

Doubles-couches fortes le long du tube de flux magnétique reliant Io à Jupiter

Philippe Zarka¹, Sébastien Hess^{1,2}, Fabrice Mottez³

¹LESIA, CNRS-Observatoire de Paris philippe.zarka@obspm.fr

²LASP, University of Colorado, Boulder, USA sebastien.hess@lasp.colorado.edu

³LUTH, CNRS-Observatoire de Paris fabrice.mottez@obspm.fr

- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

- Doubles-couches (DL) en laboratoire:

- gammes de paramètres
- échelles
- conditions aux limites

→ comparaison aux DL naturelles ?

- DL dans les plasmas circumterrestres et le vent solaire:

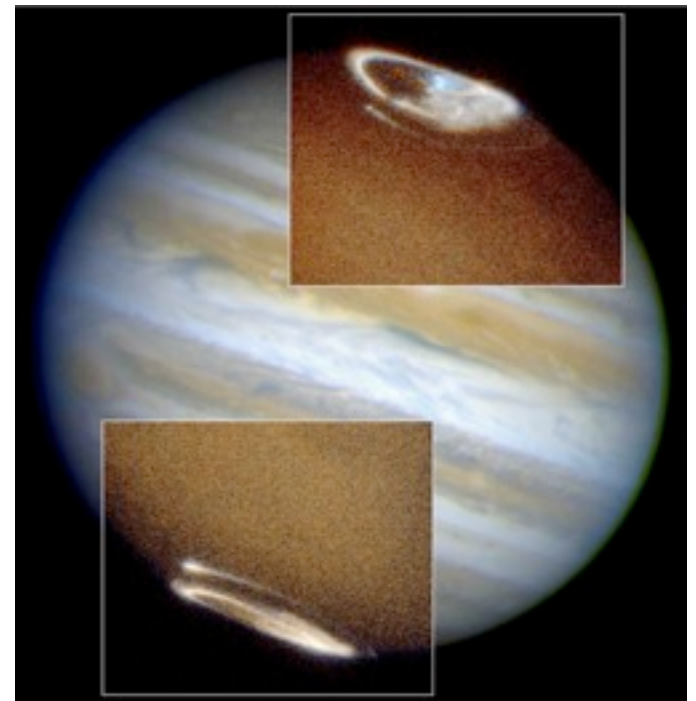
- observations in situ
- traversées rapides
- résolution des mesures spatiales (FAST...)

→ distribution, stabilité, déplacement ?

- Observation à distance des DL ?
 - DL $\Rightarrow$ accélérations électroniques $\Rightarrow$ émissions électromagnétiques
 - Hautes latitudes des Magnétosphères planétaires (TJSUN, M?)

$\rightarrow$ Aurores UV/visible/IR ?

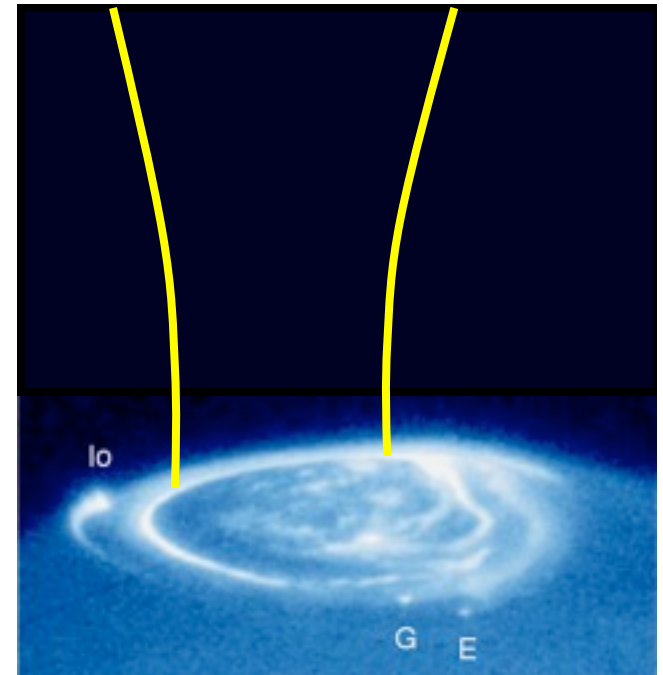
- $\int_{\text{ligne de champ}}$ accélération
- résolution temporelle limitée



- Observation à distance des DL ?
 - DL $\Rightarrow$ accélérations électroniques $\Rightarrow$ émissions électromagnétiques
 - Hautes latitudes des Magnétosphères planétaires (TJSUN, M?)

$\rightarrow$ Aurores UV/visible/IR ?

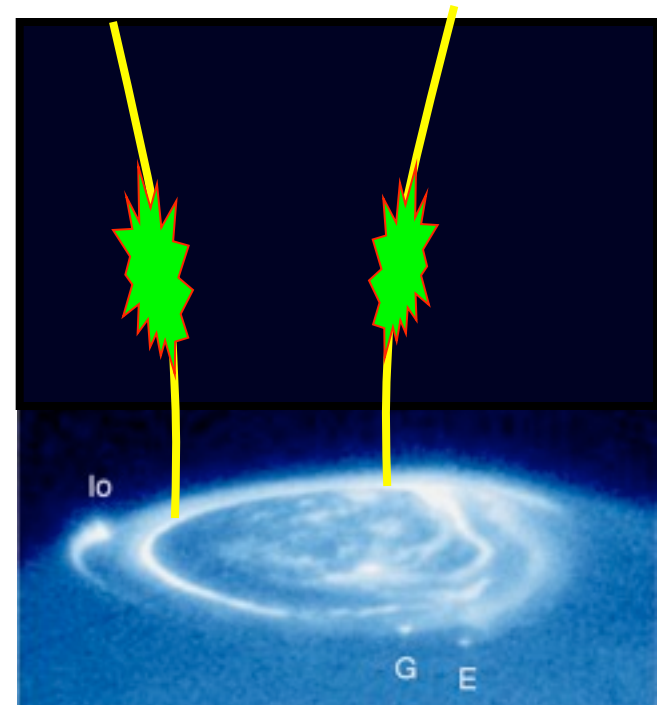
- $\int_{\text{ligne de champ}}$ accélération
- résolution temporelle limitée



- Observation à distance des DL ?
 - DL $\Rightarrow$ accélérations électroniques $\Rightarrow$ émissions électromagnétiques
 - Hautes latitudes des Magnétosphères planétaires (TJSUN, M?)

→ Émissions radio (Maser-cyclotron) ?

- locales ($f \sim f_{ce}$), sporadiques
- localisation spatiale des sources ?
- faible résolution /t,f des observations spatiales



- Observation à distance des DL ?

- DL $\Rightarrow$ accélérations électroniques $\Rightarrow$ émissions électromagnétiques
- Hautes latitudes des Magnétosphères planétaires (TJSUN, M?)

→ Émissions radio (Maser-cyclotron) de l'IFT

= sursauts « millisecondes »

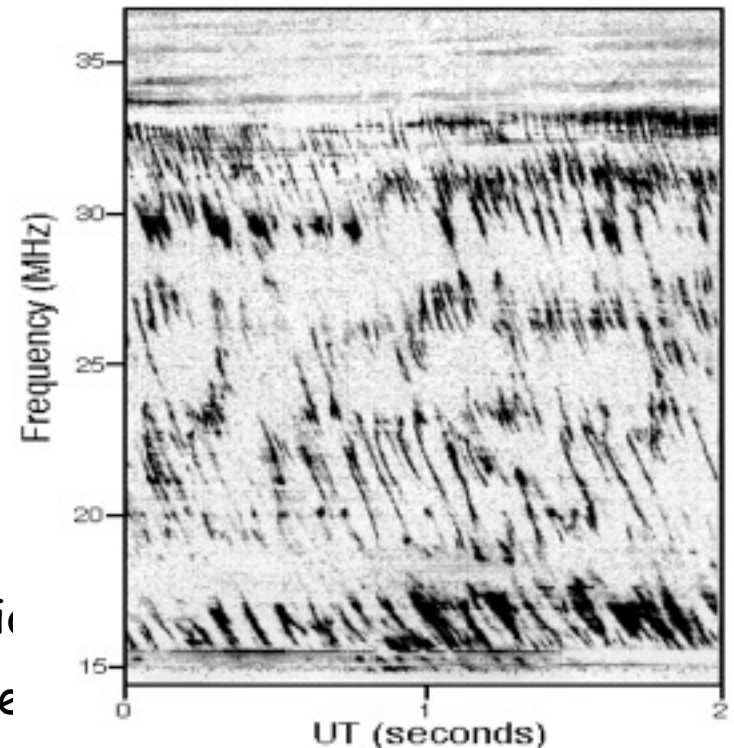
- locales ($f \sim f_{ce}$), sporadiques

- sources à $\leq 10^\circ$ de l'IFT

(+ modèle de B_{Jupiter})

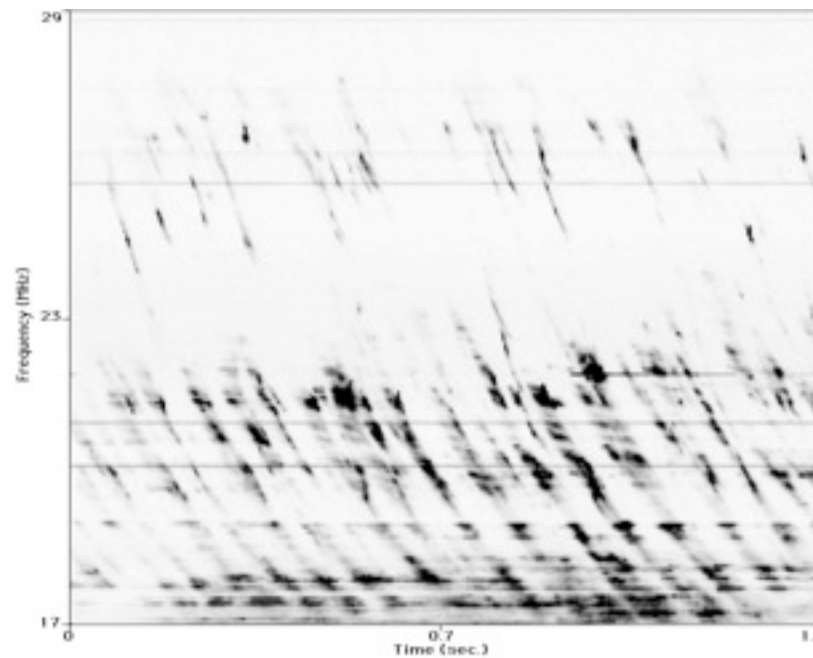
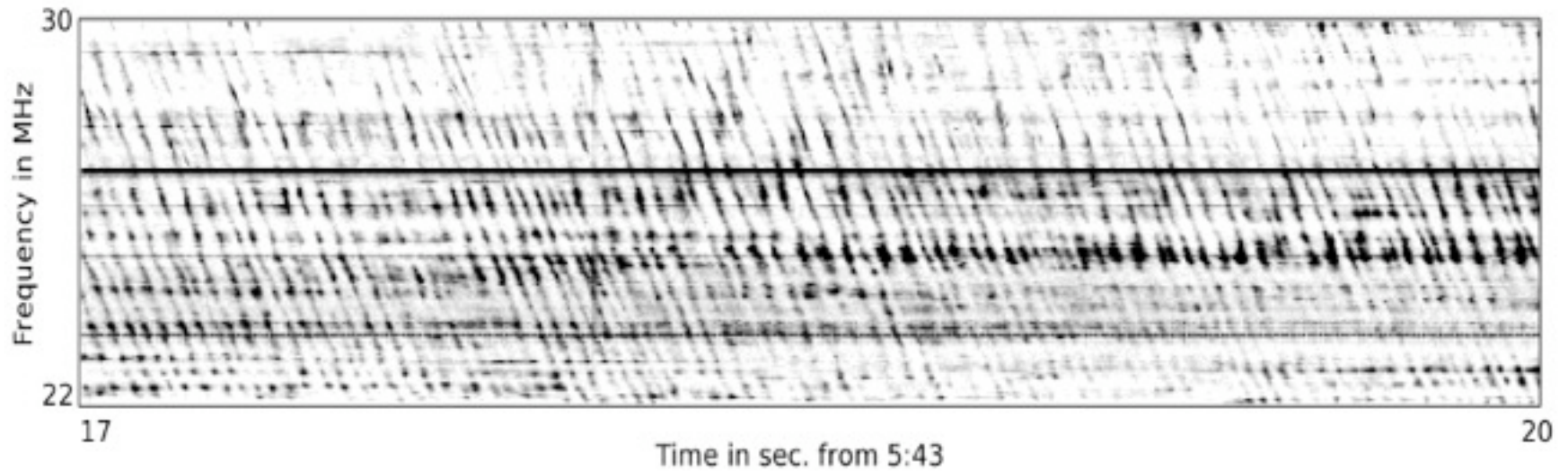
- $f > 10 \text{ MHz} \Rightarrow$ observables du sol

à hautes résolutions
temporelle et spectrale



- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

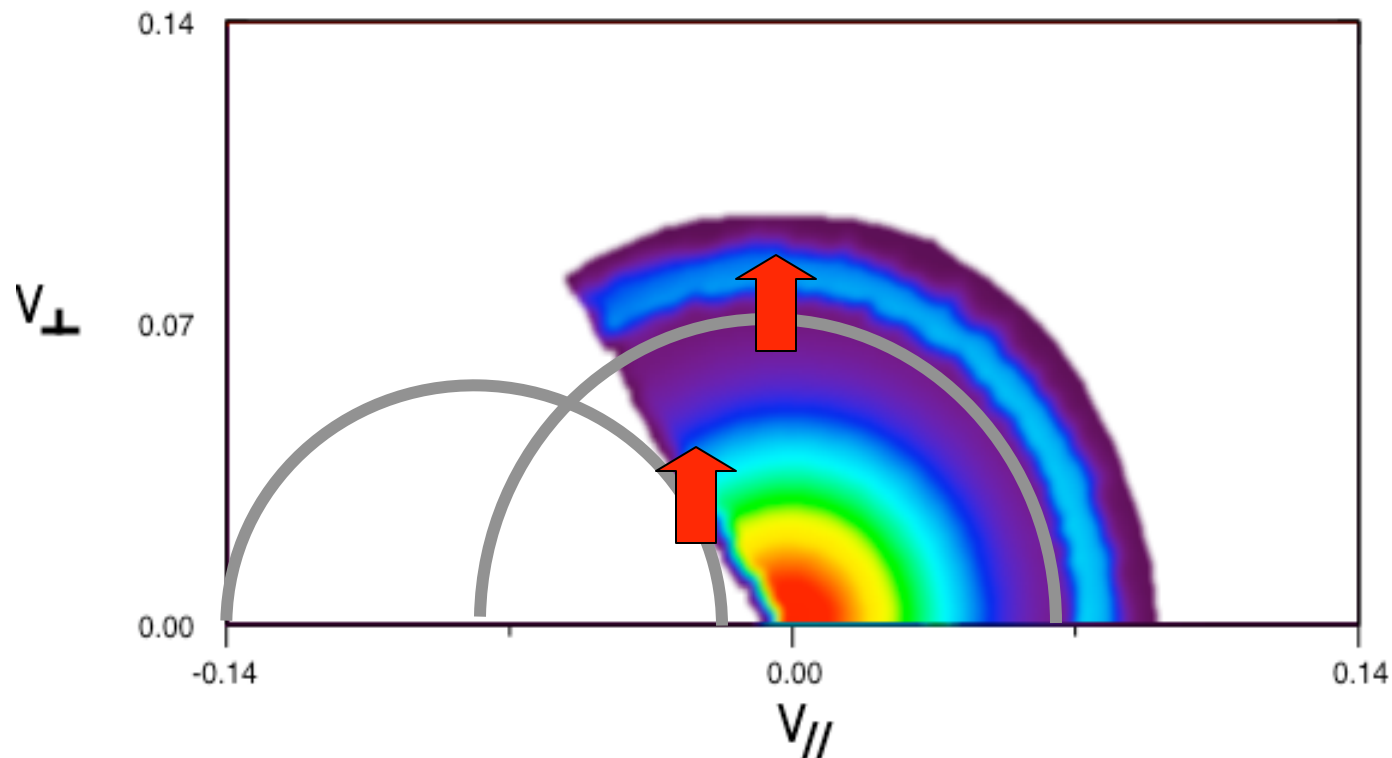
- Émissions radio discrètes (sursauts), quasi-périodiques



- Génération via Maser-cyclotron

Résonance : $\omega = \omega_c / \Gamma + k_{\parallel} v_{\parallel}$

Taux de croissance : $\gamma = \frac{\omega_p^2 c^2}{8\omega_c} \int_0^{2\pi} v_{\perp}^2(\theta) \nabla_{v_{\perp}} f(\mathbf{v}_0, \mathbf{R}(\theta)) d\theta$ with $\omega > \omega_c$

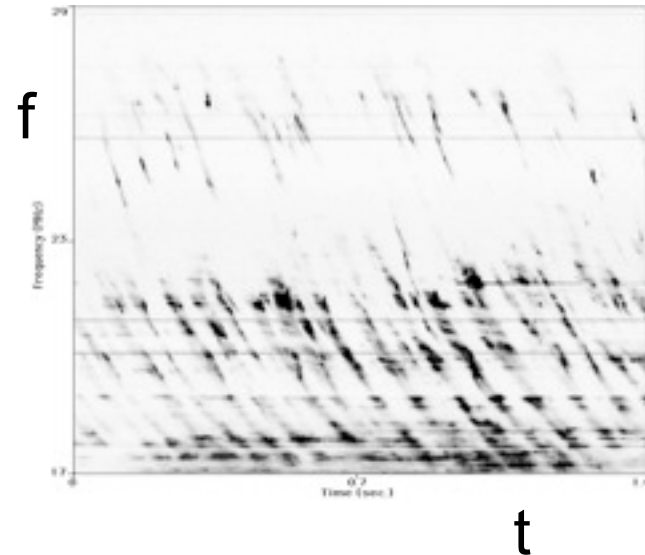


- Dérive moyenne $df/dt(t) < 0$

$$df/dt = df_{ce}/ds \times ds/dt$$

∇B
 (modèle VIP4)

vitesse
 parallèle



Mouvement adiabatique des électrons en l'absence de champ électrique :

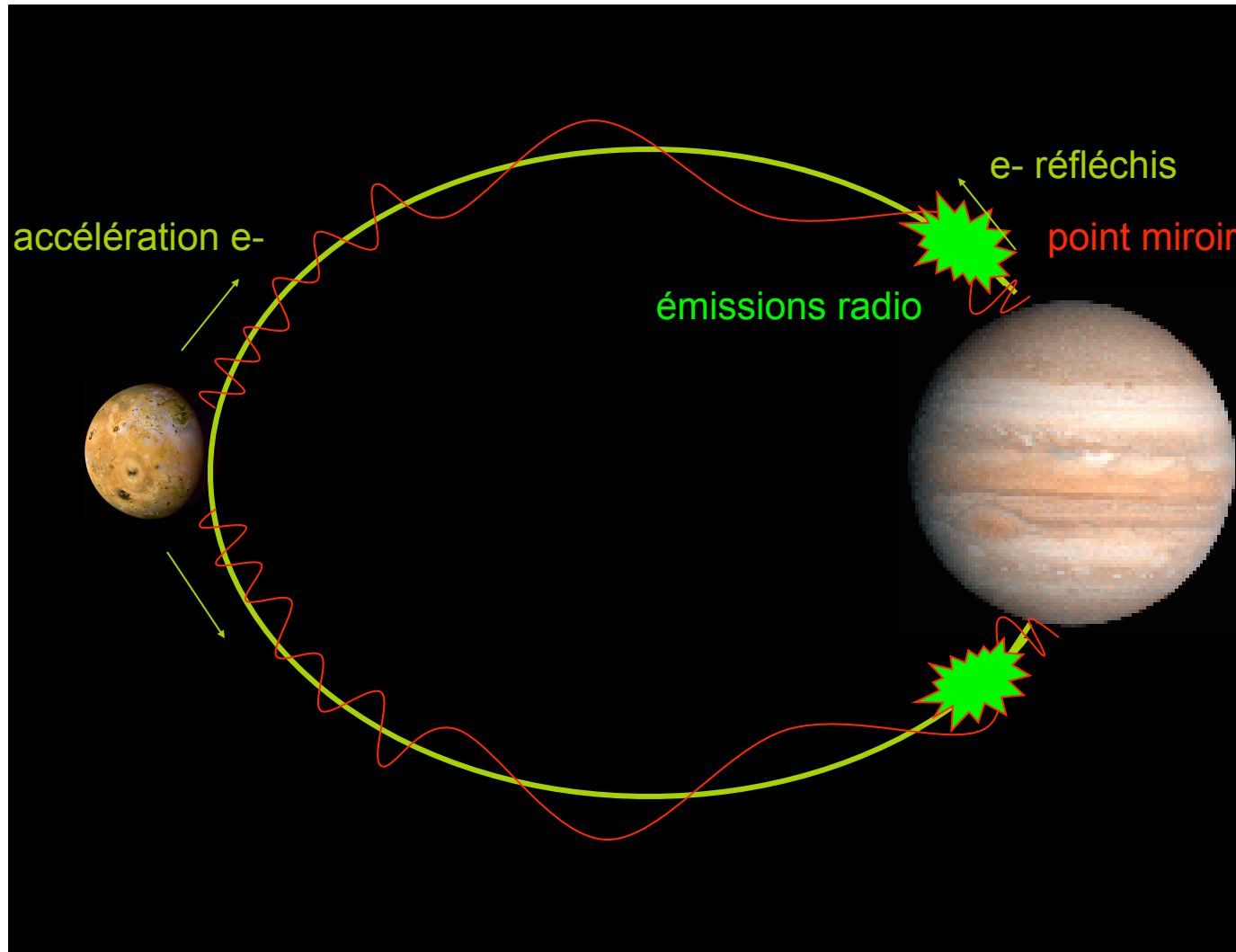
$$\mu = v_{\perp}^2 / f_{ce} = v^2 / f_{\text{miroir}} = C^{\text{te}}$$

$$v^2 = v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2 = C^{\text{te}}$$

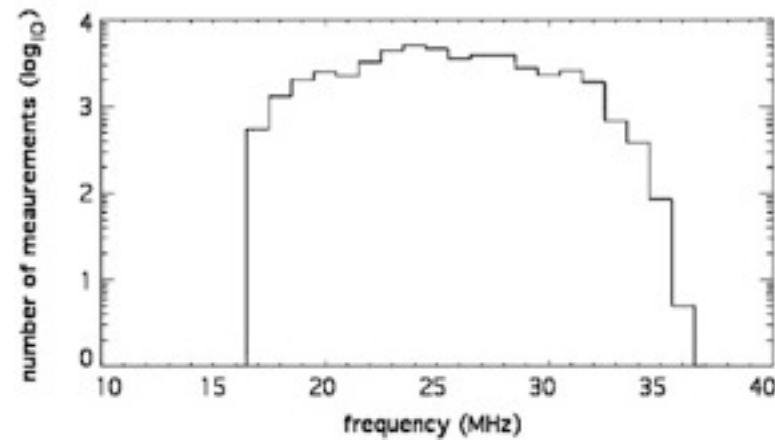
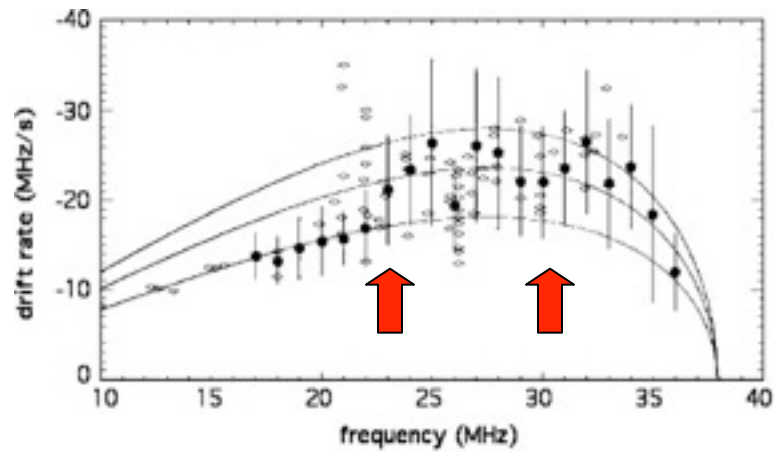
Angle d'attaque ($\mathbf{v}, \mathbf{B}$) :

$$\sin^2 \Phi = v_{\perp}^2 / v^2 = \mu / v^2 \cdot f_{ce} = f_{ce} / f_{\text{miroir}}$$

- Dérive moyenne $df/dt(t) < 0 \Rightarrow$ émission d'électrons « remontants »

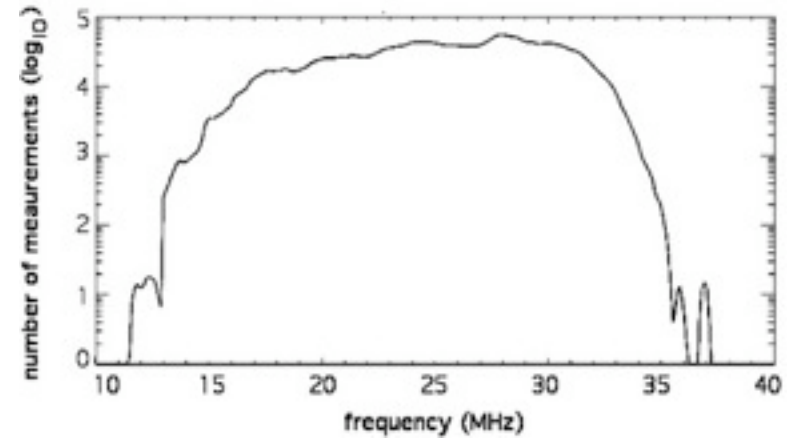
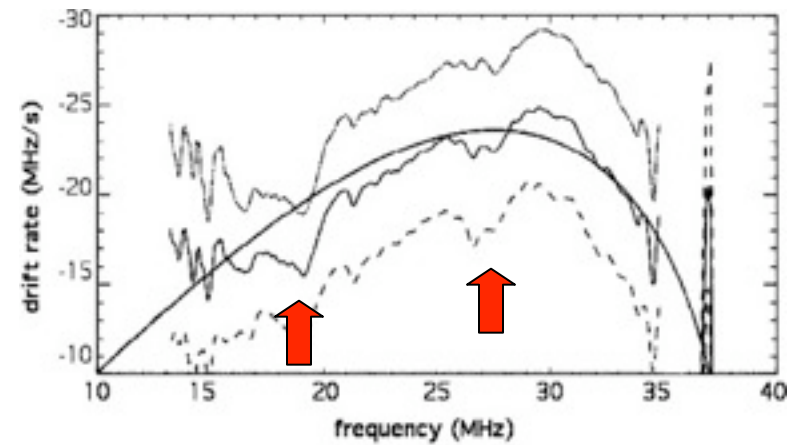


$$E = 5.3 \pm 2.2 \text{ keV}, \phi_{\text{eq}} \sim 2.8^\circ$$



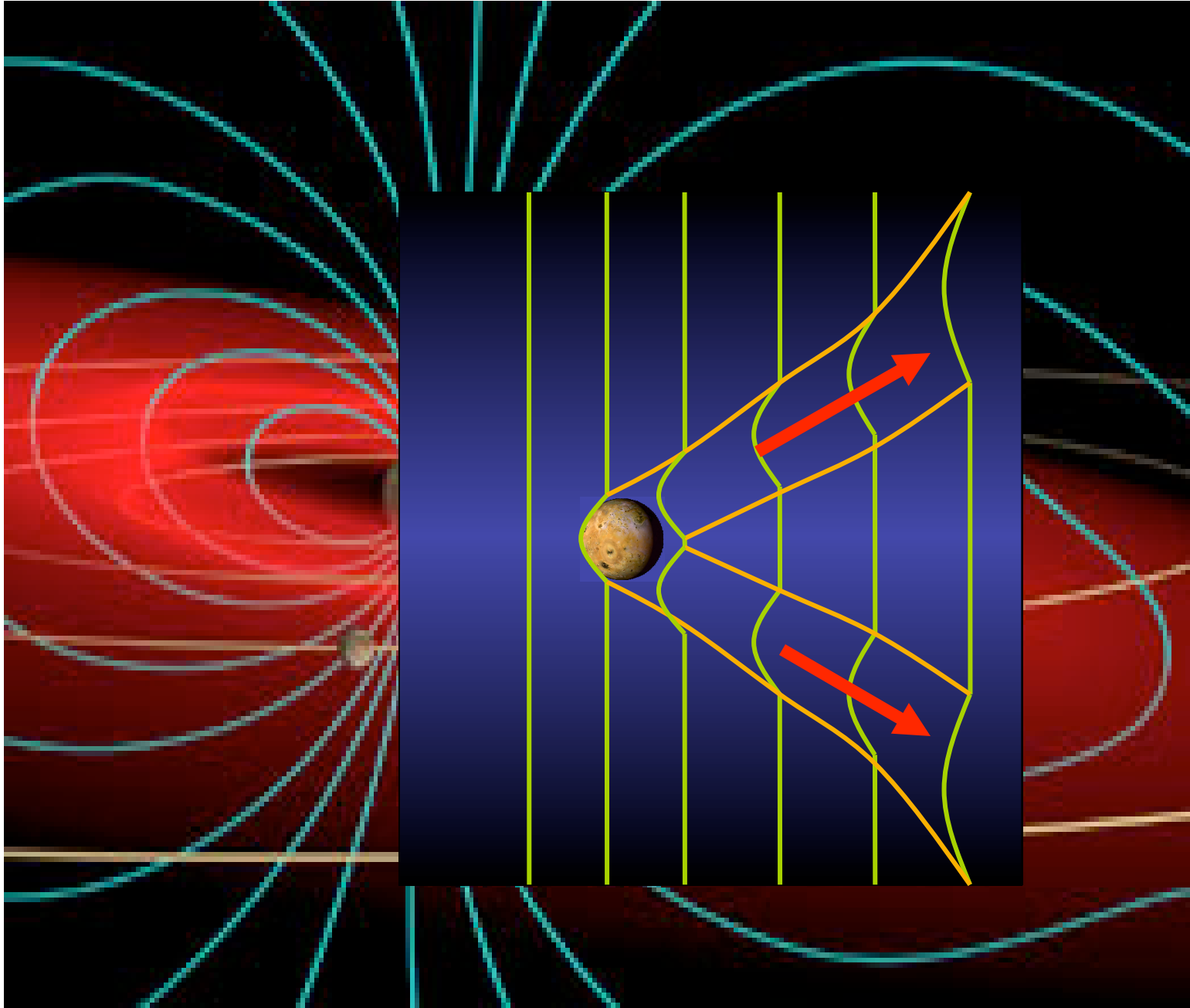
[Zarka et al., 1996]

$$E = 4.5 \pm 1.1 \text{ keV}, \phi_{\text{eq}} \sim 2.7^\circ$$

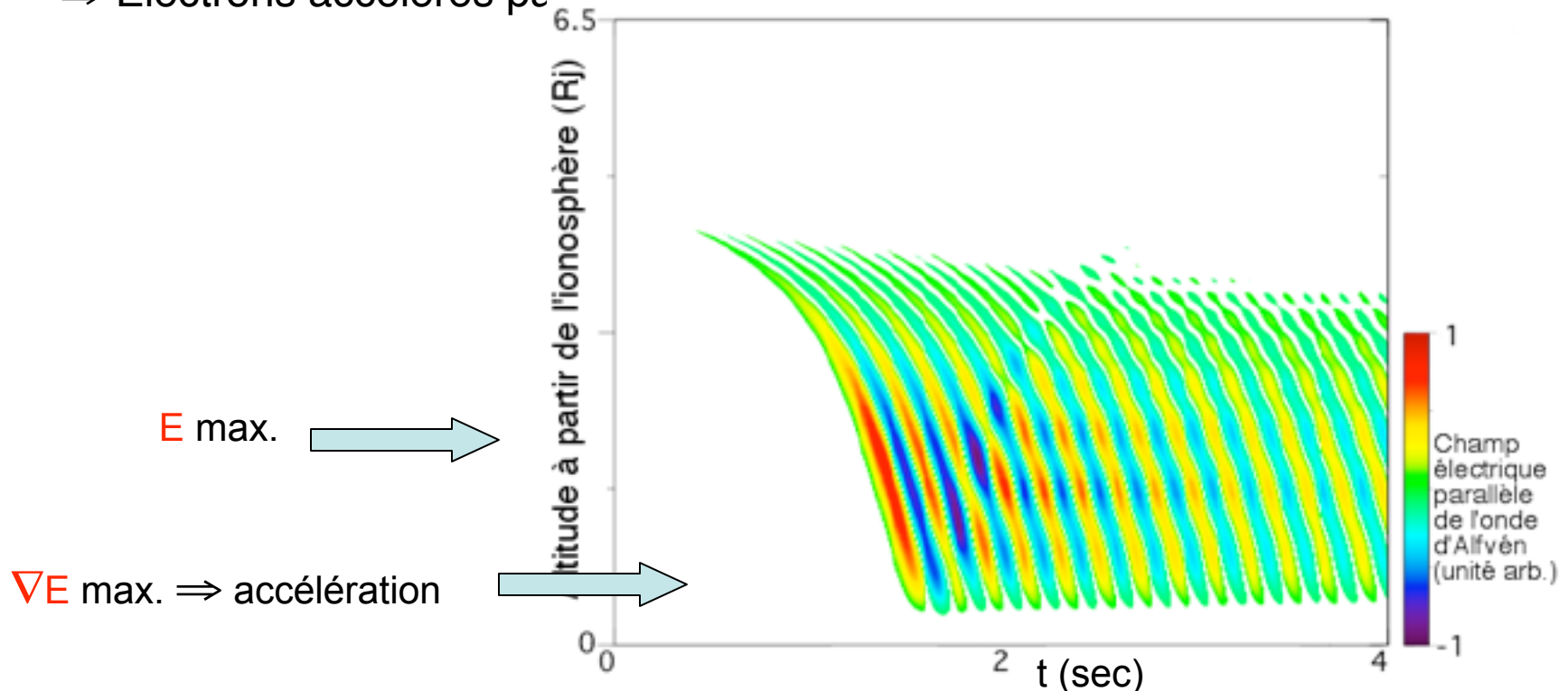


[Hess et al., 2007a]

- Accélération des électrons par ondes d'Alfvén

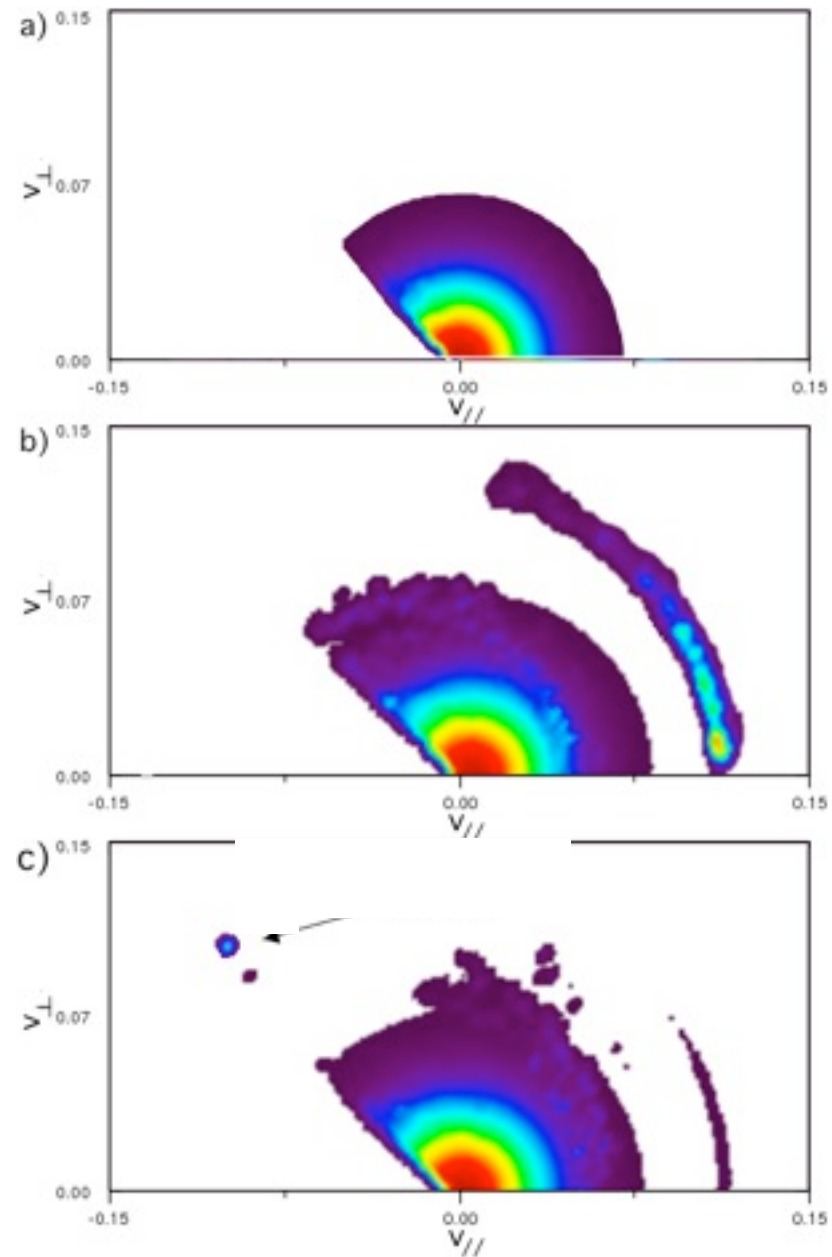


- Accélération des électrons par ondes d'Alfvén
- Simulation PIC de l'IFT : 1,5 D 4096 cellules ~ 65 M particles
- Flux de particules maxwellien injecté ~ 10 (bord du tore)
- Mouvement des particules: $\mu = C^{te}$, $dv_{//}/dt = -q/m \nabla B$ + champ gravit. + qE/m
- Injection d'une onde d'Alfvén cinétique ($\lambda_A \sim \lambda_e$) : $E_{//} = \omega_A k_{\perp} \lambda_e^2 \delta B_{\perp}$
 $\Rightarrow$ propagée analytiquement (simulation non auto-cohérente)
 $\Rightarrow$ Electrons accélérés par l'onde d'Alfvén



- Accélération des électrons par ondes d'Alfvén

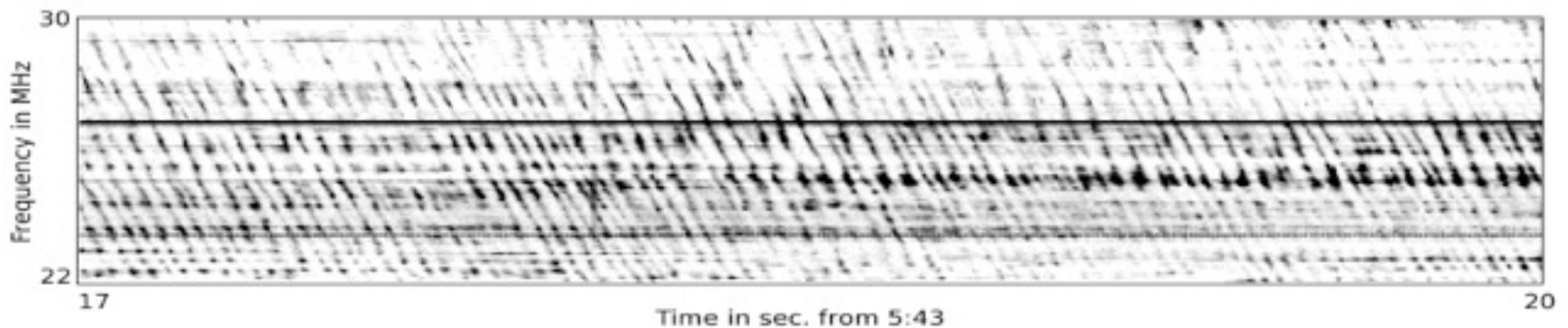
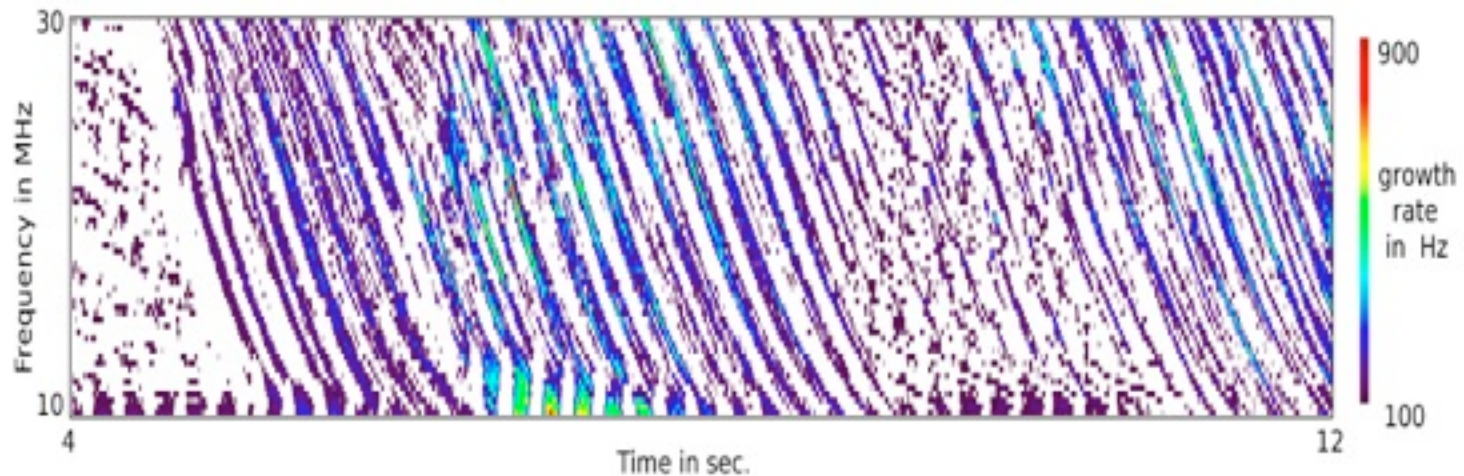
- Calcul de la fonction de distribution e- à différents t & z
 - $\nabla E \sim 0,8 R_J \Rightarrow$ faisceaux d'e- descendants
 - Convergence de B $\Rightarrow$ 1/2 coquille
 - Miroir magnétique $\Rightarrow$ anneau
- $\Rightarrow$ Calcul analytique du taux de croissance du Maser-cyclotron



- Accélération des électrons par ondes d'Alfvén

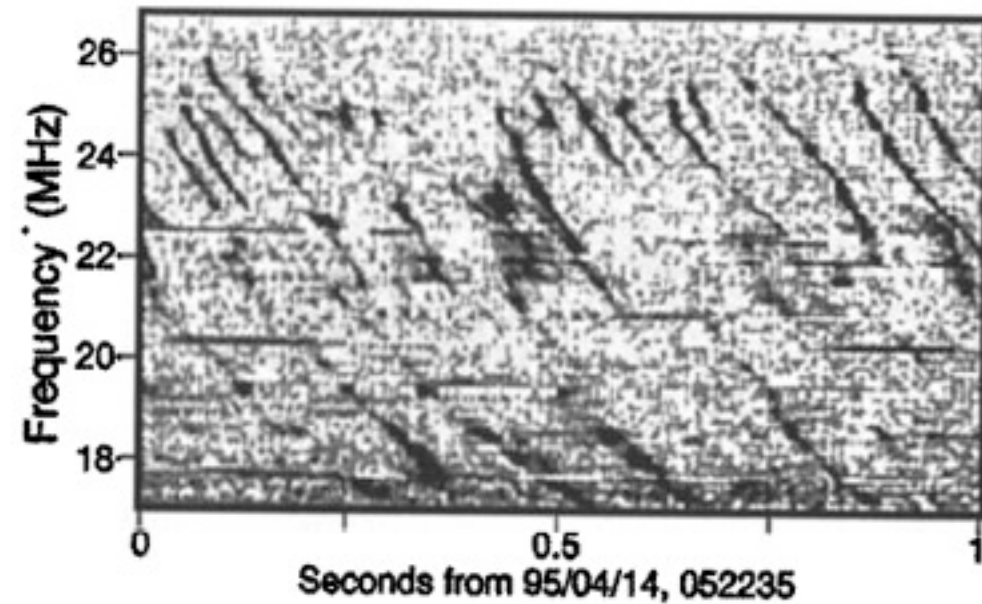
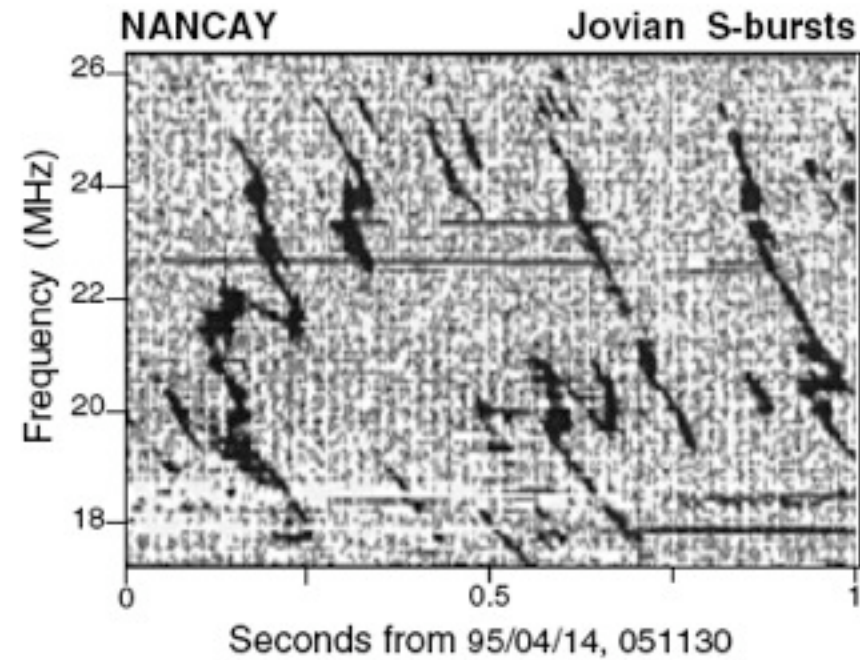
- + Génération via Maser-cyclotron

- Le mode oblique reflète le passage de l'onde d'Alfvén
⇒ émission sporadique, quasi-périodique à la période de l'onde



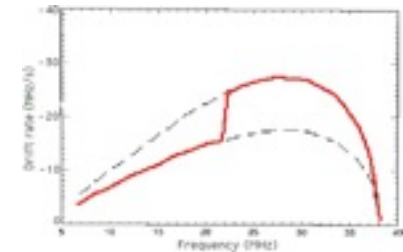
[Hess et al., 2007b]

- Morphologie détaillée des sursauts + complexe



- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

- Étude de spectres dynamiques dispersés sur 2 ans (total ~1h30)
- Recherche de discontinuités de df/dt



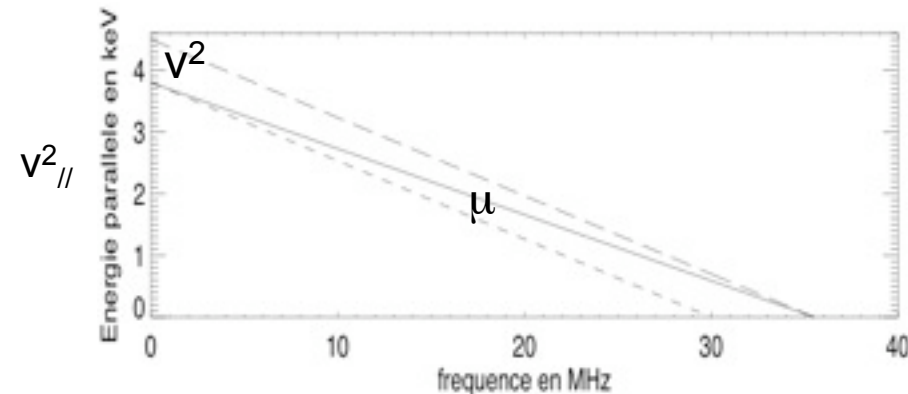
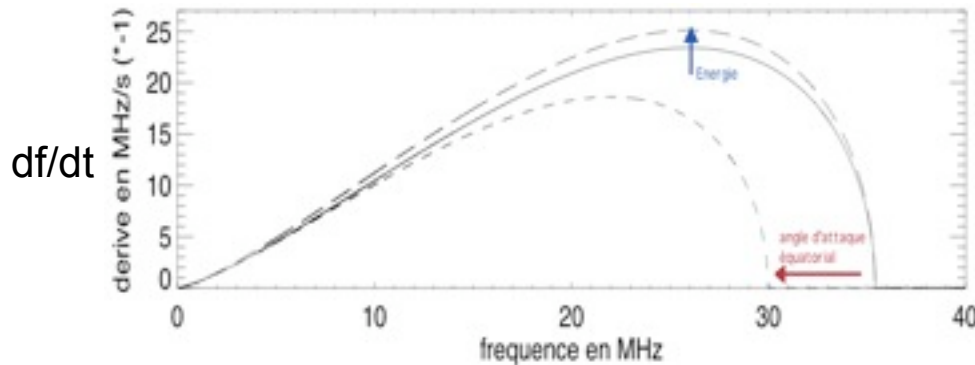
Mouvement adiabatique des électrons en l'absence de champ électrique :

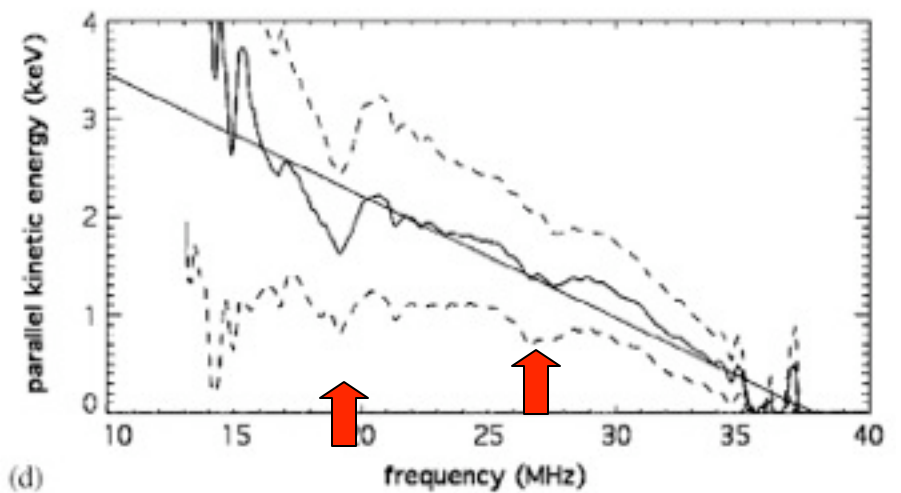
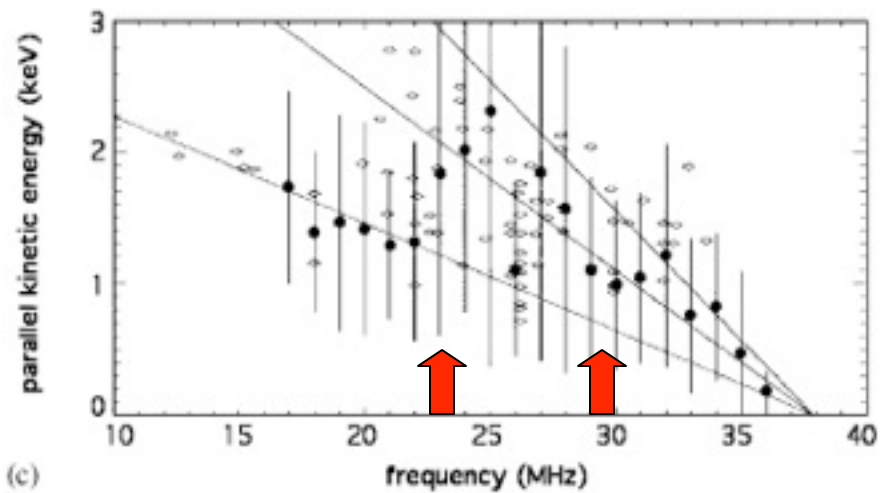
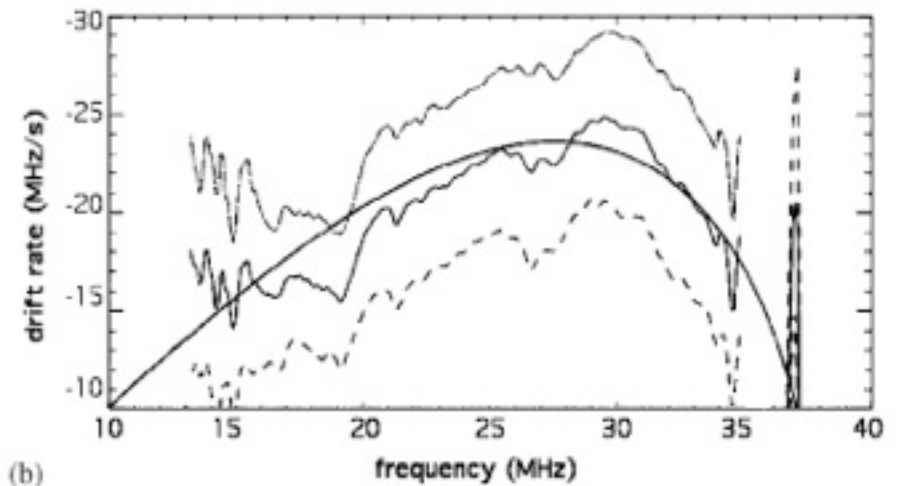
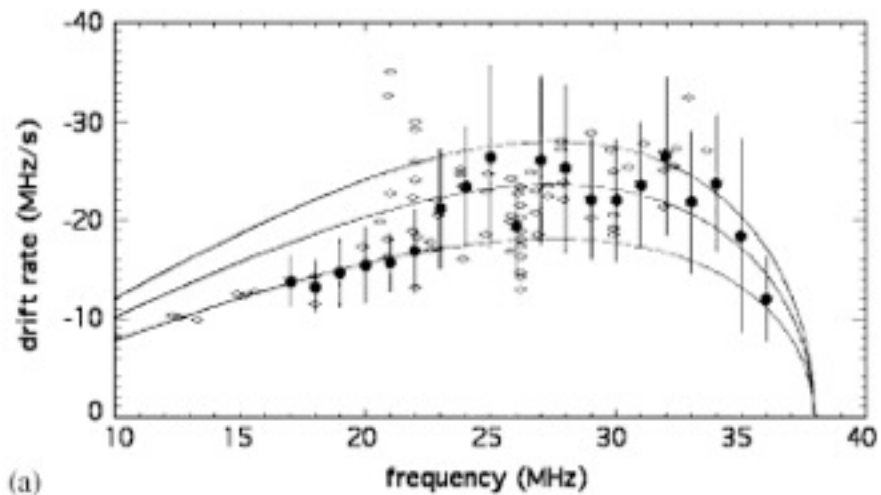
$$\mu = v_{\perp}^2 / f_{ce} = v^2 / f_{\text{miroir}} = C^{\text{te}}$$

$$v^2 = v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2 = C^{\text{te}}$$

Energie parallèle:

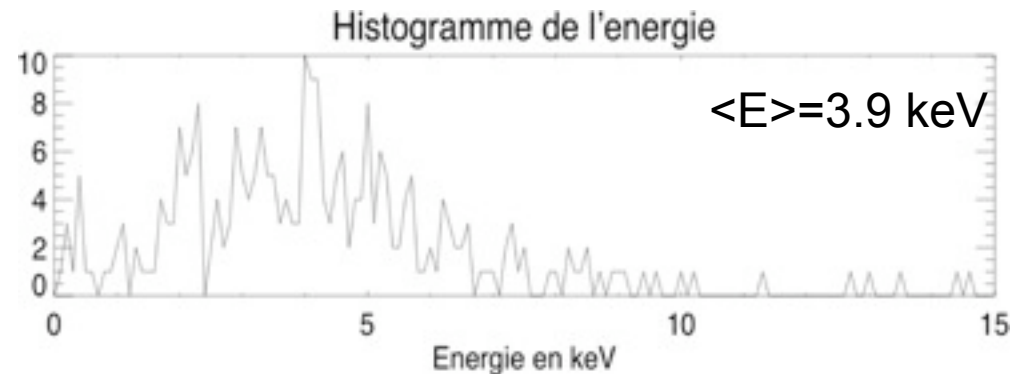
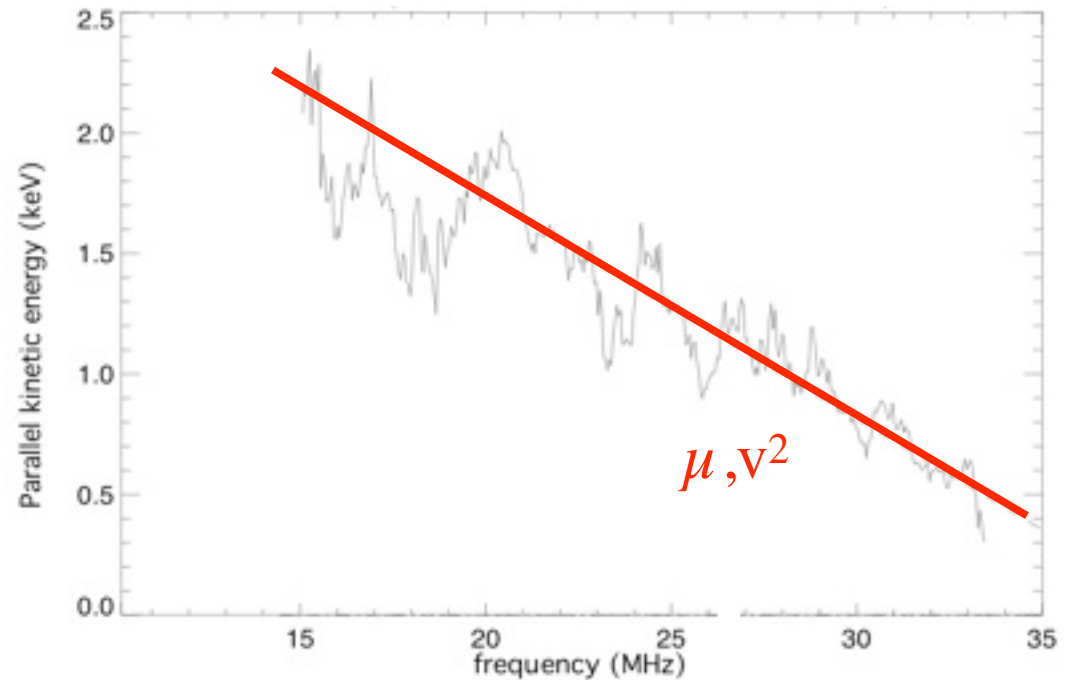
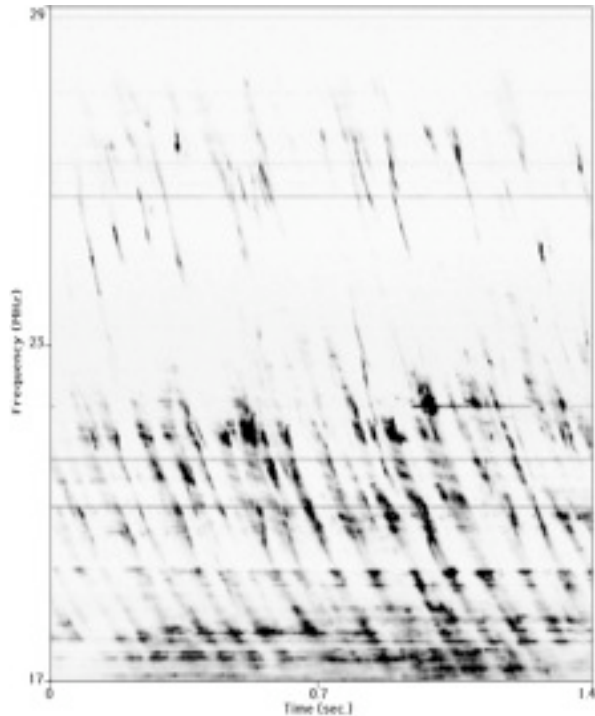
$$v_{\parallel}^2 = v^2 - v_{\perp}^2 = v^2 - \mu \cdot f_{ce}$$



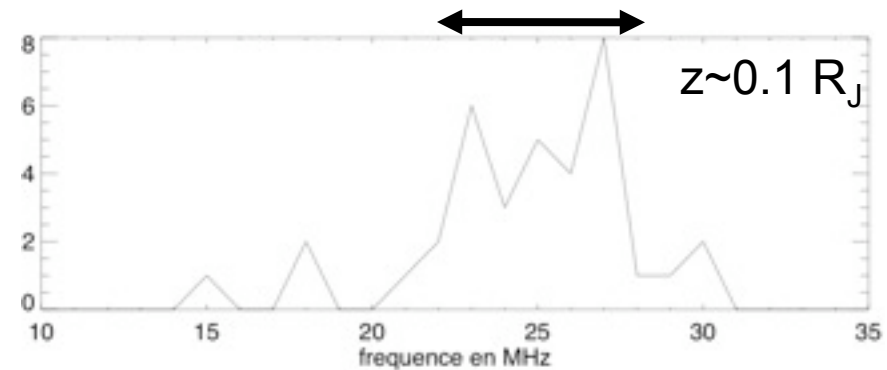
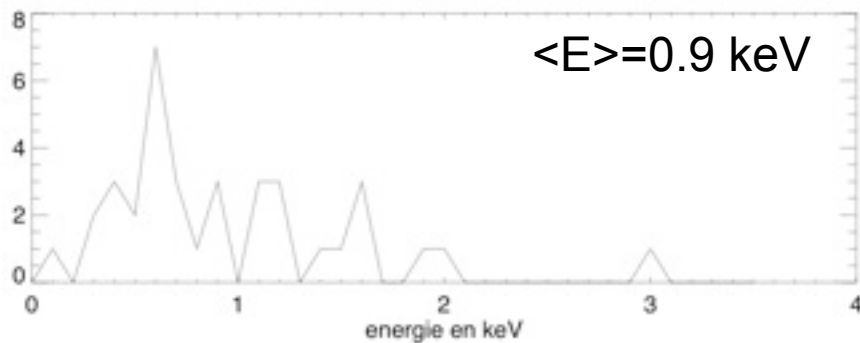
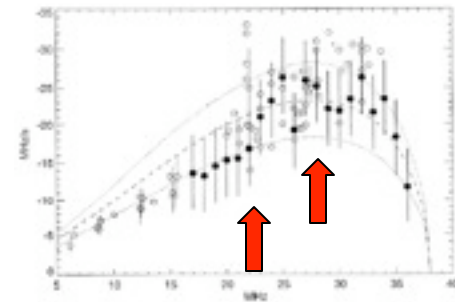
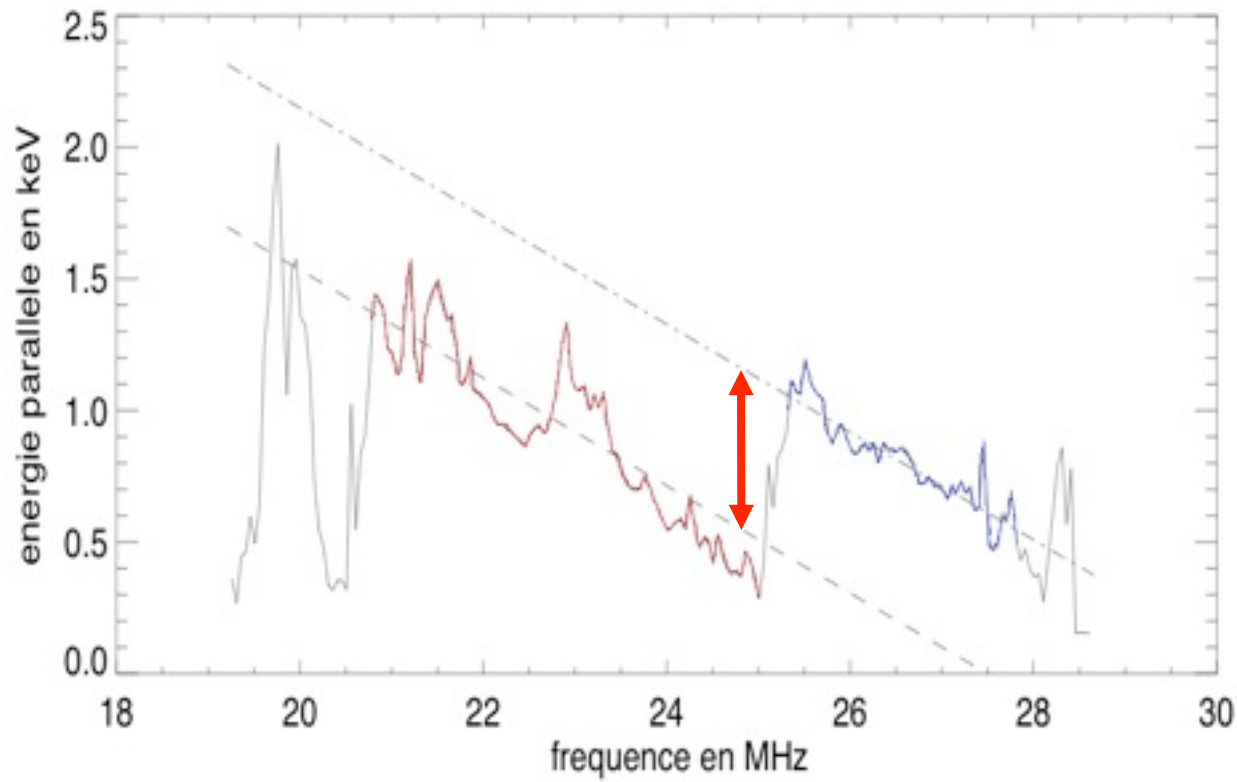


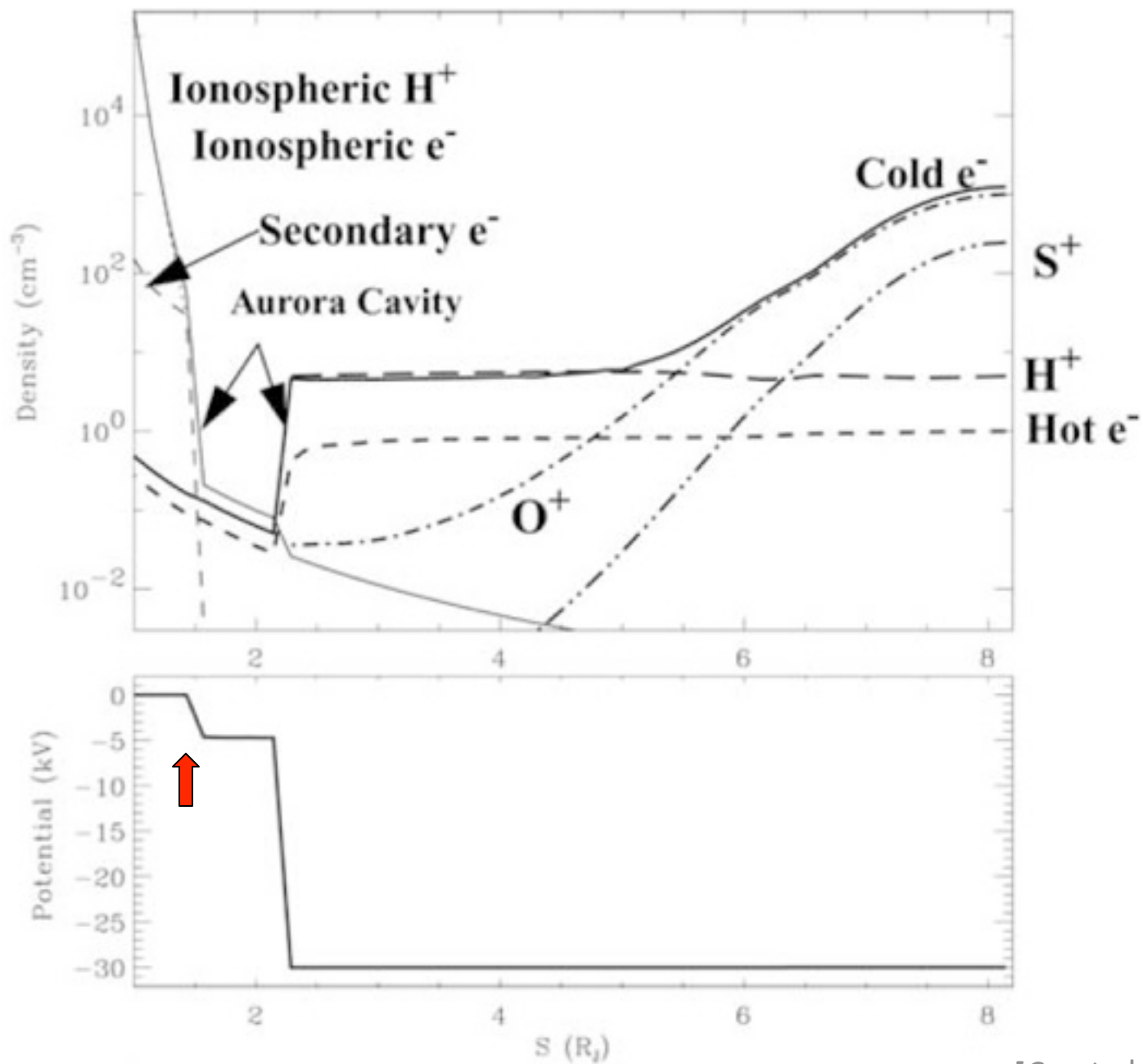
[Hess et al., 2007a]

- Confirmation du mouvement adiabatique des électrons pour la plupart des spectres dynamiques individuels



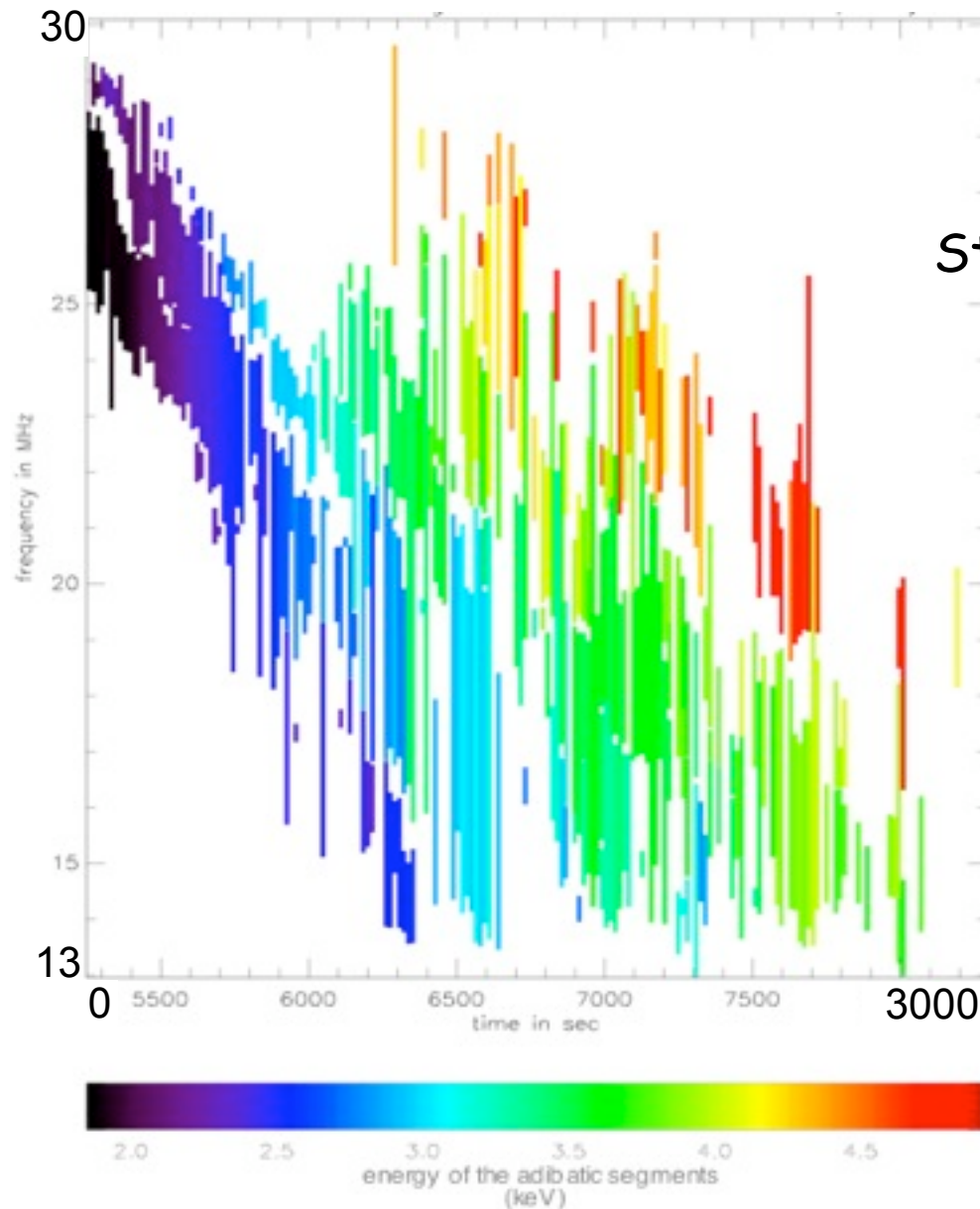
- Doubles-couches fortes détectées dans 15% des cas





- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

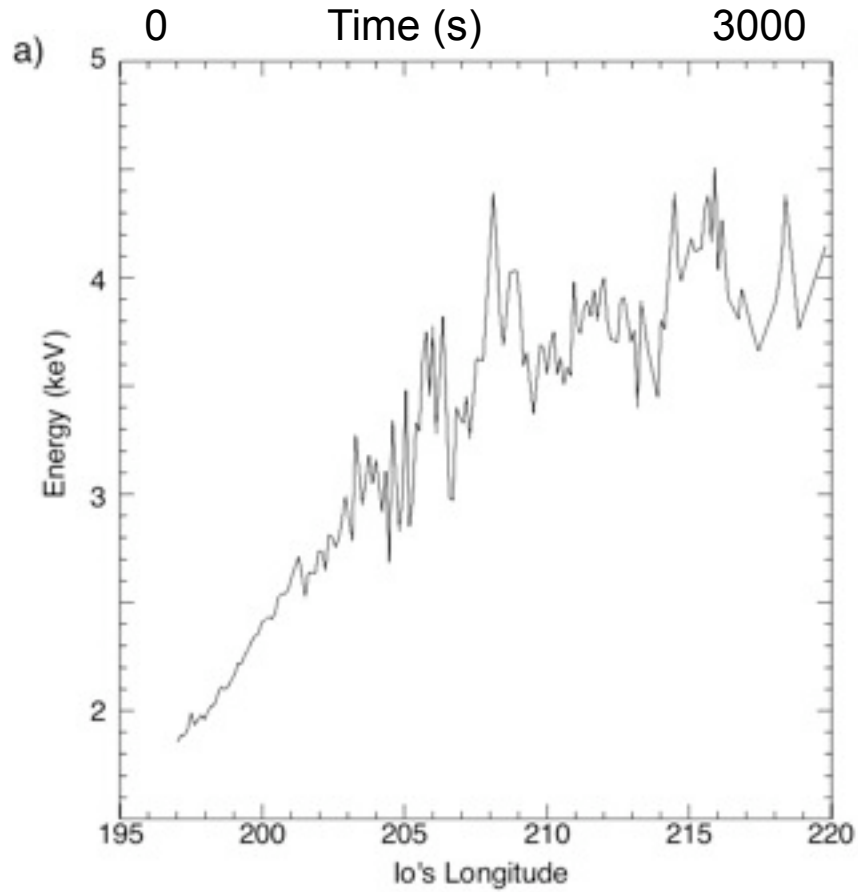
- Étude d'un spectre dynamique ~continu de ~1h



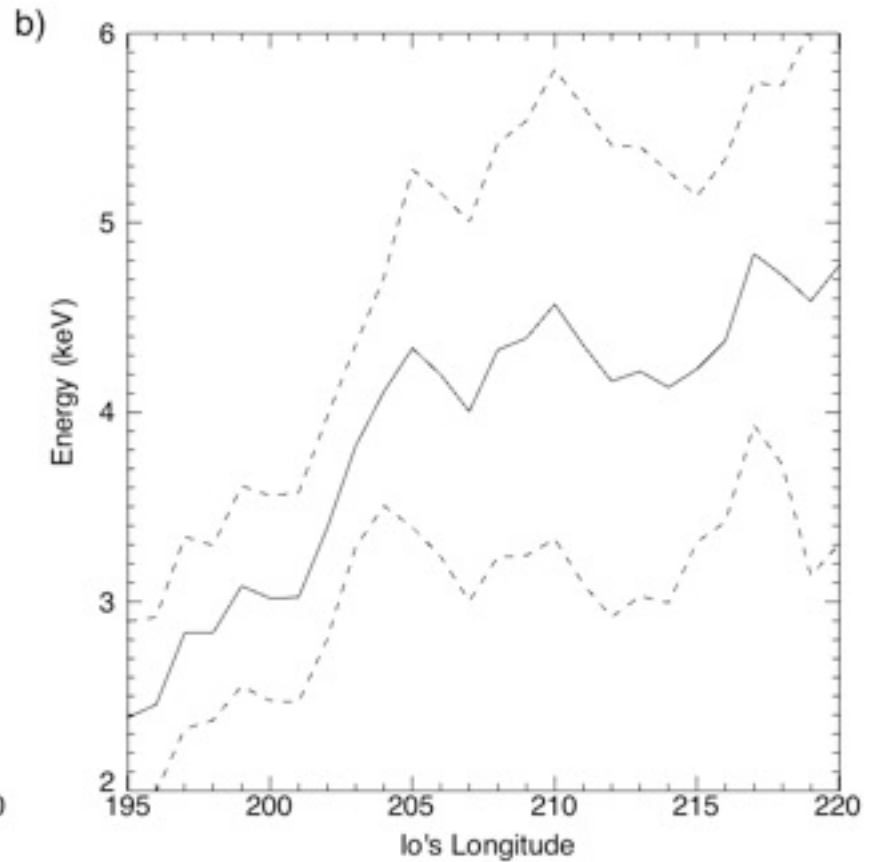
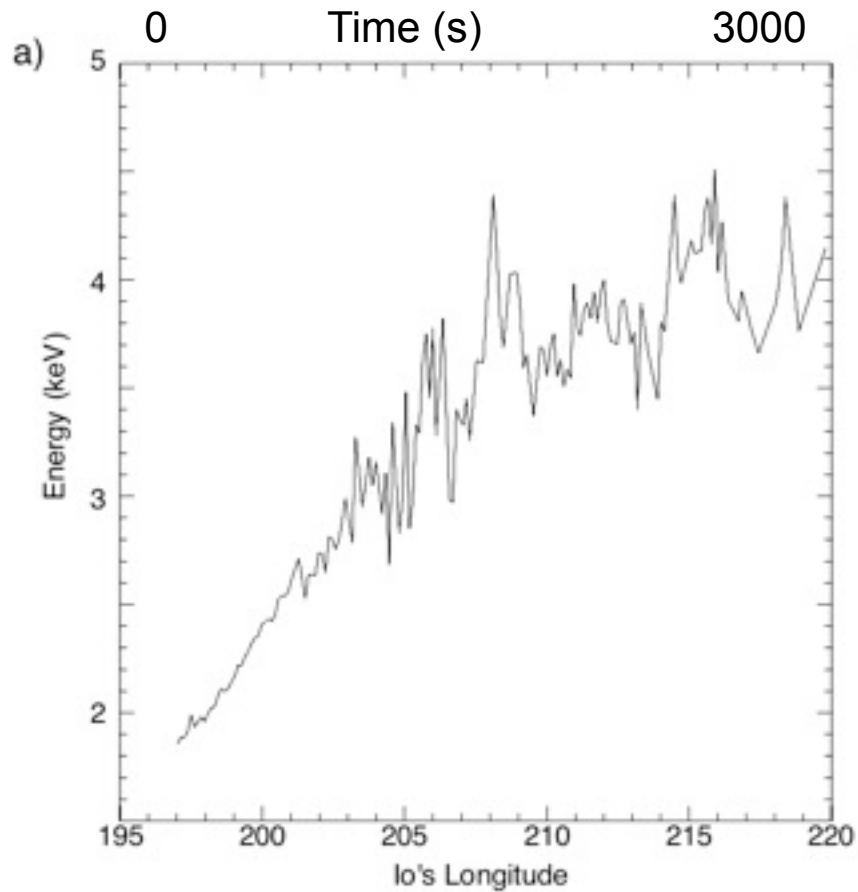
Stabilité > 10 min.

[Hess et al., 2008]

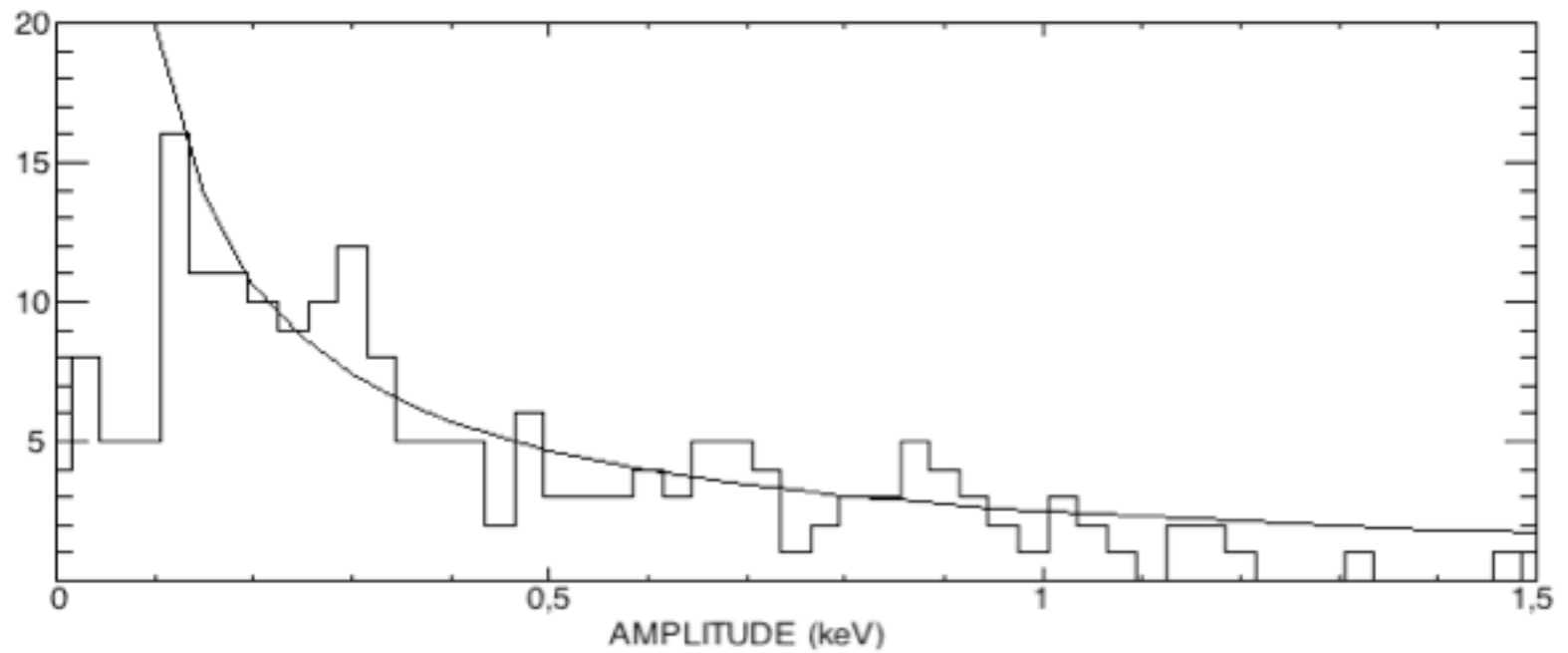
$\langle E \rangle$ (électrons) = 3.2 keV, augmente avec t ou Λ_{I_0} ?



$\langle E \rangle$ (électrons) = 3.2 keV, augmente avec t ou Λ_{I0} ?

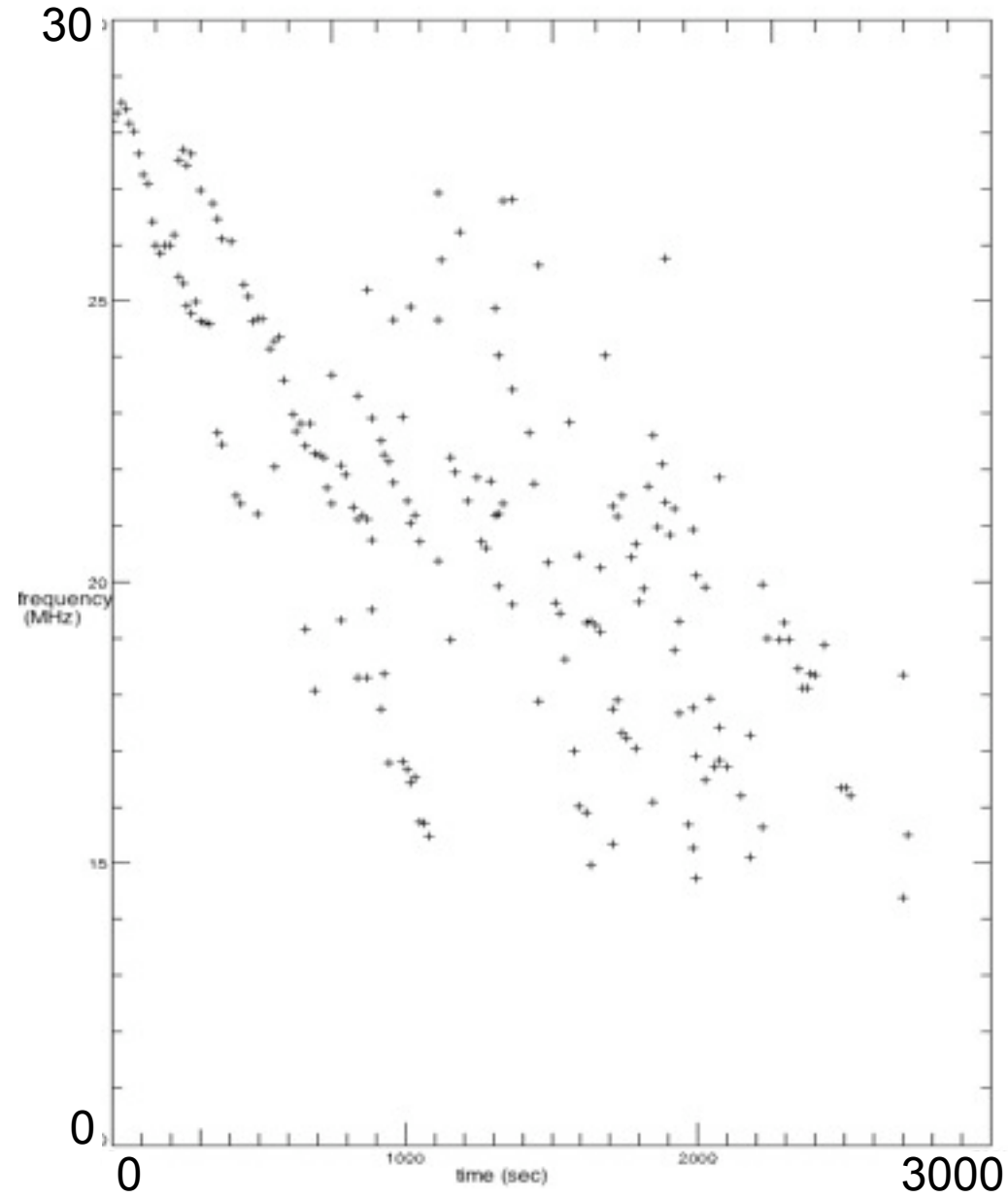


$\langle E \rangle$ (DL) = 0.35 keV, varie en $1/E$



- Déplacement des DLs

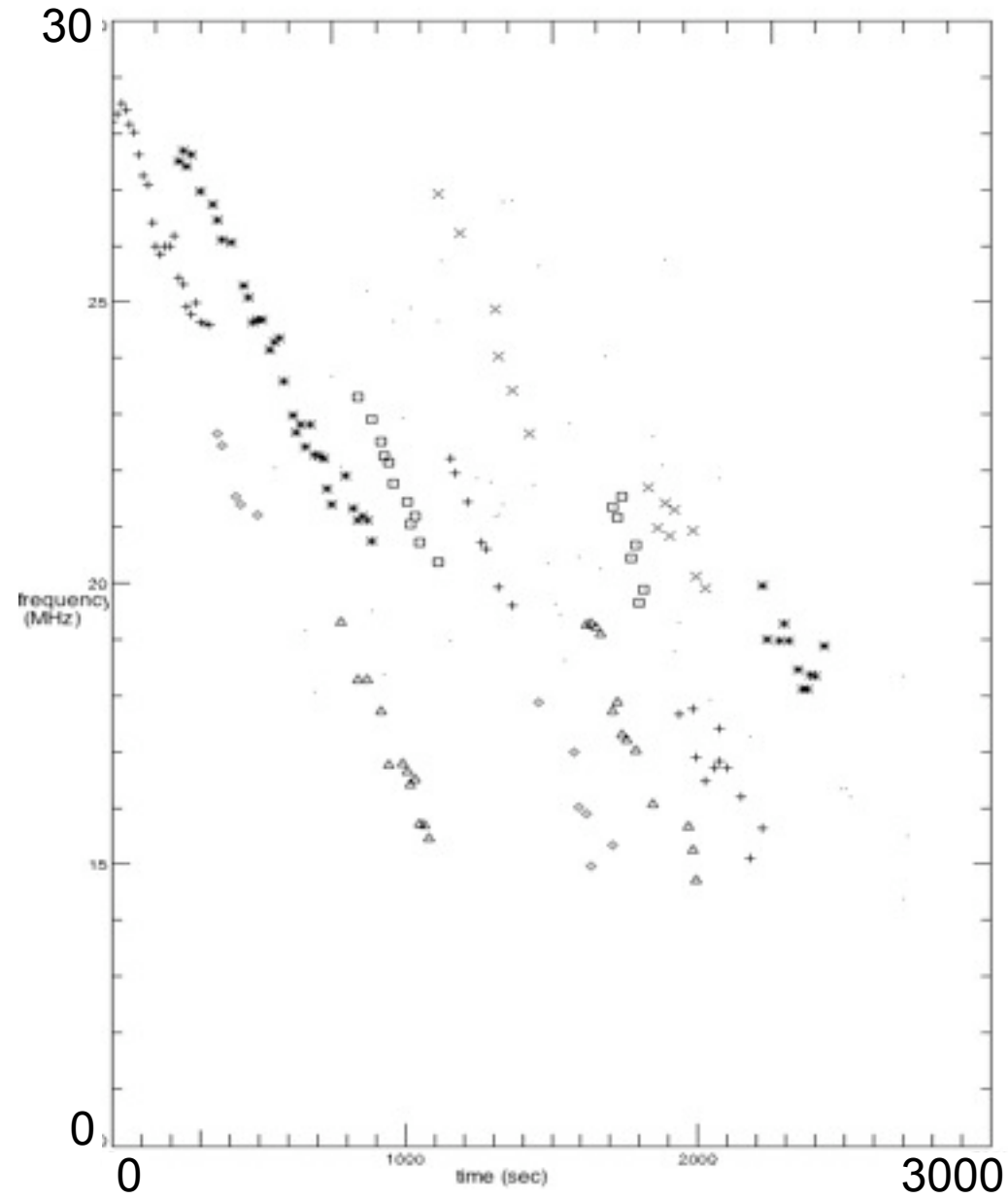
- Les DLs dérivent / t,f



[Hess et al., 2008]

- Déplacement des DLs

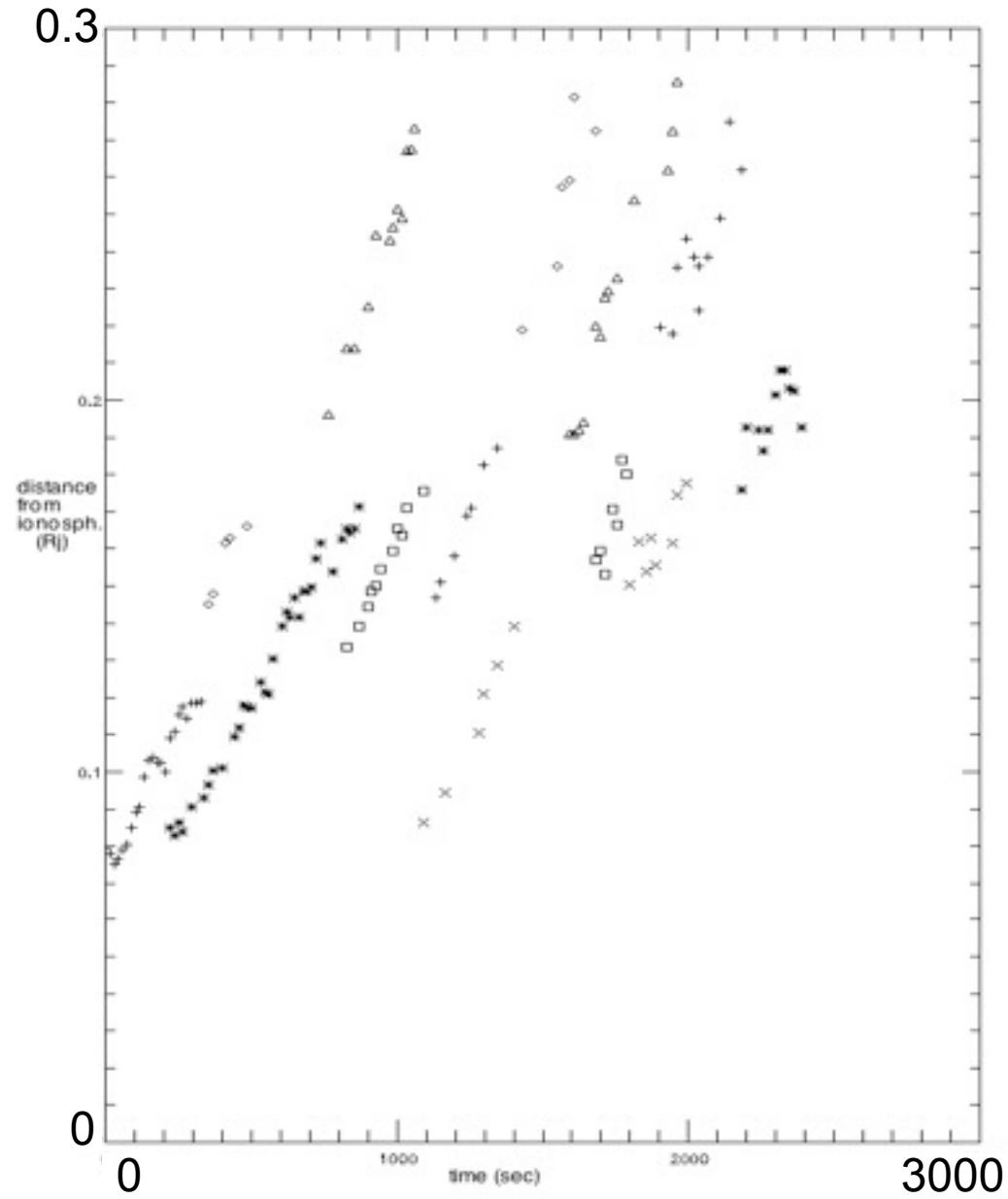
- Les DLs dérivent / t,f



[Hess et al., 2008]

- Déplacement des DLs

- Les DLs dérivent / t, f
- Modèle de B Jovien
⇒ positions



[Hess et al., 2008]

• Déplacement des DLs

- Les DLs dérivent / t,f
- Modèle de B Jovien

⇒ positions

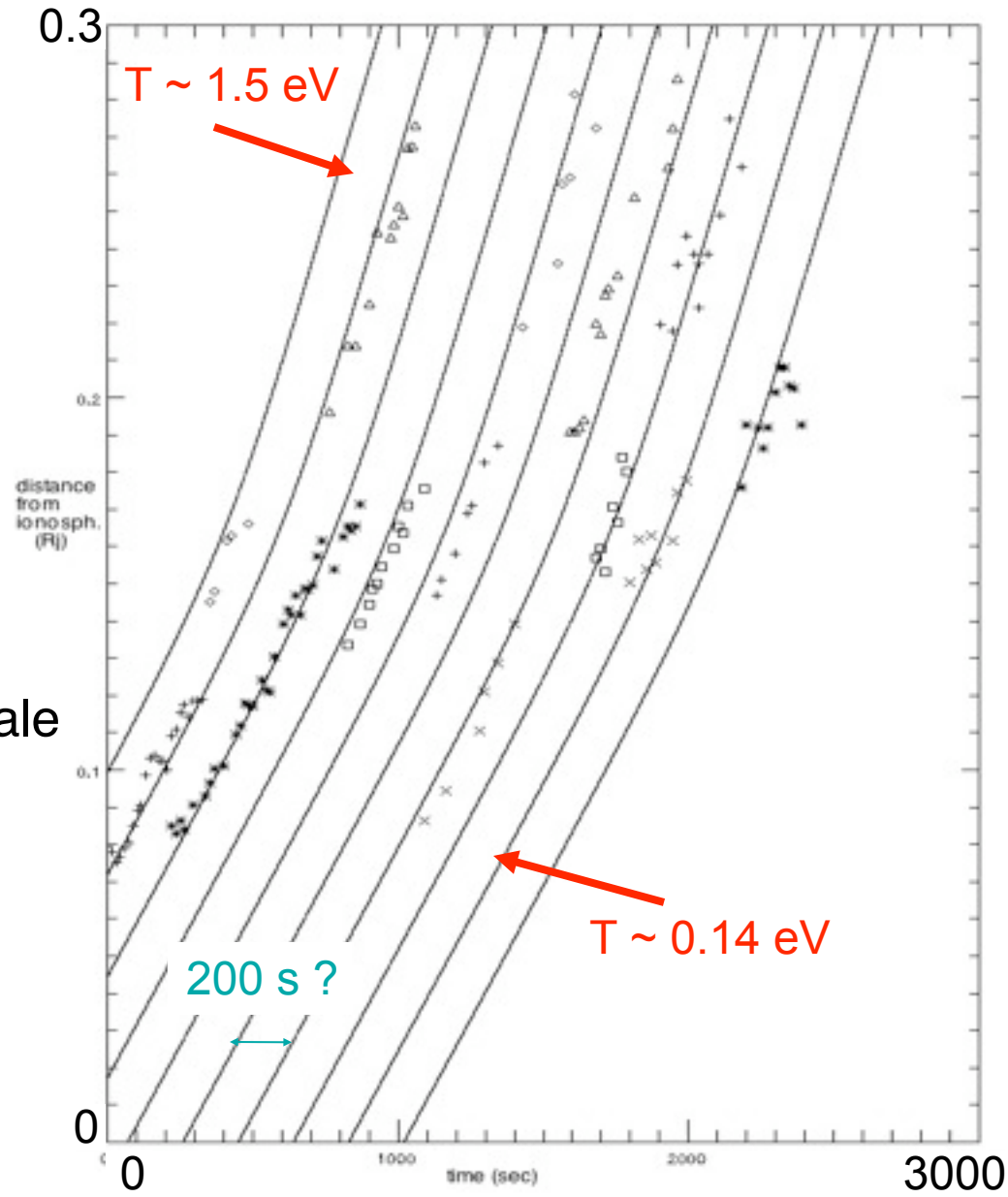
⇒ $V_{DL} \sim 10 \text{ km/s} \ll V_A \sim c$

$$\sim c_s = [k(T_i + T_e)/m_i]^{1/2}$$

avec $T_i = T_e \approx 1000 \text{ K} (0,1 \text{ eV})$

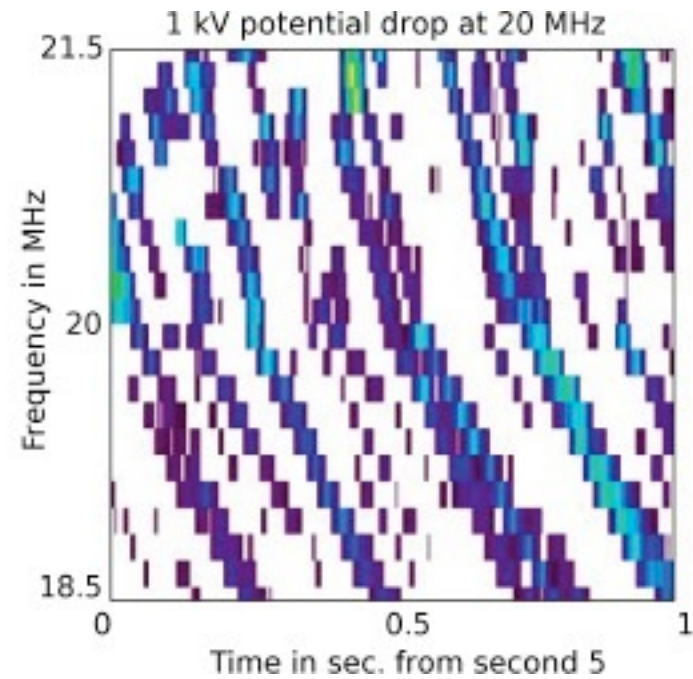
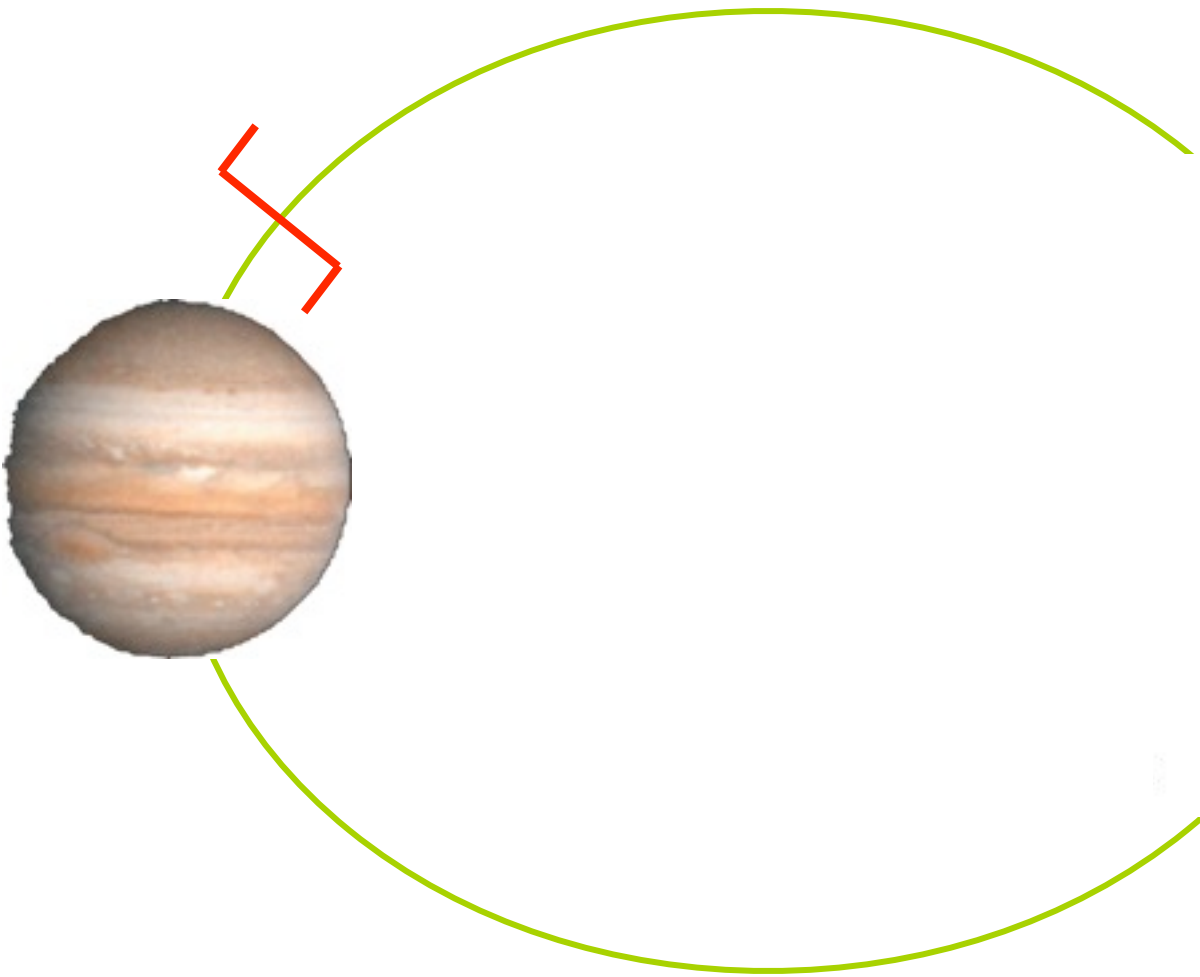
au dessus de l'ionosphère aurorale

[Hess et al., 2008]



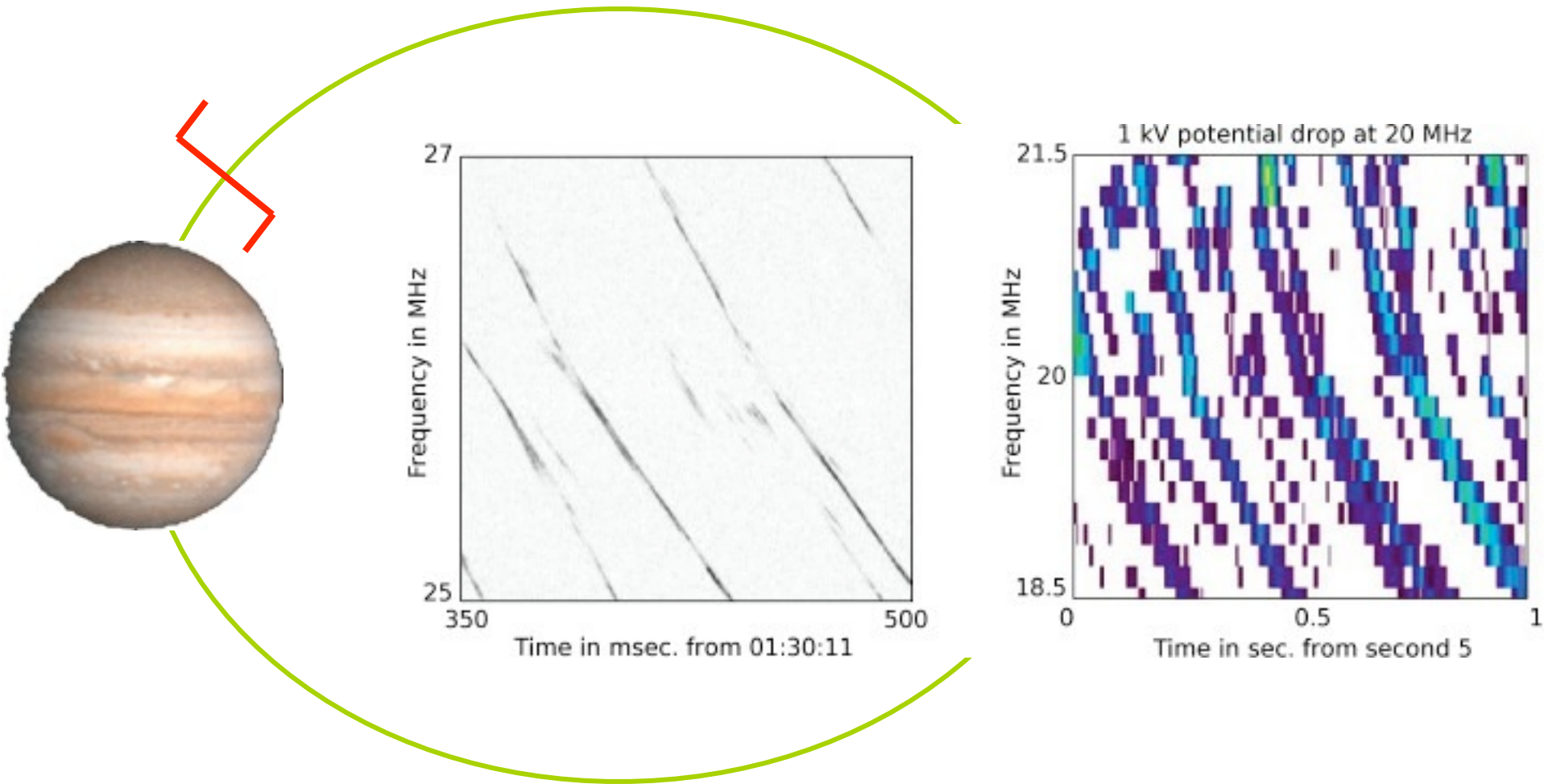
- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives

- Simulation PIC avec ondes d'Alfvén + DL



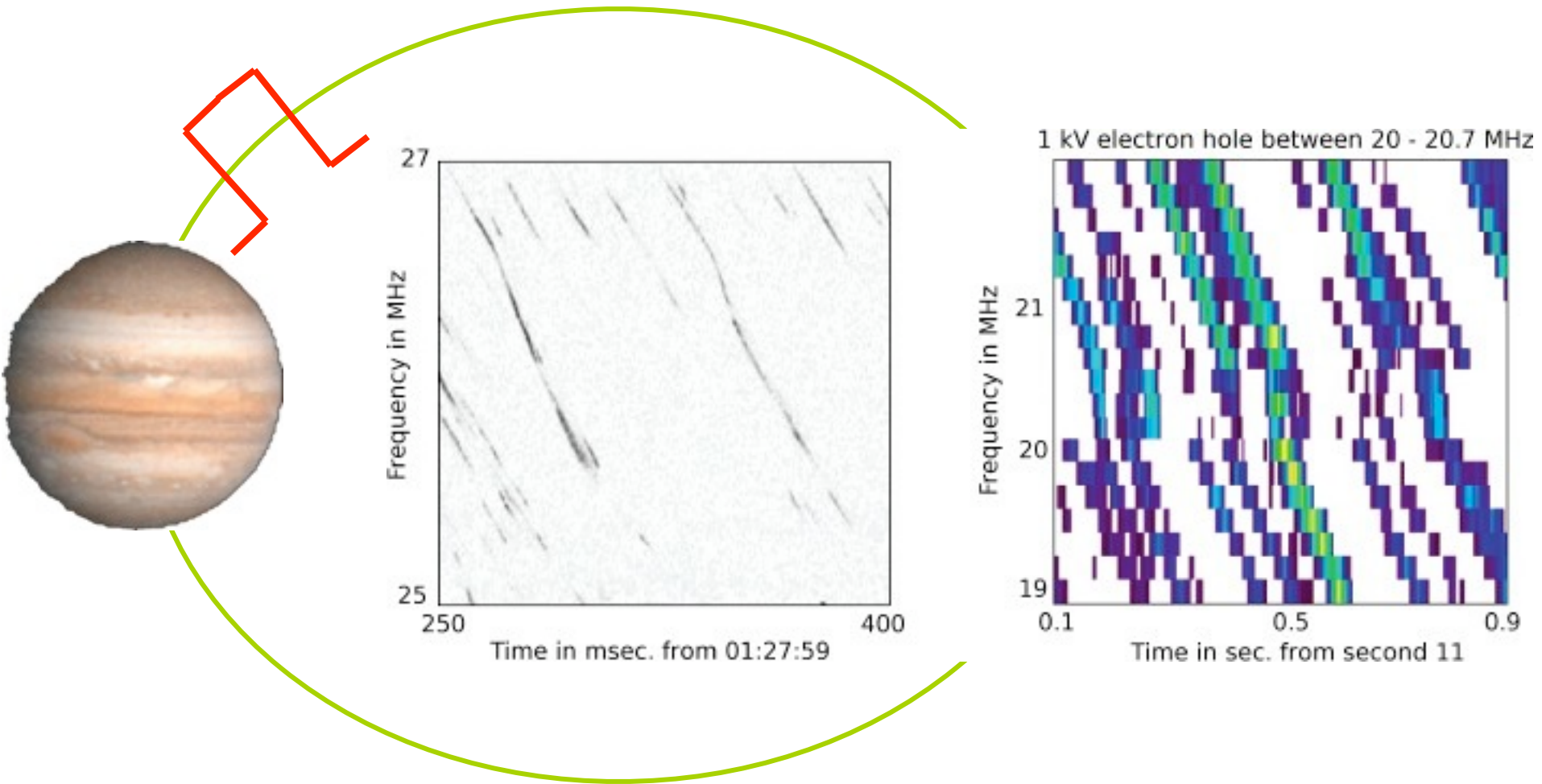
[Hess et al., 2009]

- Simulation PIC avec ondes d'Alfvén + DL



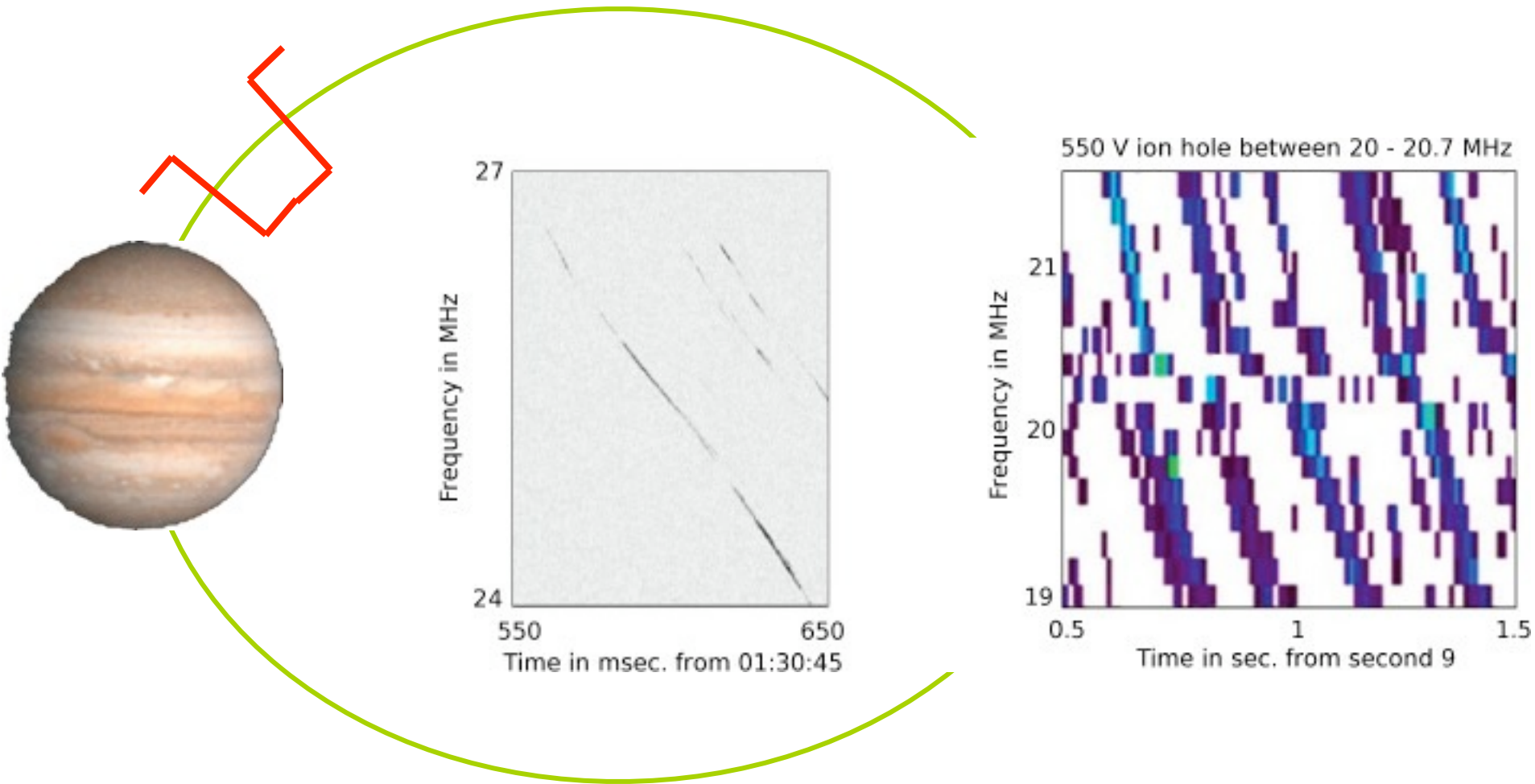
[Hess et al., 2009]

- Simulation PIC avec ondes d'Alfvén + trou d'électrons



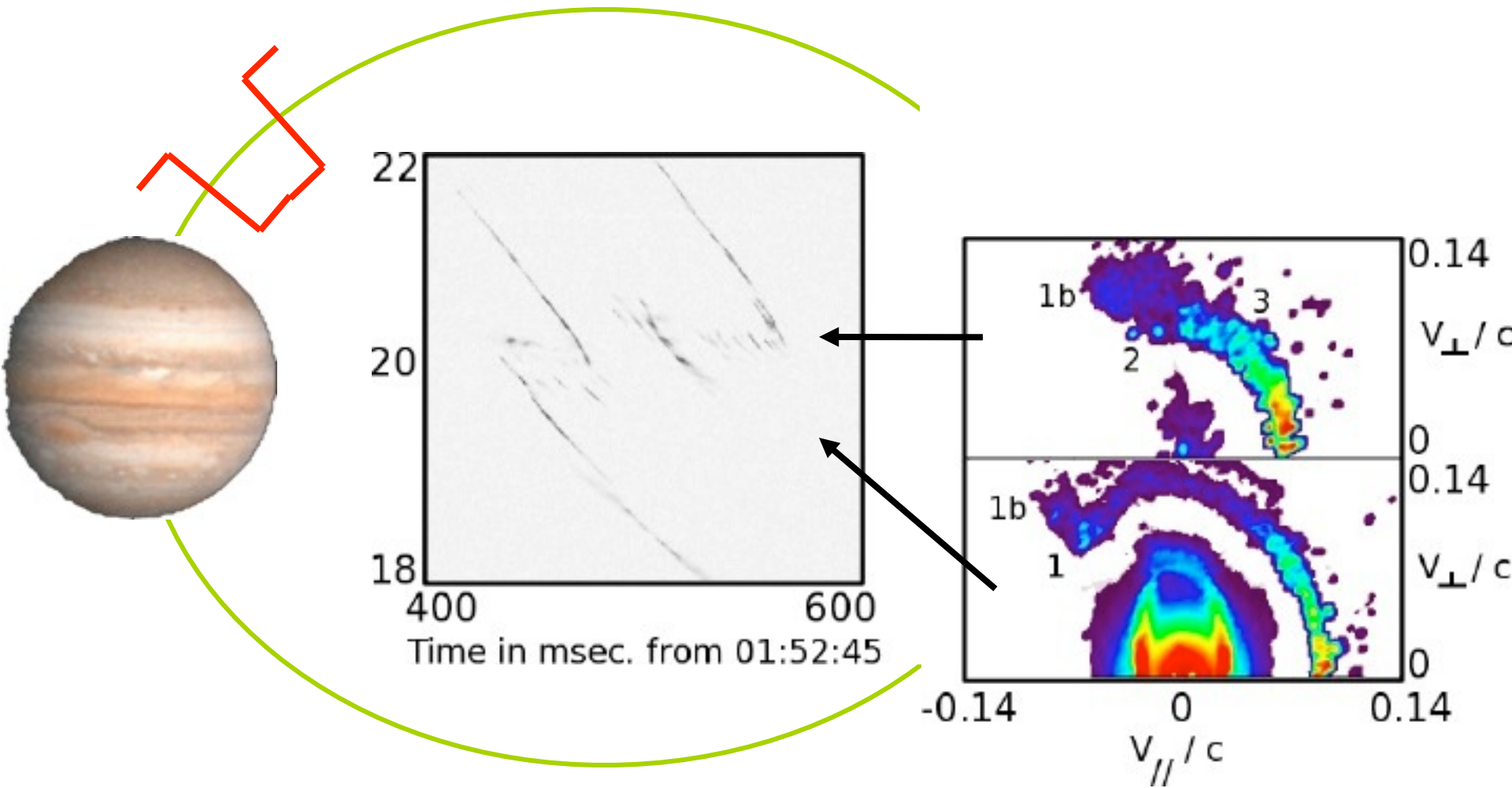
[Hess et al., 2009]

- Simulation PIC avec ondes d'Alfvén + trou d'ions



[Hess et al., 2009]

- Simulation PIC avec ondes d'Alfvén + trou d'ions

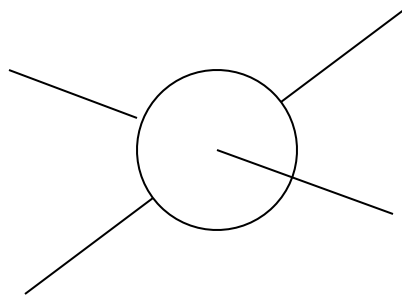


[Hess et al., 2009]

- Pourquoi le tube de flux Io-Jupiter (IFT) ?
- Les sursauts radio « millisecondes » de l'IFT
- Doubles-couches fortes au pied de l'IFT
 - Mise en évidence
 - Stabilité et déplacement
 - Doubles-couches, trous d'ions et d'électrons
- Conclusion & Perspectives



=



permanent et à distance

- Distribution des DLs et trous le long de l'IFT
- Observations sol : Nançay, Kharkov,

LOFAR (cartographie rapide)

- Observations spatiales : JUNO
- Terre (FAST)
- Saturne (Cassini) ? Mercure (BepiColombo) ?

Références

- Hess, S., P. Zarka, and F. Mottez, Io-Jupiter interaction, millisecond bursts and field aligned potentials, Planet. Space Sci., 55, 89-99, 2007a
- Hess, S., F. Mottez, and P. Zarka, Jovian S-bursts generation by Alfvén waves, J. Geophys. Res., 112, A11212, 2007b
- Hess, S., P. Zarka, F. Mottez, and V. B. Ryabov, Electric potential jumps in the Io-Jupiter Flux tube, Planet. Space Sci., in press, 2008
- Hess, S., F. Mottez, and P. Zarka, Signatures of electric potential structures on S-burst radio emission and evidence for ion and electron holes in Jupiter's auroral regions, Geophys. Res. Lett., submitted, 2009