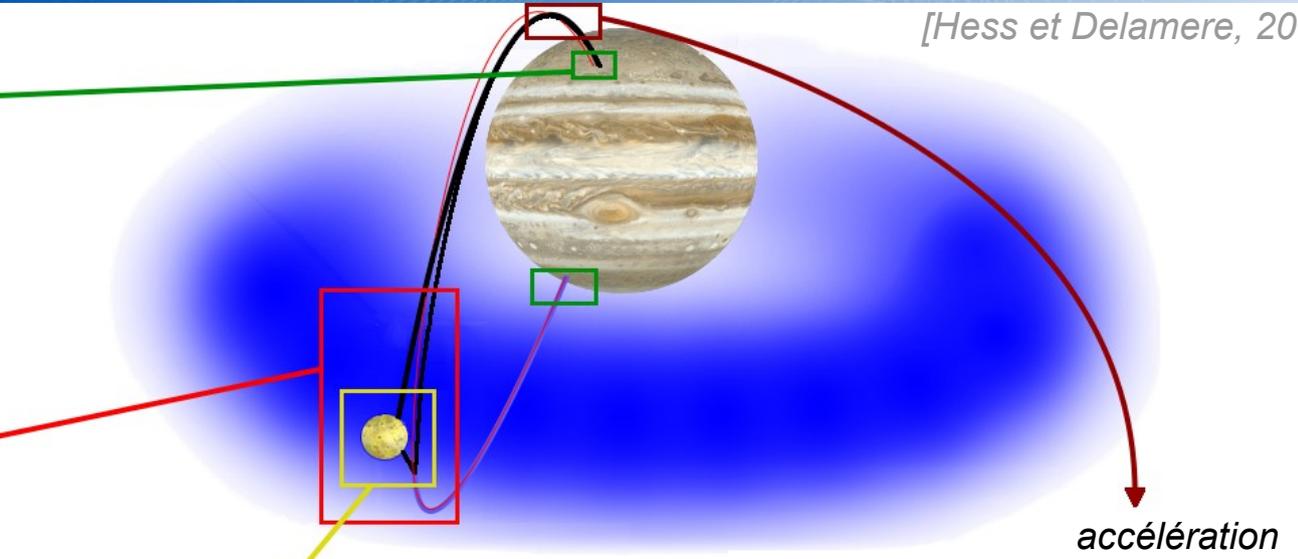
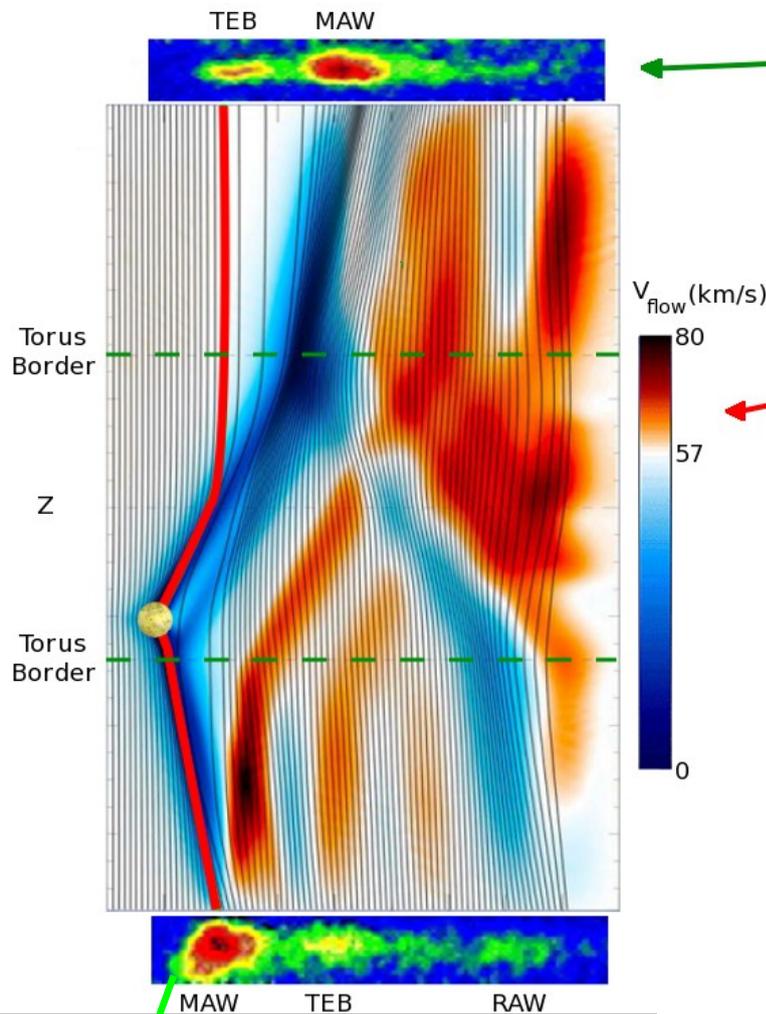
**IV) La magnétosphère externe fermée**

**- Vasyliunas X-Line**

**V) Les bords de la magnétosphère**

**et la queue**

[Hess et Delamere, 2012]

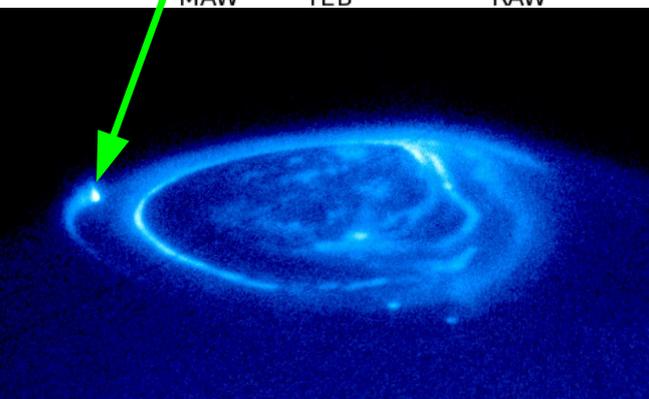


Io se déplace à 57km/s par rapport au plasma magnétosphérique:

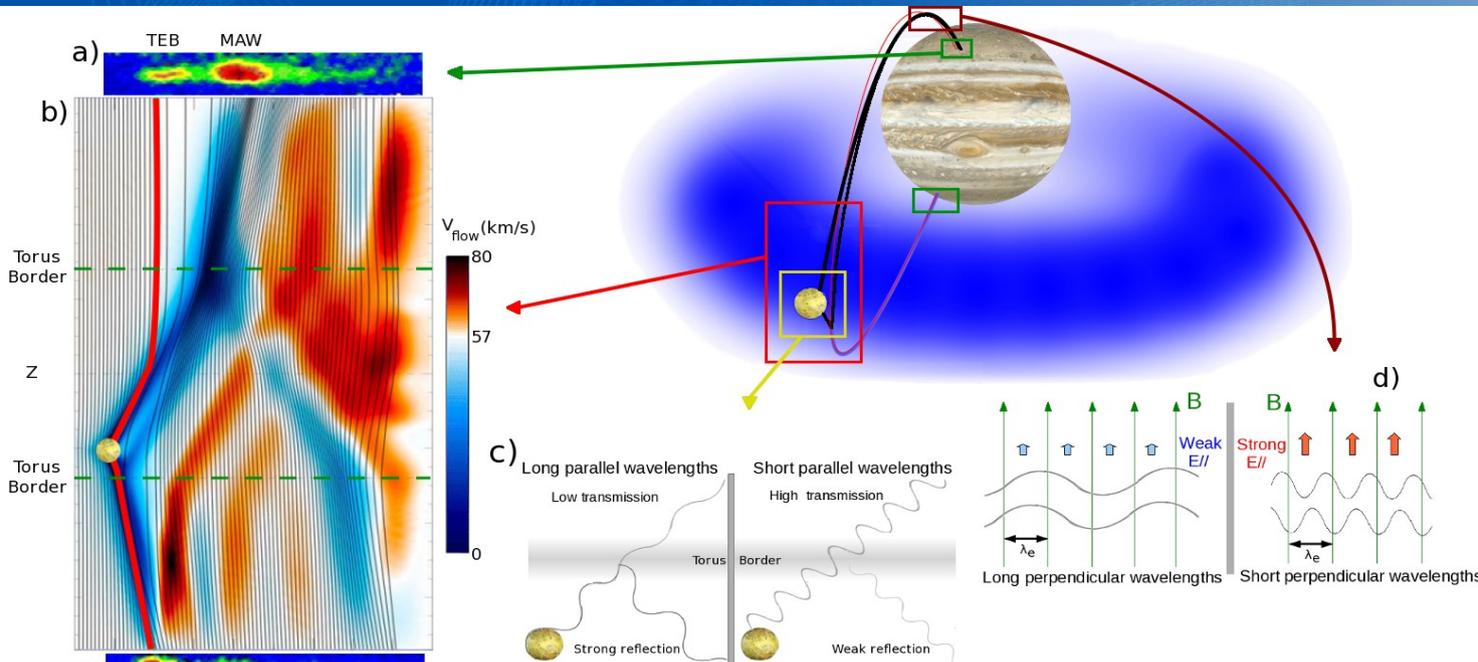
$$E = -v \times B = \sigma J$$

Création d'un courant:  
 Déformation des lignes de B  
 Ondes d'Alfvén  
 Accélération d'e<sup>-</sup>  
 Aurores

Courant porté par des ondes:  
 Interférence  
 Dépendance sur λ  
 Accélération bi-directionnelle



[Clarke et al., 2002]



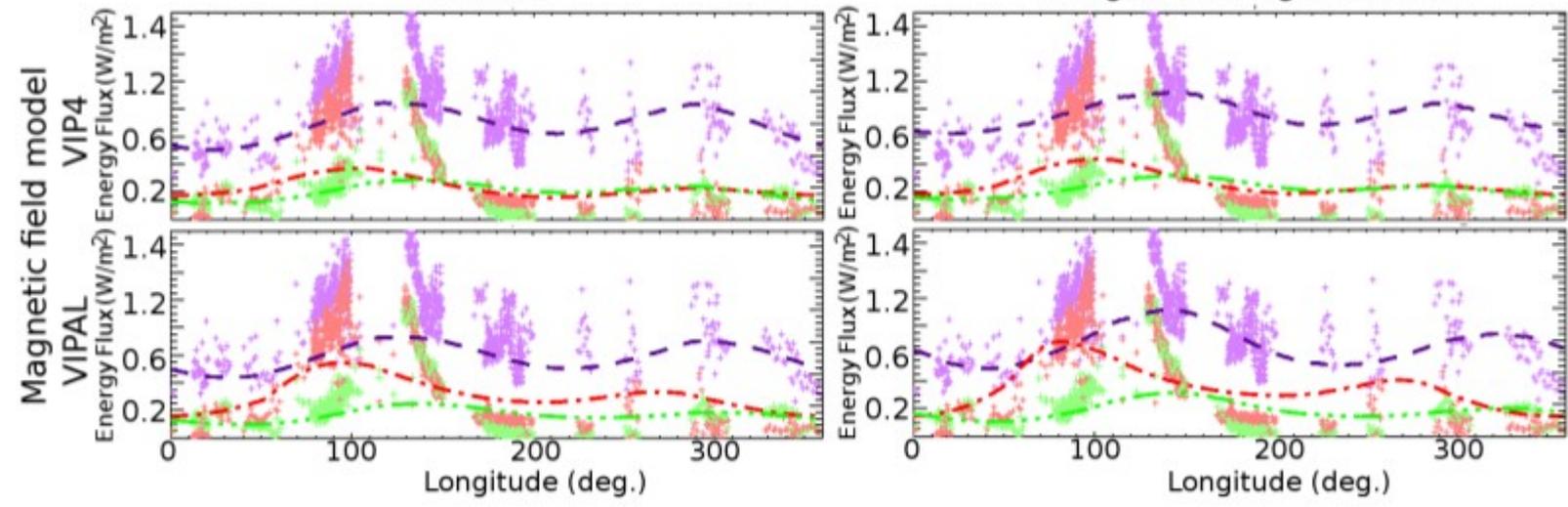
Modèle de propagation et d'accélération des e-

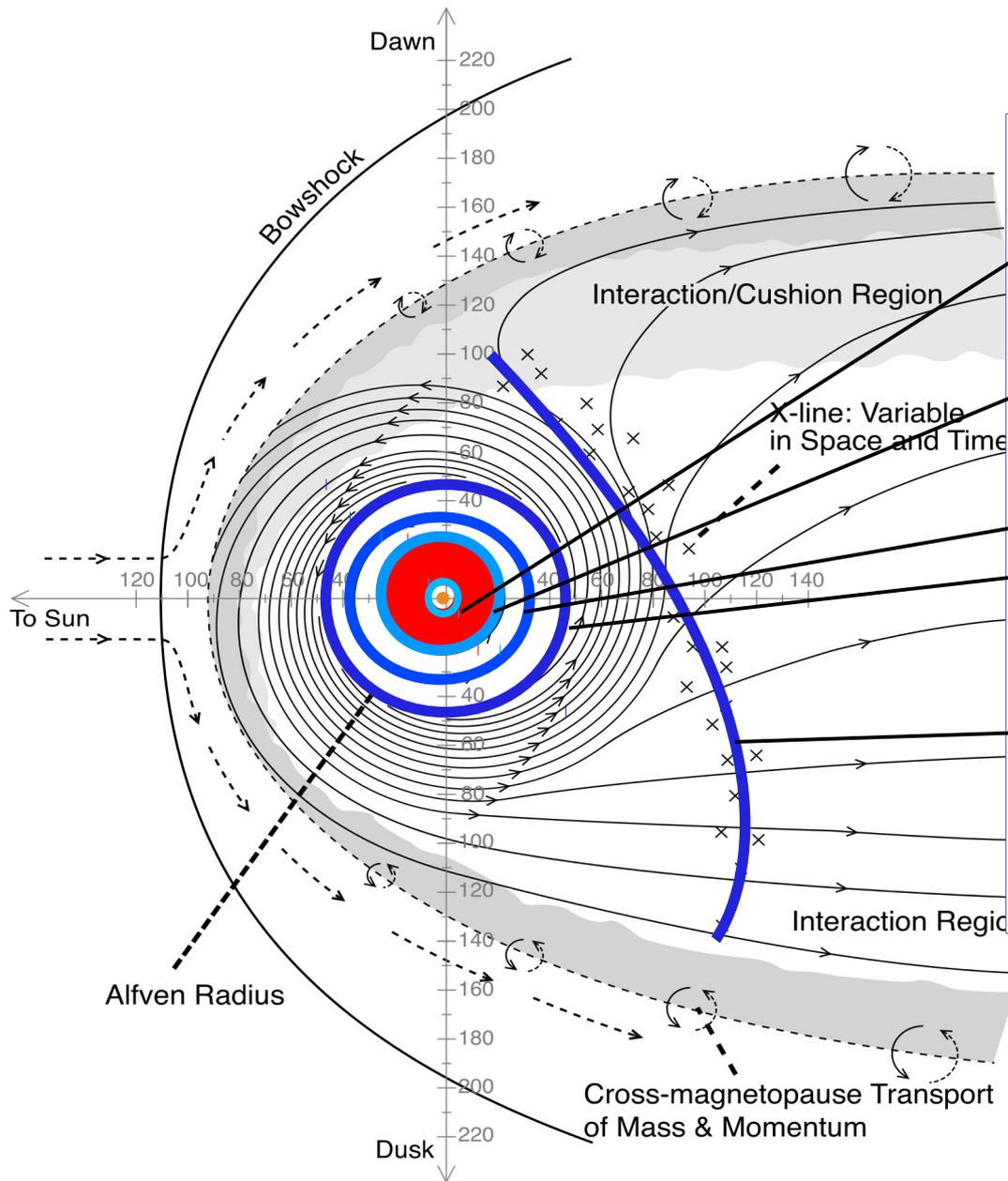
Explique une partie des observations de la brillance des aurores dues aux satellites à Jupiter et Saturne

Alfvén wing cross-section:

Circular

Elongated along Io's orbit





**I) Les ceintures de radiation**

- Orbite de Io

**II) La magnétosphère interne**

- Orbits de Ganymède/Callisto

**III) La magnétosphère moyenne**

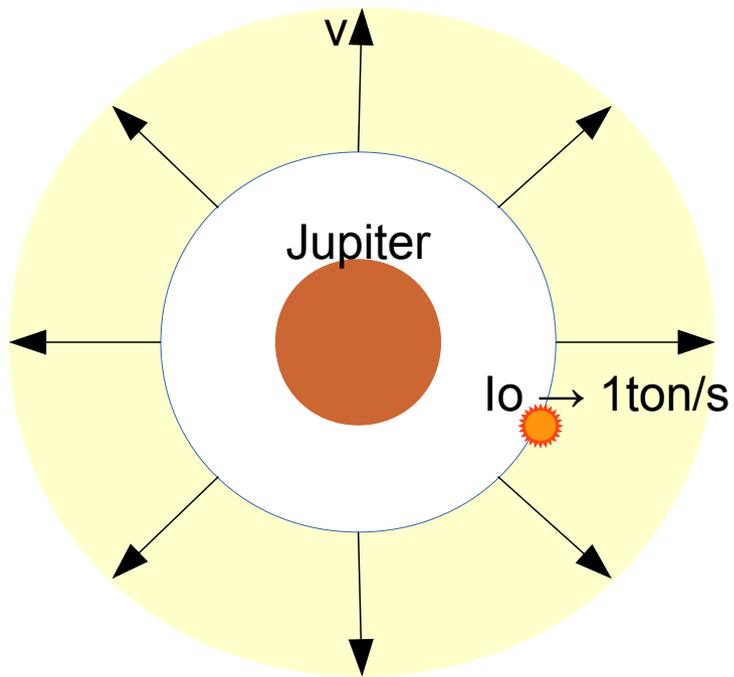
- Rupture de corotation

- Rayon d'Alfvén

**IV) La magnétosphère externe fermée**

- Vasyliunas X-Line

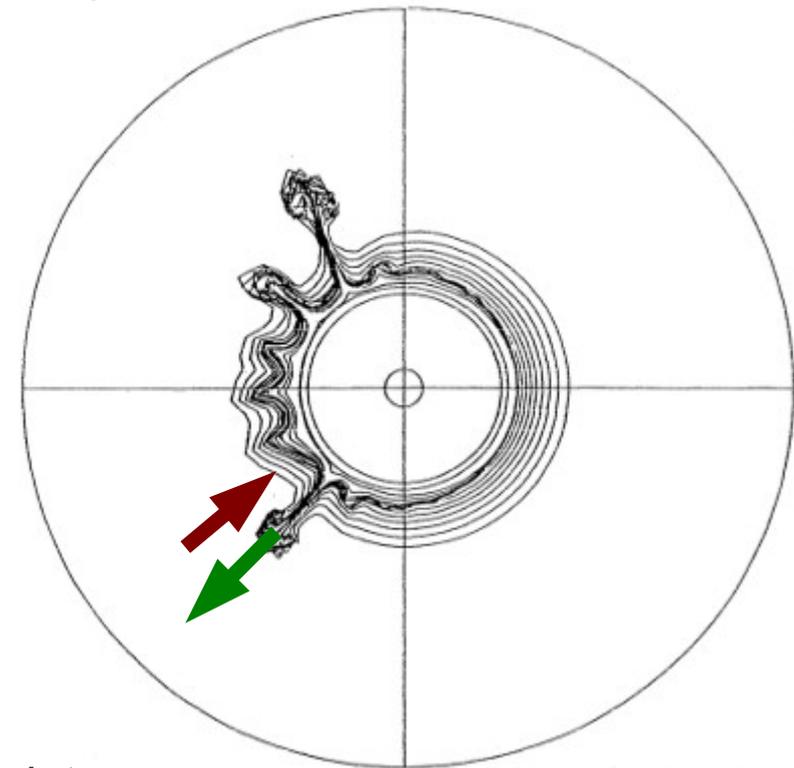
**V) Les bords de la magnétosphère et la queue**



Io injecte ~1 tonne/sec. de matière dans la magnétosphère

Cette matière doit être évacuée → transport radial centrifuge

Cette image a un défaut: il faut remplacer les tubes de flux  
→ transport radial centripète?

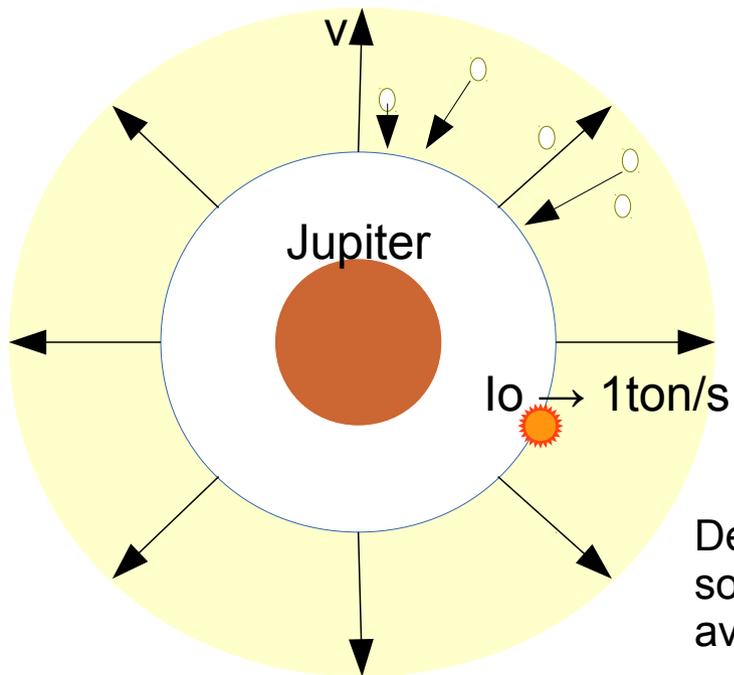


[Yang et al., 1994]

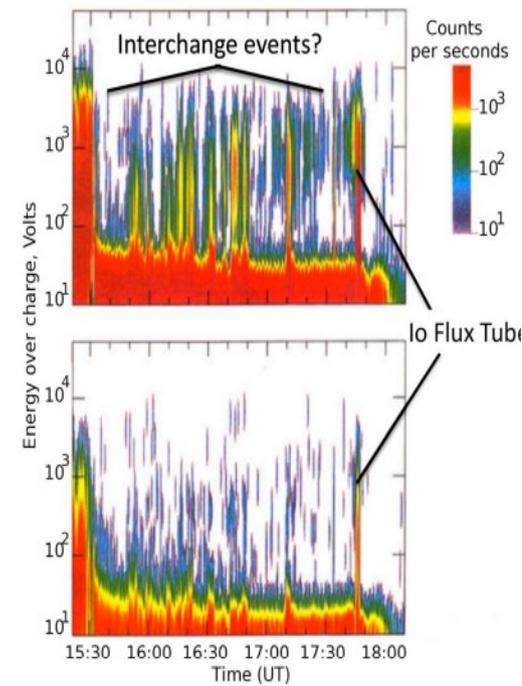
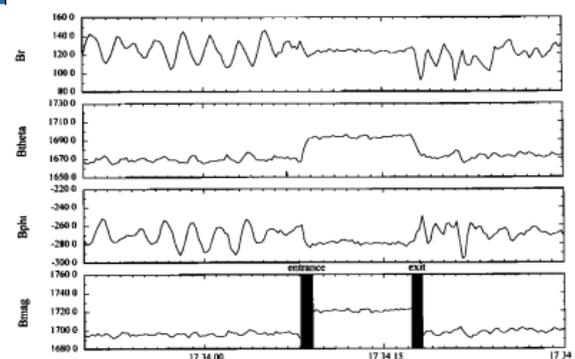


Modèles type Rayleigh-Taylor

Structures à grande échelle  
pas observées dans la magnétosphère interne



Des tubes de flux vides et localisés (<1000km) sont observés dans la magnétosphère interne avec des vitesses ~ 100km/s



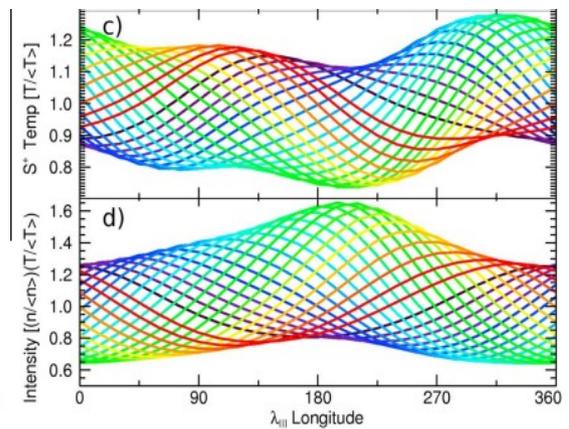
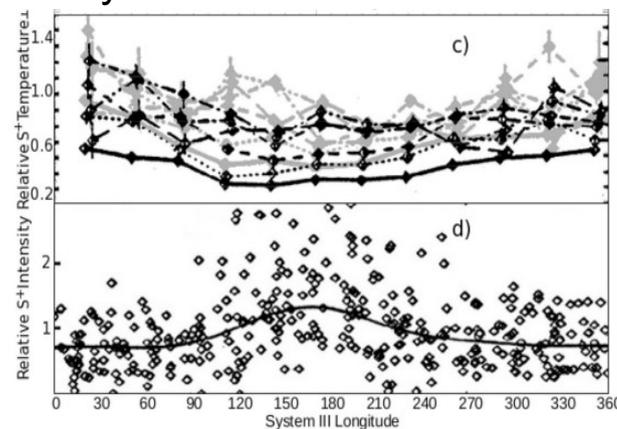
Interaction équivalente Io  $\Rightarrow$  modulation densité/température  
 $\Rightarrow$  origine System IV?

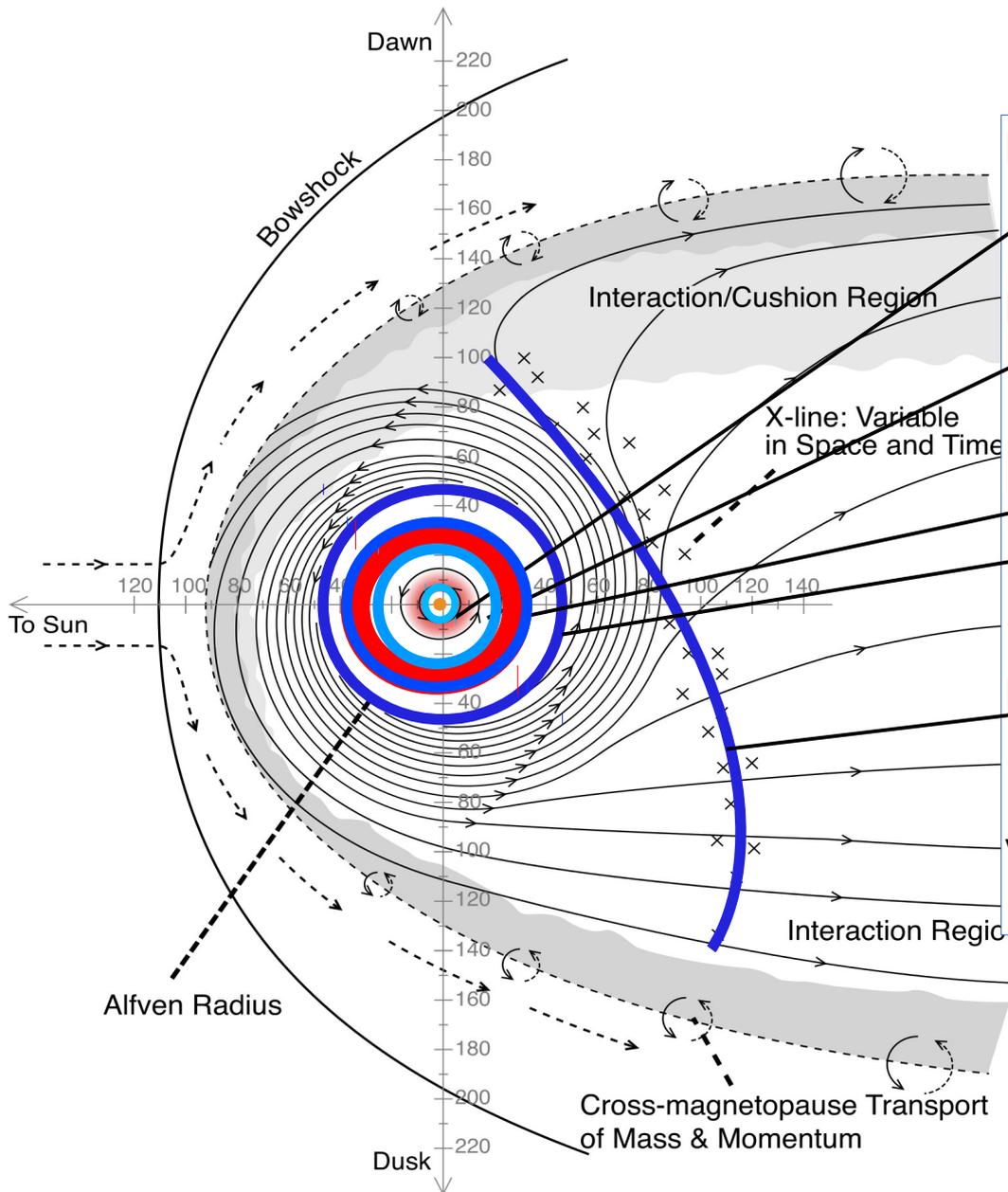


Pas bien



Bien!  
 (mais avec modération)



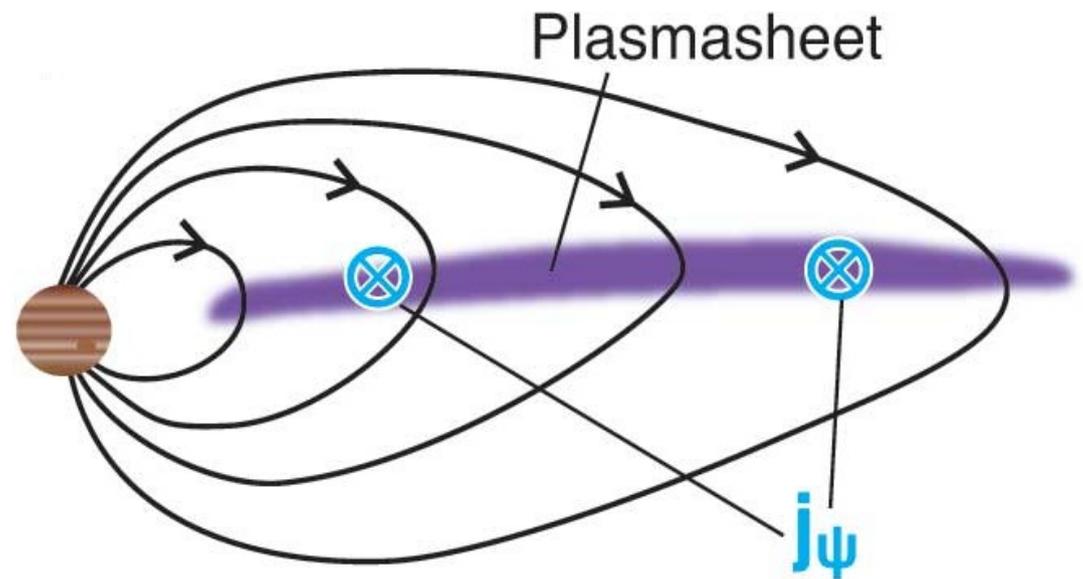
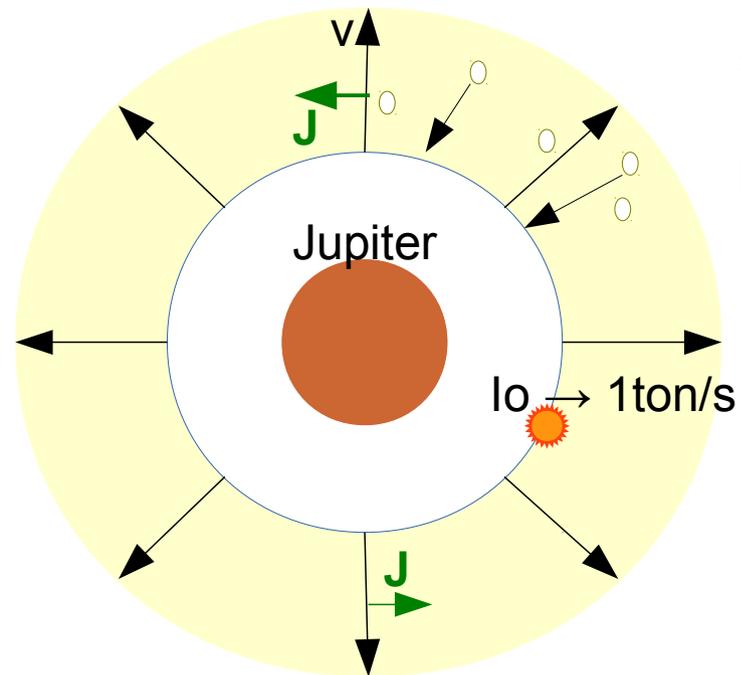


- I) Les ceintures de radiation
  - Orbite de Io
- II) La magnétosphère interne
  - Orbits de Ganymède/Callisto
- III) La magnétosphère moyenne**
  - Rupture de corotation
  - Rayon d'Alfvén
- IV) La magnétosphère externe fermée
  - Vasylunas X-Line
- V) Les bords de la magnétosphère et la queue

Io injecte ~1 tonne/sec. de matière dans la magnétosphère

Cette matière doit être évacuée → transport radial centrifuge

Mouvement / B ⇒ courant azimuthal ⇒ Magnétosphère allongée



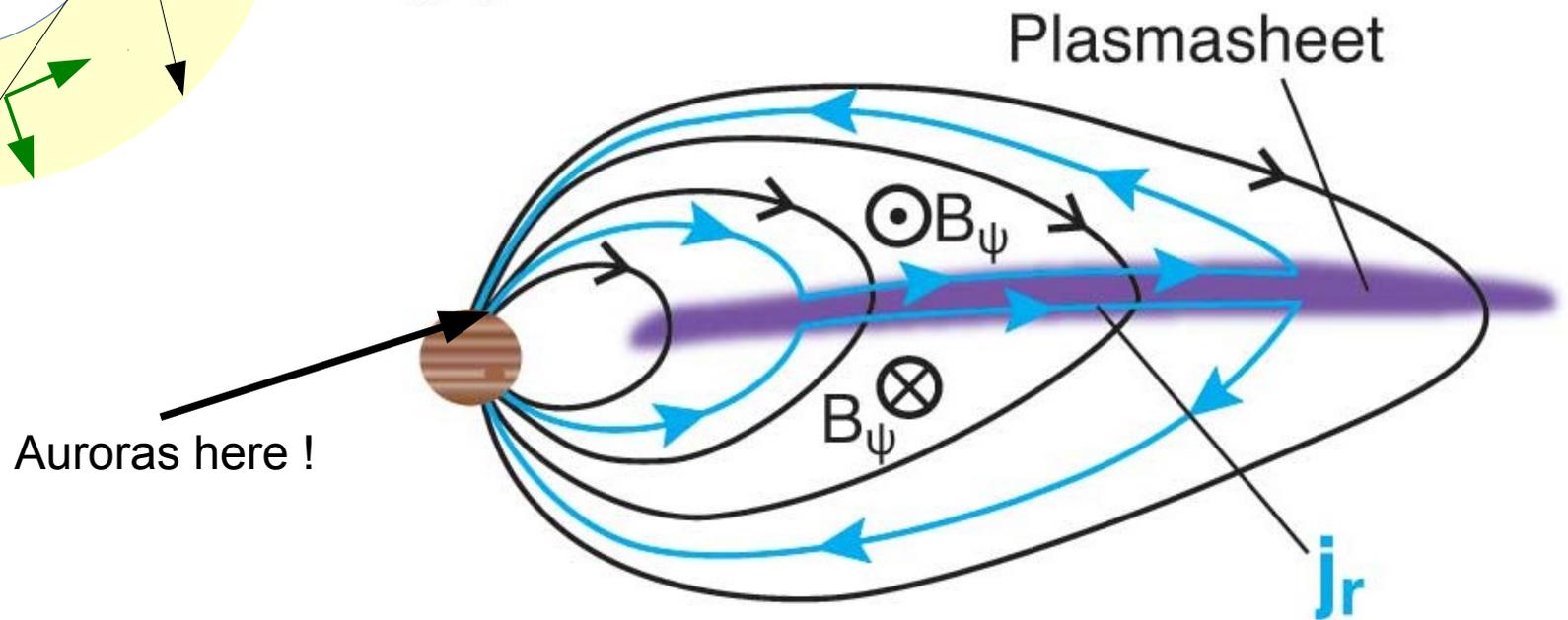
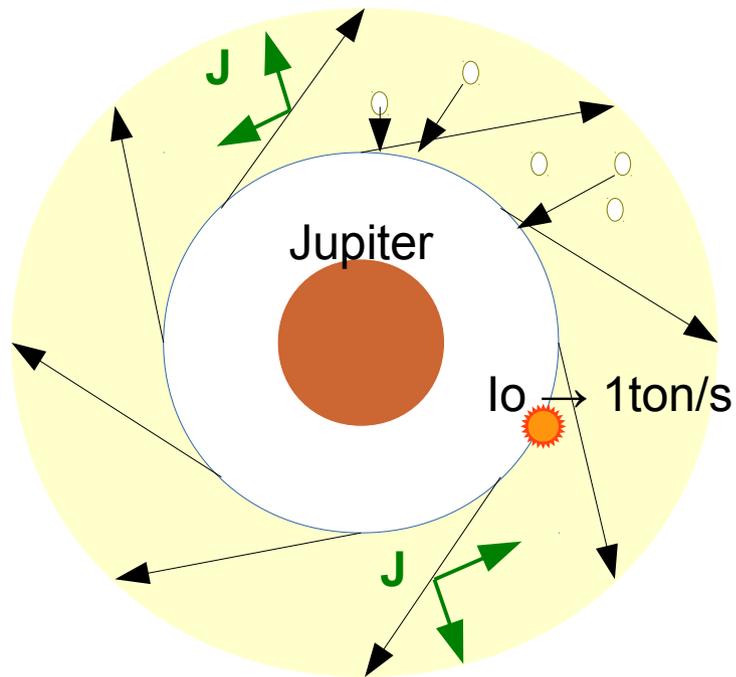
Io injecte ~1 tonne/sec. de matière dans la magnétosphère

Cette matière doit être évacuée → transport radial centrifuge

Mouvement / B ⇒ courant azimuthal ⇒ Magnétosphère allongée

Conservation du moment angulaire → sous-corotation

⇒ courant radial ⇒ doit se refermer dans l'ionosphère



Le courant provient des particules en mouvement le long des lignes de champ magnétique.

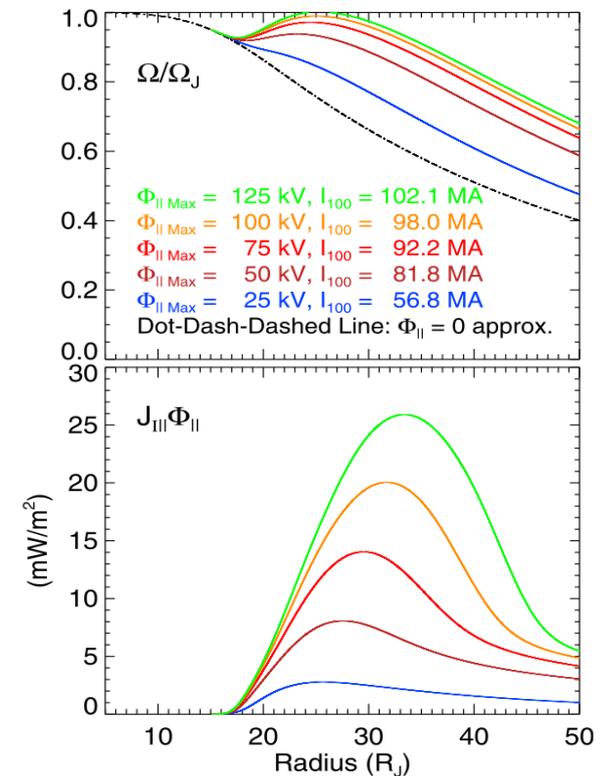
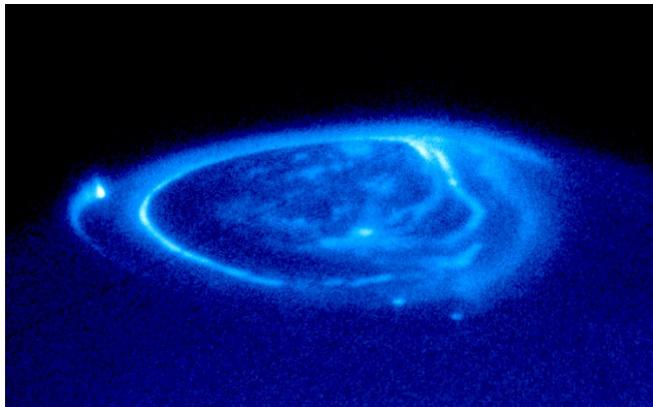
Effet de miroir magnétique: seules les particules avec  $\frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} > \tan \alpha_{\text{lim}}$  portent le courant jusqu'à l'ionosphère

Augmentation du courant = accélération des particules = plus de particules dans le "cône de perte"  
(Relation de Knight)

Il y a un courant limite qui dépend du flux de particules atteignant la région d'accélération [Ray et Ergun, 2010]

La distance pour laquelle on atteint ce courant limite  
= rayon de rupture de corotation  
(en vérité, la corotation stricte est perdue depuis longtemps)

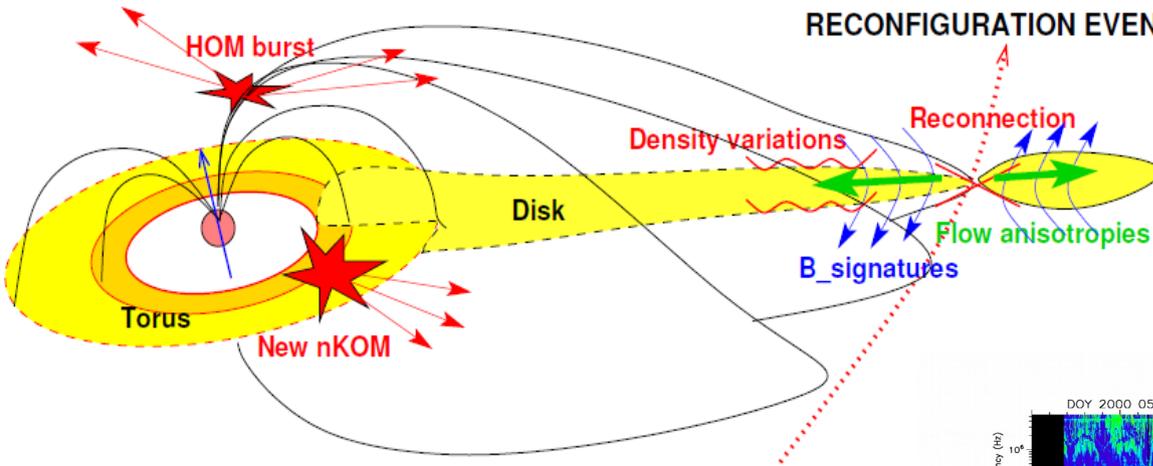
⇒ Oval auroral principal de Jupiter



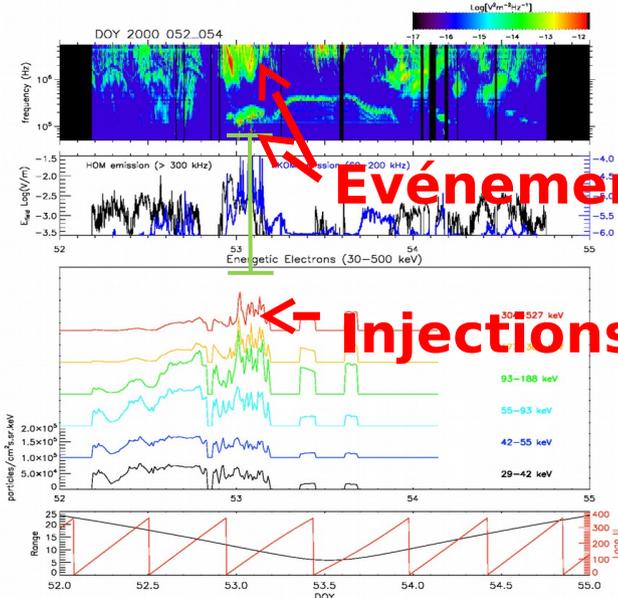
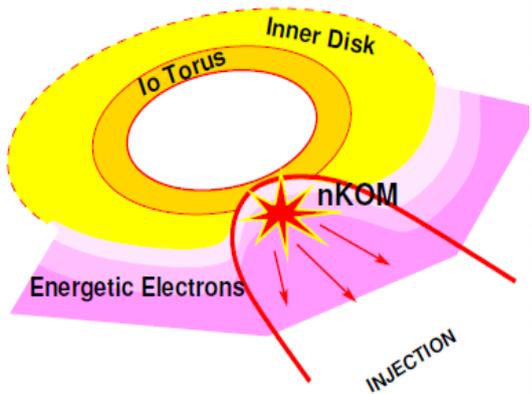
**ENERGETIC EVENT**

**RECONFIGURATION EVENT**

Contrairement à la partie la plus interne du disque ( $< 15 R_J$ ), la partie plus extérieure ( $15-50 R_J$ ) est influencée par la dynamique de la magnétosphère externe et peut présenter des perturbations (sous densités) de grande échelle.



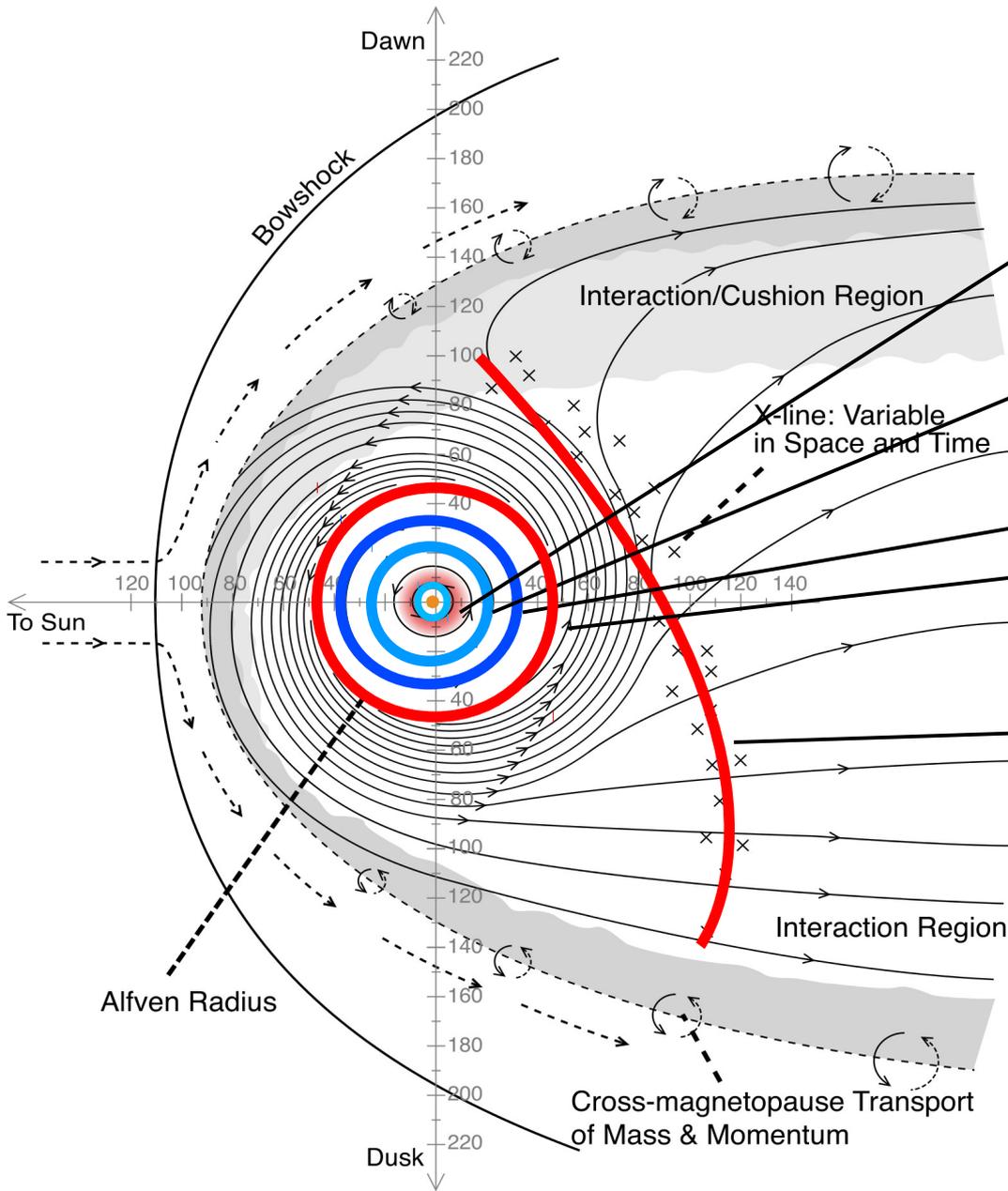
**ENERGETIC EVENT and INJECTIONS**



**Evénement radio**

**Injections**

[Louarn, 2014]



**I) Les ceintures de radiation**

- Orbite de Io

**II) La magnétosphère interne**

- Orbits de Ganymède/Callisto

**III) La magnétosphère moyenne**

- Rupture de corotation

- Rayon d'Alfvén

**IV) La magnétosphère externe fermée**

- Vasyliunas X-Line

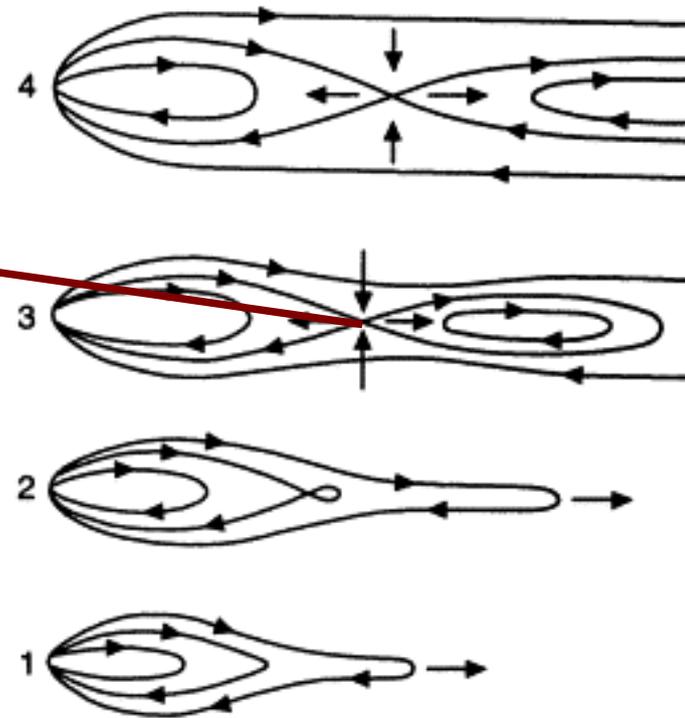
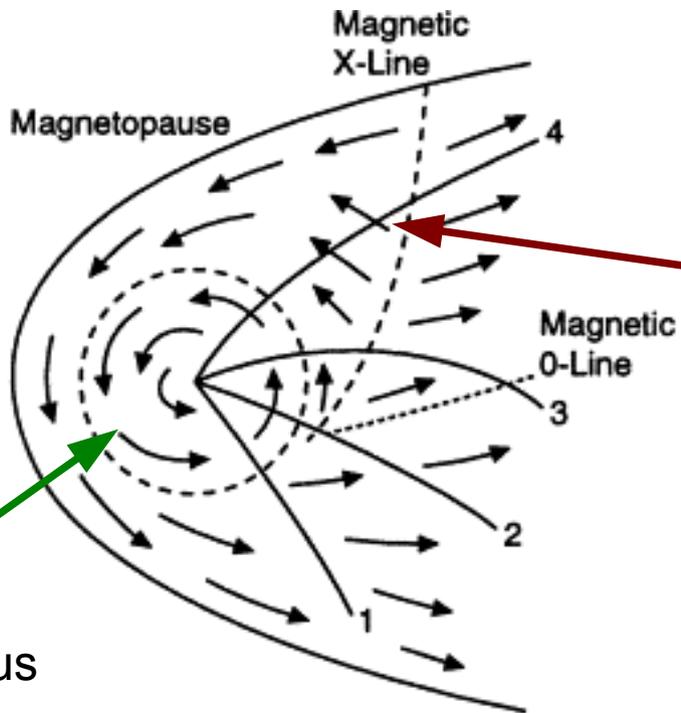
**V) Les bords de la magnétosphère et la queue**

# Interaction aux grandes échelles: le cycle de Vasyliunas

Combinaison de la déformation générale de la magnétosphère par le vent solaire et de la force centrifuge



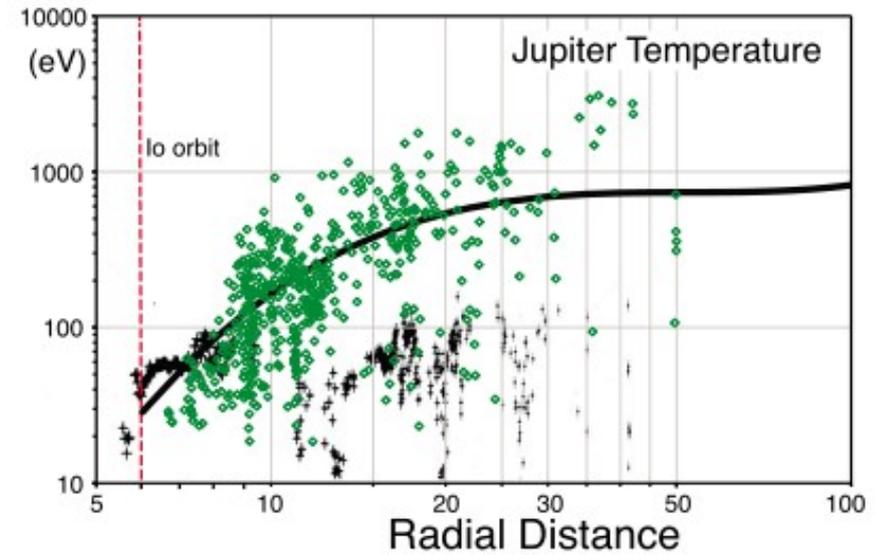
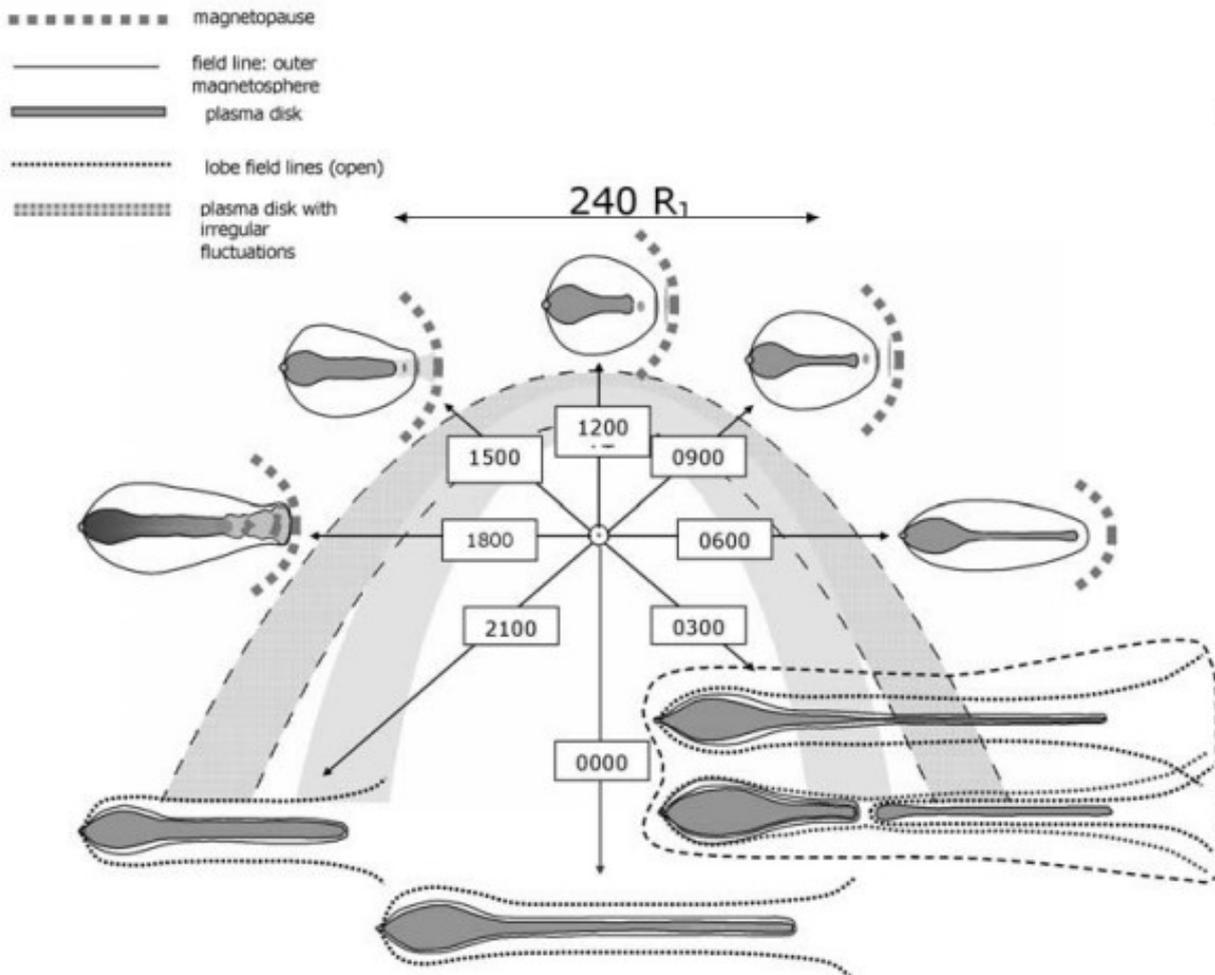
where previous slides apply



[Vasyliunas, 1973]

Note : No direct interaction with the solar wind in this model

La température du plasma magnétosphérique augmente vers l'extérieur: opposé à l'effet adiabatique ?!

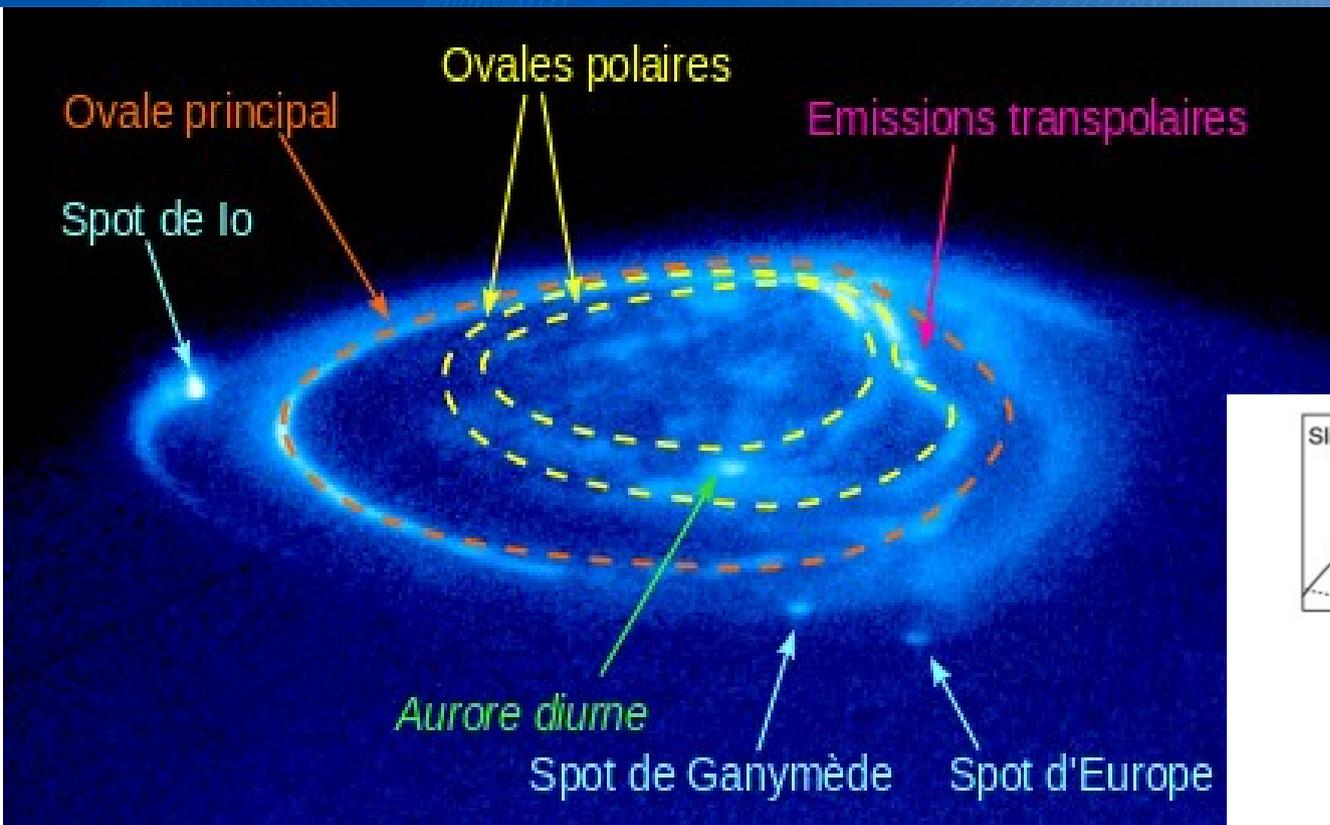


[Bagenal et Delamere, 2011]

Cycle de compression/décompression dû à la forme de la magnétosphère et au cycle de Vasyliunas

[Kivelson et Southwood, 2005]

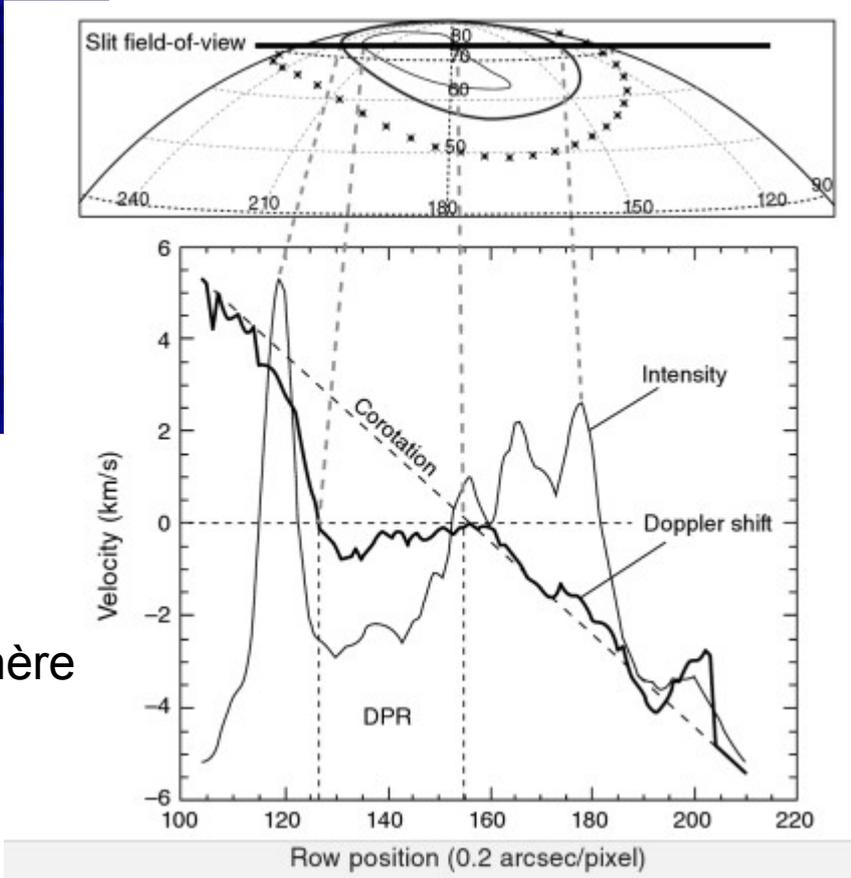
Note : No direct interaction with the solar wind in this model



L'enigme de la “dark polar region”, seule partie de l'ionosphère Jovienne à ne pas être en corotation:

Le mapping correspond à une zone de la magnétosphère externe mais fermée au alentour de 3-4h LT.

Pas très bien compris.



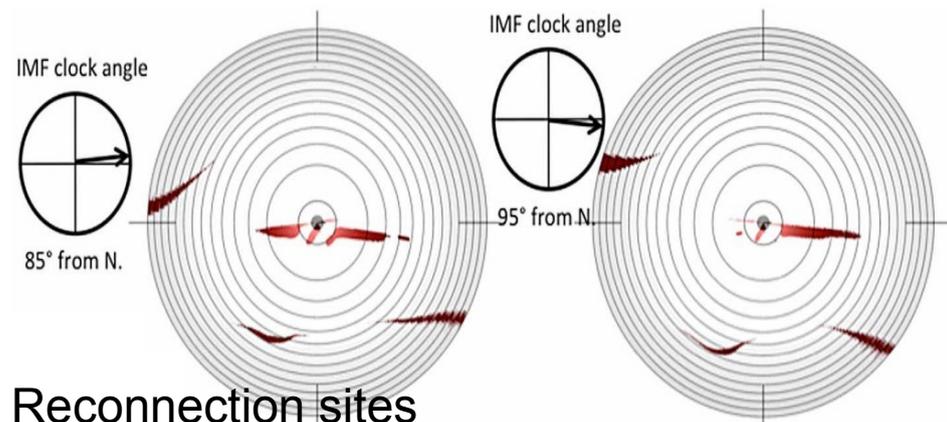
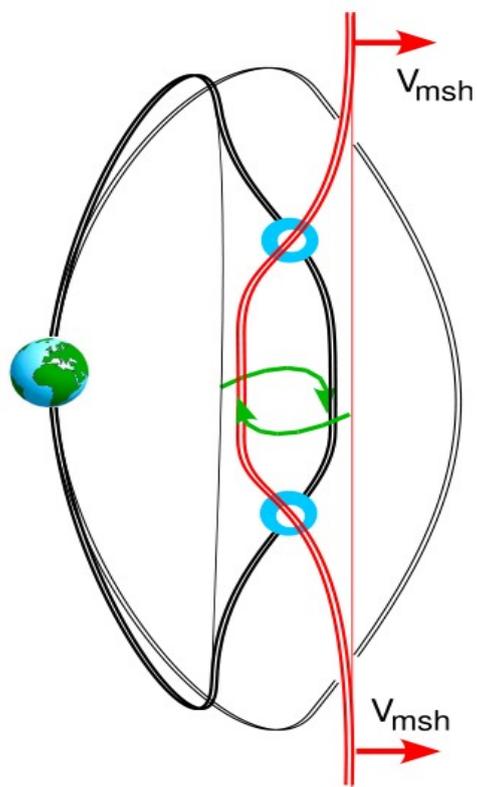


Qu'arrive t il à la magnétopause????????????

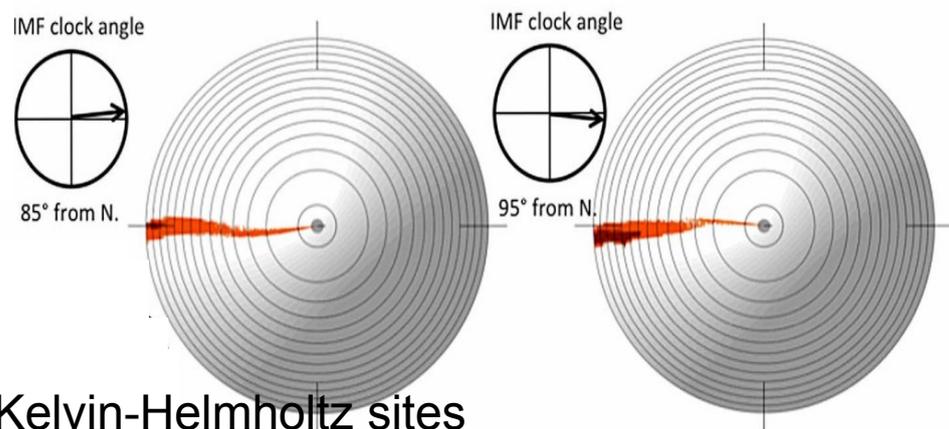
Pas de dépendance apparente vis a vis de la direction de l'IMF

Zone de reconnection possibles très limitées

Pb de causalité: Dungey possible???

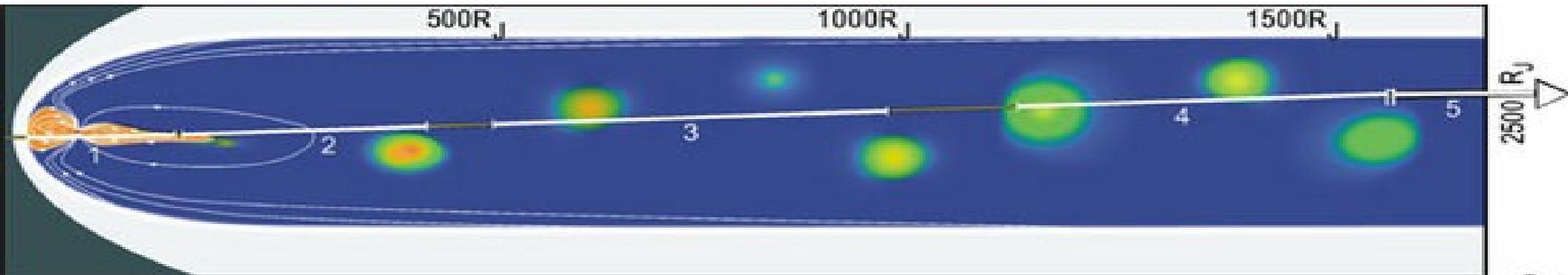


Reconnection sites



Kelvin-Helmholtz sites

Possibilité de reconnexion temporaire via instabilités Kelvin Helmholtz.



La queue de la magnétosphère de Jupiter peut s'étendre jusqu'à l'orbite de Saturne.  
(5 UA, 10000  $R_J$ )

Meilleure exploration par New Horizon : Pb sonde dessinée pour Pluton, instruments inadaptés

Différence par rapport à la Terre:

Terre = Dungey Cycle, la reconnexion dans la queue se fait avec l'IMF Le vent solaire reprend  
Forme habituelle rapidement

Jupiter = Vasyliunas Cycle, le reconnexion dans la queue se fait...avec la ligne de champ.  
Bulle de champ fermée au devenir inconnu (ça sonne bien pour le mot de la fin)