

Interactions « plasma » entre exoplanètes et étoiles parentes

Philippe Zarka
LESIA, Observatoire de Paris/CNRS, Meudon

philippe.zarka@obspm.fr

“Ecole thématique de Physique Stellaire”, Oléron, 6 septembre 2005

- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire

- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)

- [3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique

- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})

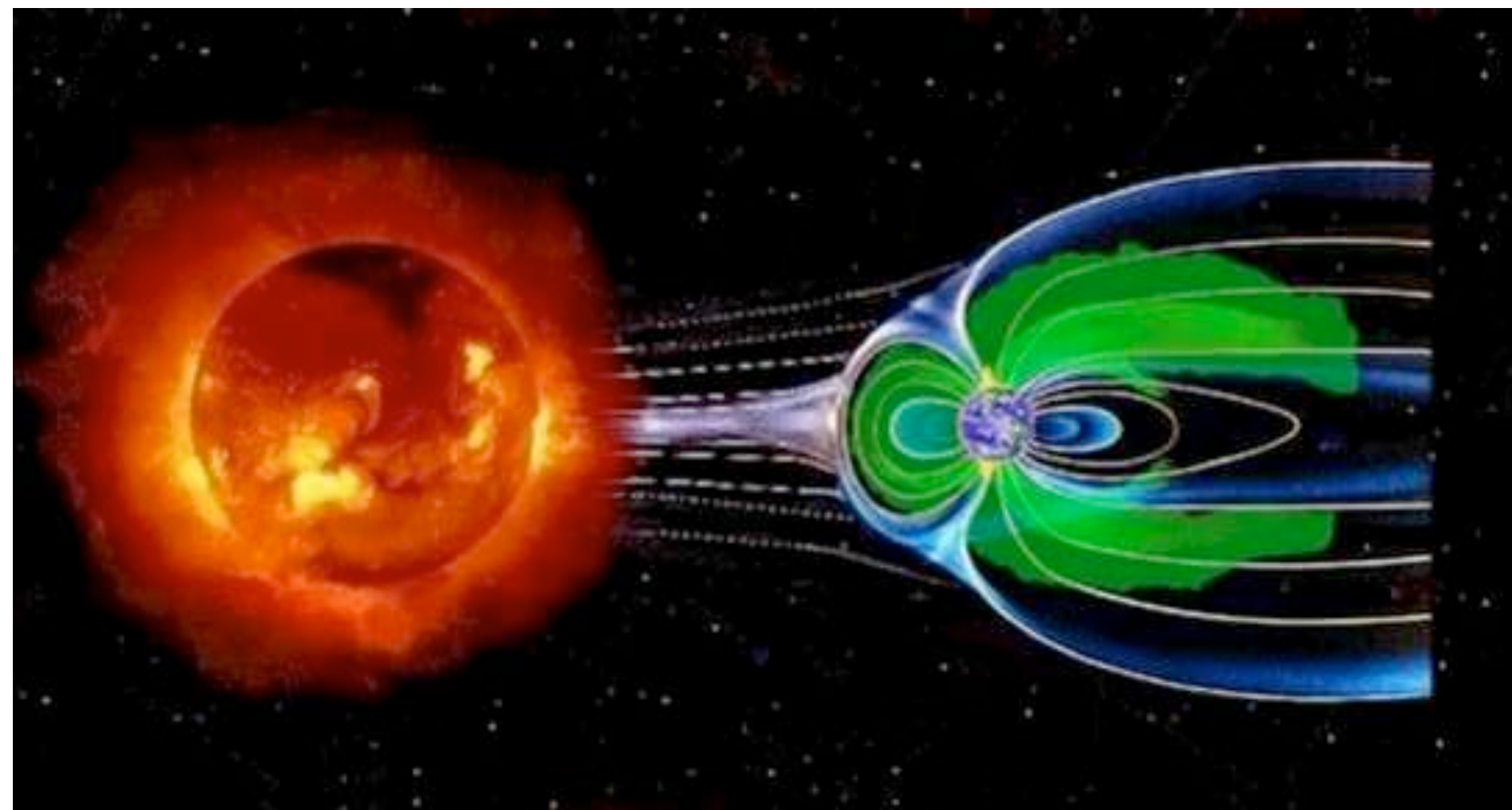
- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire

- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)

- [3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique

- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})



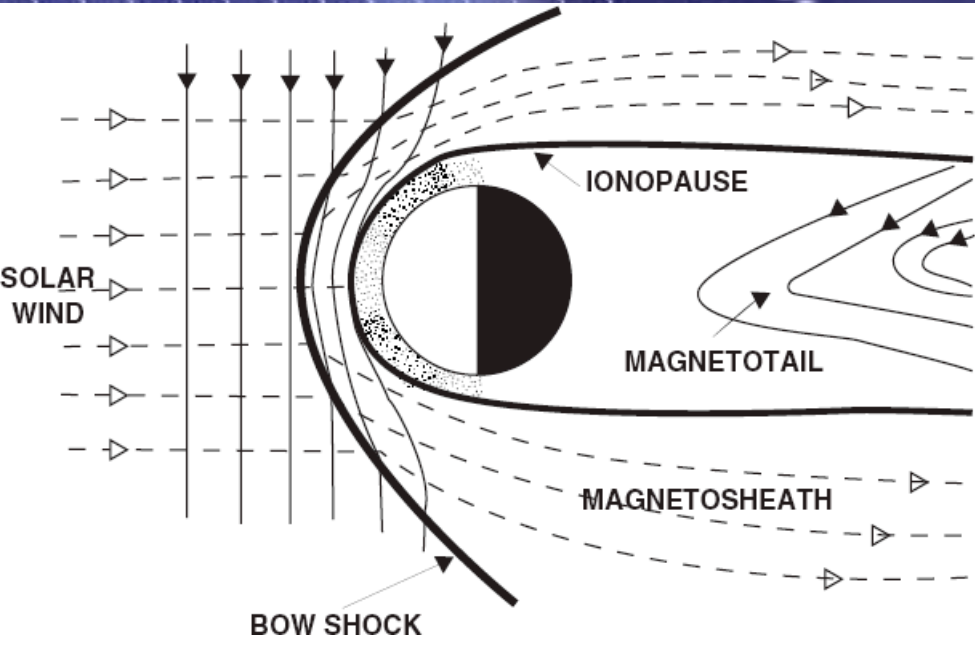
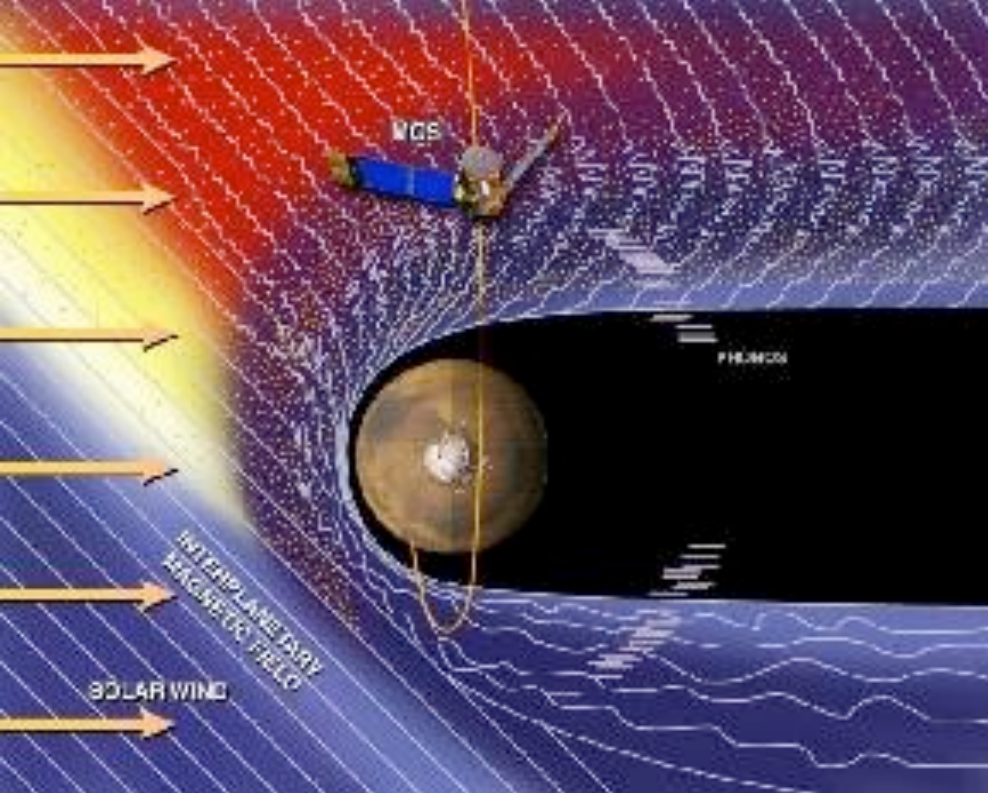
- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire

- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)

- [3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique

- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})



- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire

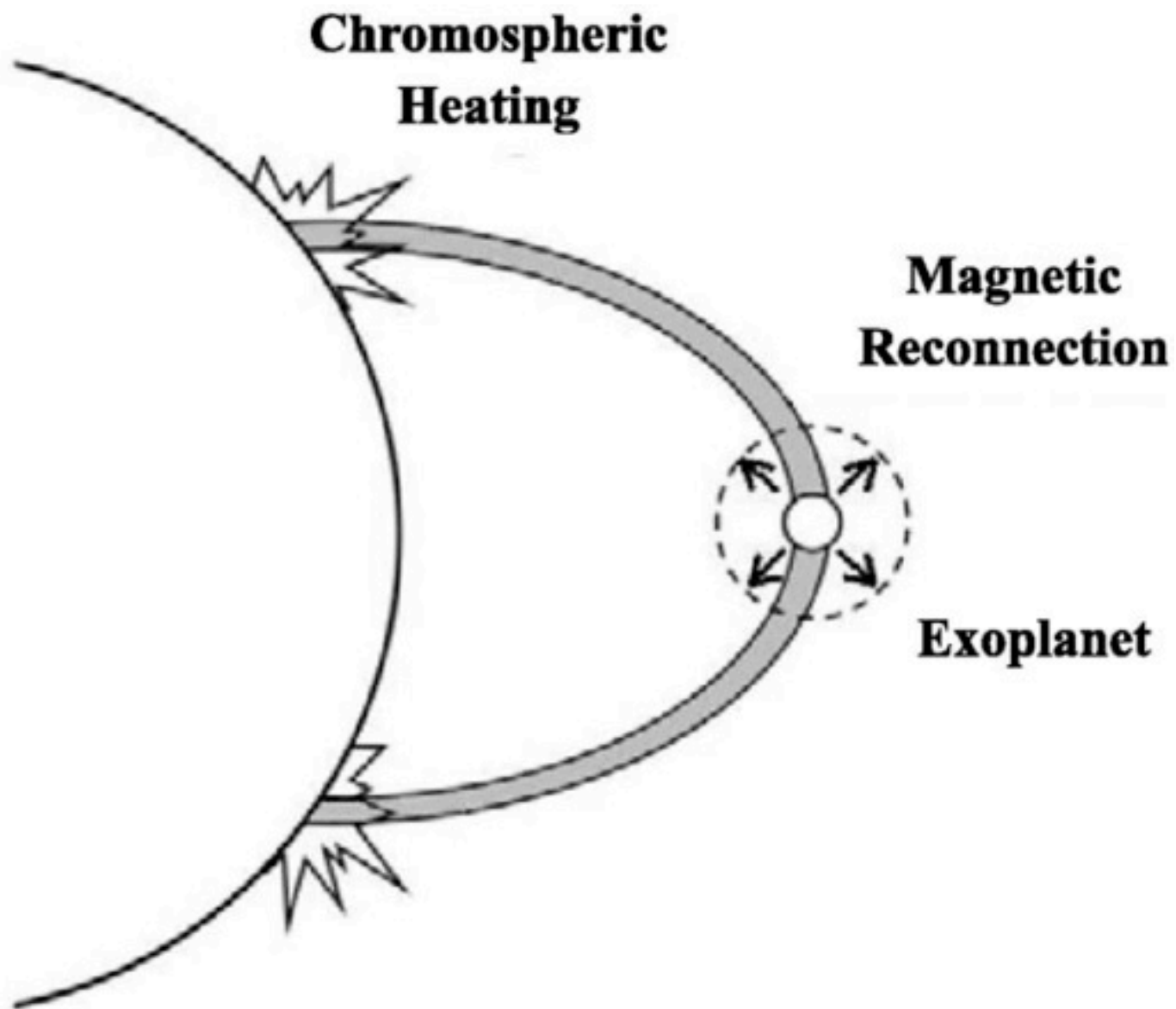
- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)

[3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique

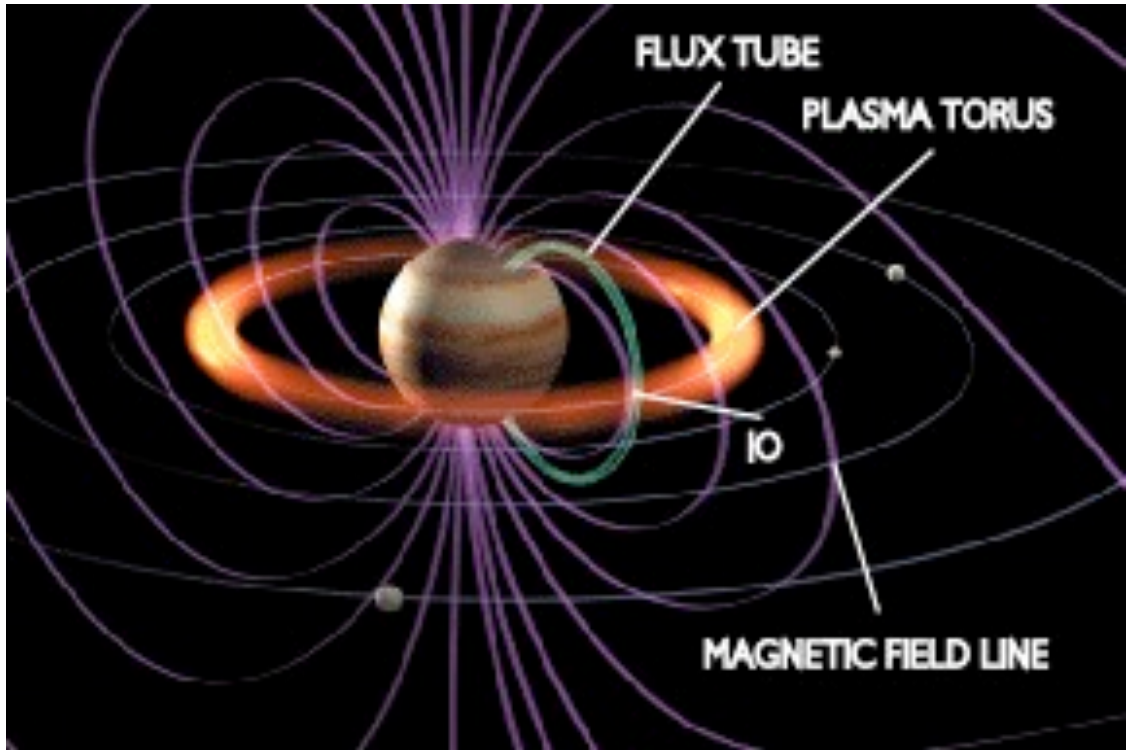
Différencier du cas (1) par le fait que l'énergie magnétique (le β du plasma?) devient prépondérante à la distance d'un HJ → cf. figure de Zarka et al. 2001 aussi ici en dia. 47)

- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})



- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire
- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)
- [3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique
- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire
- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})



- [1] Vent stellaire - Planète magnétisée
→ Magnétosphère planétaire

- (2) Vent stellaire - Planète non magnétisée
→ Empilement de l'IMF sur l'ionosphère (~Mars, Vénus)
→ « pick-up » et érosion atmosphérique (~Comète)

- [3] HJ : B stellaire - B planétaire
→ Reconnection magnétique

- [4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire
→ Inducteur unipolaire

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Chauffage local chromosphérique/coronal
(et accélération de P_{rot^*})

- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

Gel B/plasma

Loi d'Ampère $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + 1/c^2 \partial \mathbf{E} / \partial t$ [1]

Loi d'Ohm $\mathbf{j} \approx \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ [2]

Absence de charge magnétique $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ [3]

Loi de Faraday (induction) $\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$ [4]

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

$$\Rightarrow (1/\mu_0 \sigma) \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla \times \mathbf{E} + \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad \text{avec [3] et [4]}$$

$$\Rightarrow -\eta \nabla^2 \mathbf{B} = -\partial \mathbf{B} / \partial t - \mathbf{B} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \quad \eta = (1/\mu_0 \sigma) = \text{diffusivité magnétique}$$

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

diffusion convection

$\sigma \gg$ dans un plasma sans collision (donc η très petit), et $\nabla \sim 1/L$,

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

- seule variation de B = convection par/avec le plasma (gel)
- seuls champs électriques = liés à la convection $\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ du plasma
- quasi-neutralité du plasma au repos ($\mathbf{V}=0 \Rightarrow \mathbf{E}=0$)
- lignes de \mathbf{B} = équipotentiellles électriques ($\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}=0$).

NB: - pour un plasma complètement ionisé, $\sigma \sim 10^{-2} T^{3/2}$

- temps caractéristique de diffusion B / plasma (hors convection) déduit de :

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

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

[1] Vent stellaire - Planète magnétisée → Magnétosphère planétaire

Frontière = Magnétopause :

$$p(VS) = p(MS) \rightarrow \underbrace{B_1^2/2\mu_0}_{\text{IMF}} + \underbrace{2\rho_1 V_1^2}_{\text{RAM}} = \underbrace{B_2^2/2\mu_0}_{\text{magnetic}} + \underbrace{N_2 kT_2}_{\text{plasma}}$$

avec $\rho_1 \sim N_1 m_p$

$$B_2(\text{MP}) = B_2(\text{dipole}) + B_2(\text{courants MP}) = 2 B_2(\text{dipole})$$

$$B_2(\text{dipole}) = B_P (1+3\cos^2\theta)^{1/2} / (r/R_P)^3$$

$$B_P = (\mu_0/4\pi) \mathcal{M}_P / R_P^3$$

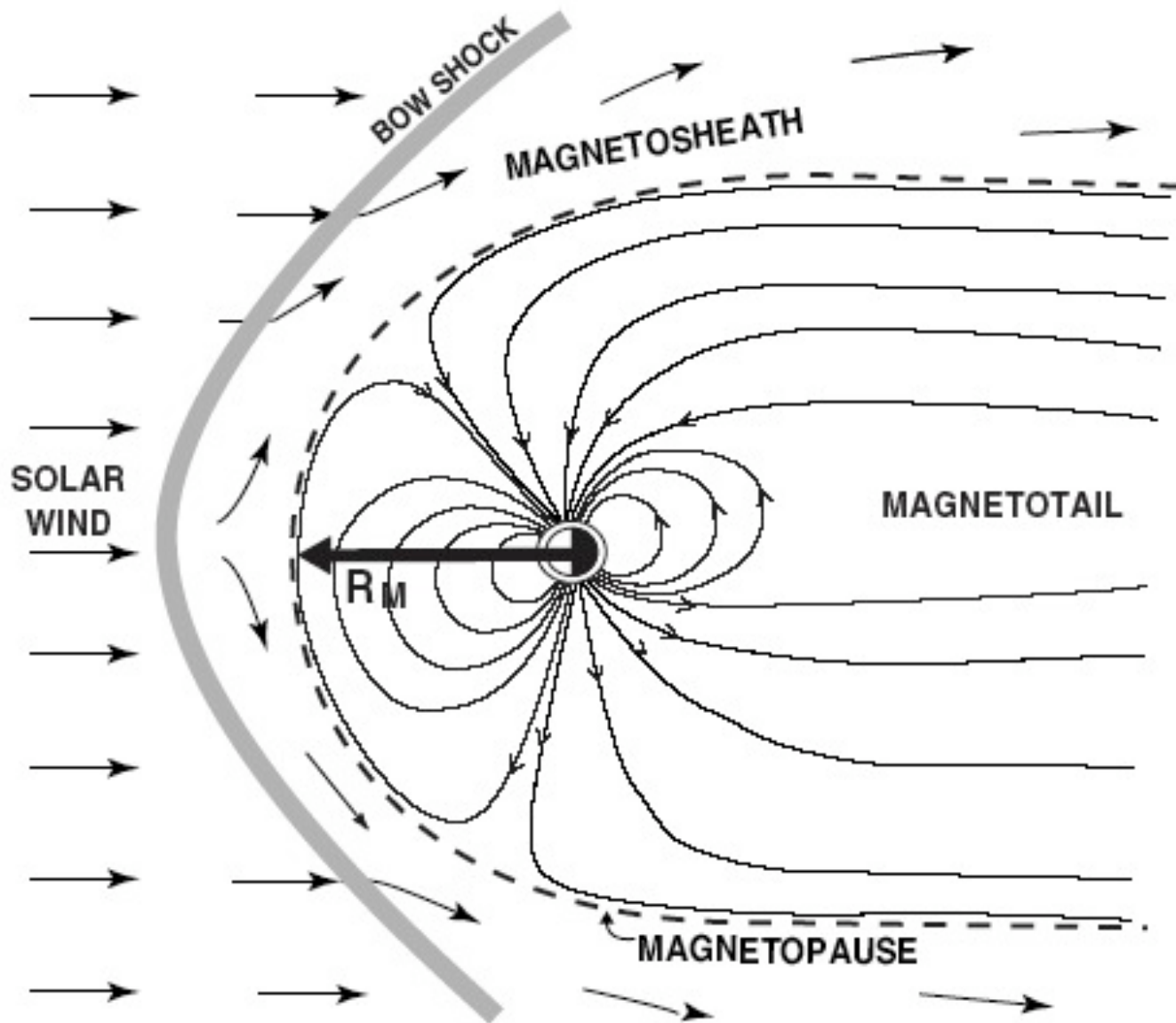
$$\rightarrow R_{\text{MP}} = R_P (B_P^2 / \mu_0 N_1 m_p V_1^2)^{1/6}$$

En amont, $V_1 \sim 400 \text{ km/s} \gg V_S, V_A$

$$V_{S0} = (\gamma P / \rho)^{1/2} = (\gamma kT / m)^{1/2} \sim 50\text{-}60 \text{ km/s à l'orbite terrestre}$$

$$V_{A0} = B / (\rho \mu_0)^{1/2} \sim 40 \text{ km/s}, V_A \sim V_{A0} (1/2 + 1/(2d^2))^{1/2}$$

→ choc stationnaire



Puissance interceptée/dissipée :

$$P_d \sim \left(\frac{1}{2} N_1 m_p V_1^3 + B_1^2 V_1 / 2\mu_0 \right) \pi R_{MP}^2$$

- empilement magnétique + reconnection, ondes ...
- particules accélérées précipitantes (efficacité de conversion ?)
- émissions e.m. (aurores IR, UV, optiques, radio)

Pas de calcul direct complet à partir de la microphysique, mais lois d'échelles dans le système solaire

[3] HJ : B stellaire - B planétaire → Reconnection magnétique ?

Flux de Poynting du VS :

$$S = E \times B / \mu_0 \rightarrow S_r = V B_{\perp}^2 / \mu_0$$

(Preusse et al., 2004 ; Ip et al., 2004)

Puissance transmise à la magnétosphère :

$$P_d \sim \varepsilon V B_{\perp}^2 \pi R_{MP}^2 / \mu_0 = 2\varepsilon (B_{\perp}^2 / 2\mu_0) V \pi R_{MP}^2$$

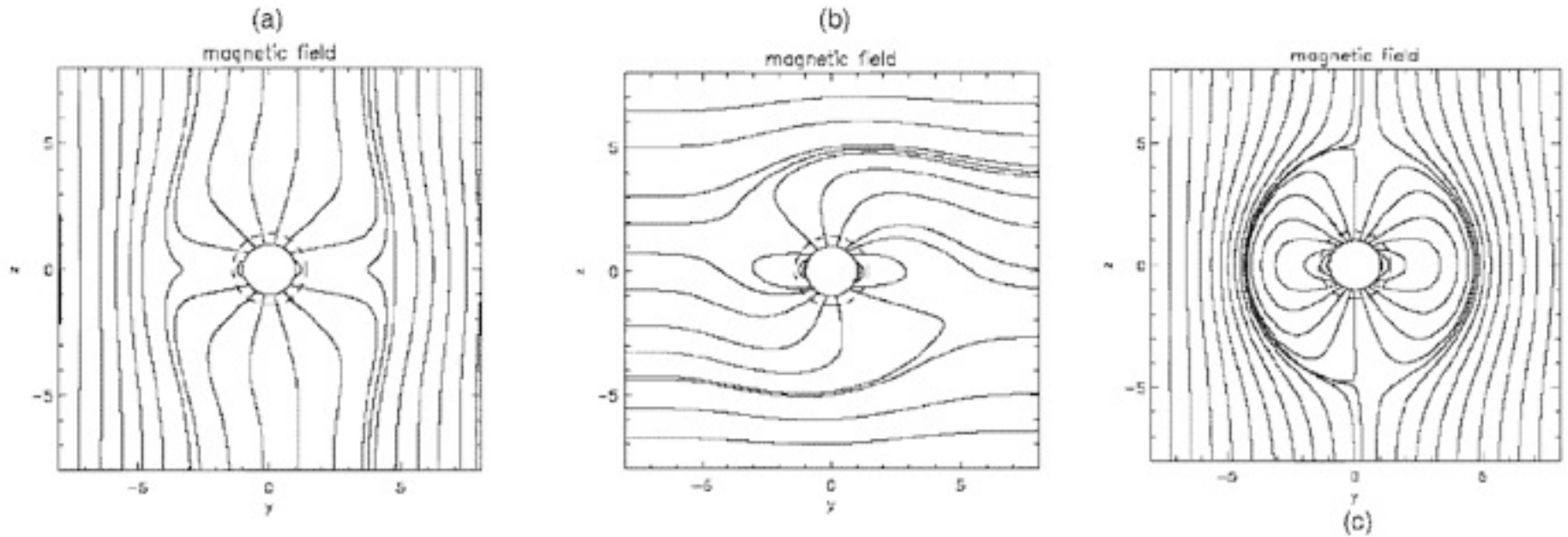
HJ : Puissance magnétique dissipée par reconnection (analogie avec RSCVNs) :

$$P_d \propto B_*(r_{int}) B_P(r_{int}) V_{rel} \propto B_*/(d-R_{MP})^2 \times B_P/(R_{MP}/R_P)^{2-3} \times V_{rel} \\ \propto (B_*/d^2) \times B_P^{0...1/3} (N_1 m_p V_1^2)^{1/2...1/3} \times (V_{mac}^2/2 + (V_{orb} R_*/d - V_{rot*})^2)^{1/2}$$

(Cuntz et al., 2000 ; Saar et al., 2004)

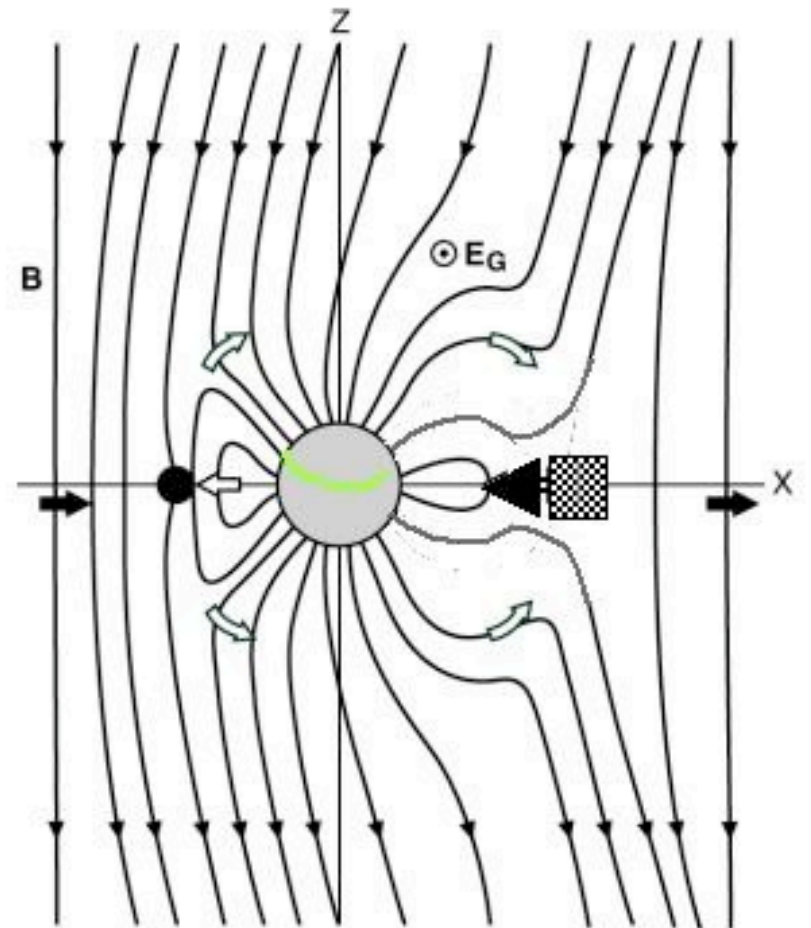
Topologie magnétique variable selon B_* : MS ouverte (a), fermée (c),
 B_* radial (b)

(Ip et al., 2004)



(a) = interaction Ganymède-Jupiter
(Kivelson et al., 1996)

$2 R_G$



➔ Torus Plasma Flow

➤ Ganymede's Magnetospheric Flow

● Upstream Reconnection Line

▨ Downstream Reconnection Line

— open-closed boundary

[4] HJ : B stellaire - Ionosphère planétaire → Inducteur unipolaire

ddp à travers l'obstacle : $\phi = E \times 2R_p = V_{rel} B_*(d) \times 2R_p$

e.g. avec B_* dipolaire et $V=V_{orb}$

$$\rightarrow \phi = (GM)^{-2/3} (2\pi/P_{orb})^{7/3} \times (\mu_0 M_*/4\pi) \times 2R_p$$

(Wu et al., 2002)

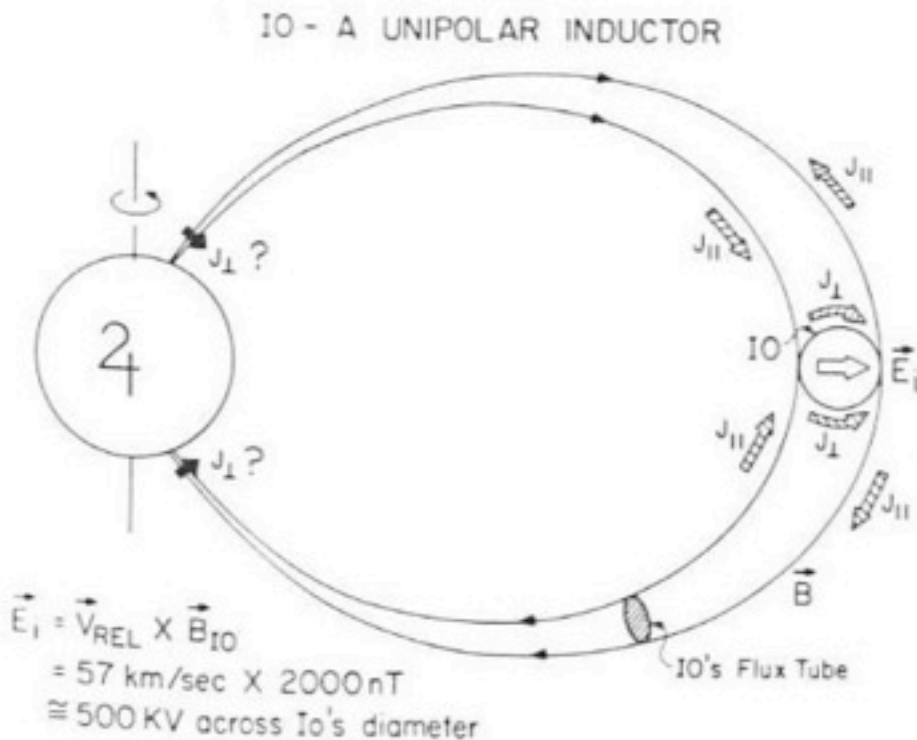
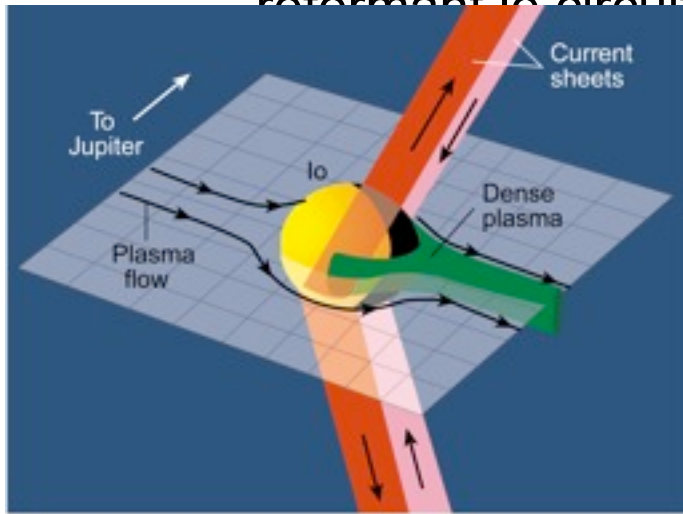


Fig. 1.13. Io as a unipolar inductor. Schematic representation of the induced current system flowing approximately parallel to the field lines in the flux tube linking Io to the Jovian ionosphere/atmosphere. The circuit is closed at the extremes by currents flowing in the Jovian ionosphere and in the ionosphere and/or interior of Io. A power of approximately 10^{12} W is dissipated in the system.

• Puissance dissipée ? Calcul dans le cas de l'interaction Io-Jupiter

→ Voyager : $P_d = I \times U = 2-3 \cdot 10^6 \times 2 R_{Io} E$
 avec $E = V \times B_J$

→ MHD non linéaire : Existence de j_{\perp} dans les ailes d'Alfvén, reformant le circuit indépendamment de l'ionosphère Jovienne



$P_d = \pi R_{Io}^2 E^2 \Sigma_a$ avec
 $\Sigma_a = M_a / \mu_0 V (1 + M_a^2)^{1/2}$ (Neubauer, 1980)

($M_a \sim 0.15-0.3$, pas de choc)

→ Flux d'énergie magnétique sur l'obstacle :

$P_d = 2 / (1 + M_a^{-2})^{1/2} B_J^2 / 2 \mu_0 V \pi R_{Io}^2$

$P_d \approx B_J^2 / 2 \mu_0 V \pi R_{Io}^2$ (Zarka et al., 2001)

(5) HJ : Interaction de marée

$$g_*(R_*) = GM_*/R_*^2$$

$$g_P(d) = GM_P/d^2 \quad \Delta g_P(R_*) = \Delta g_* = 2GM_P R_*/(d-R_*)^3$$

$$\Delta g_*/g_* = 2M_P R_*^3/M_*(d-R_*)^3 \sim 2 (M_P/M_*) (R_*^3/d^3)$$

$$N = N_0 e^{-z/H} \quad \text{avec} \quad H = kT/mg \quad \rightarrow h_{\text{tide}} = \Delta z$$

$$\Delta z/z = -\Delta H/H = \Delta g_*/g_* = h_{\text{tide}}/R_*$$

Amplitude de l'interaction de marée caractérisée par
 $h_{\text{tide}}/H \sim (R_*/H) (\Delta g_*/g_*) \sim 10^3 \Delta g_*/g_*$

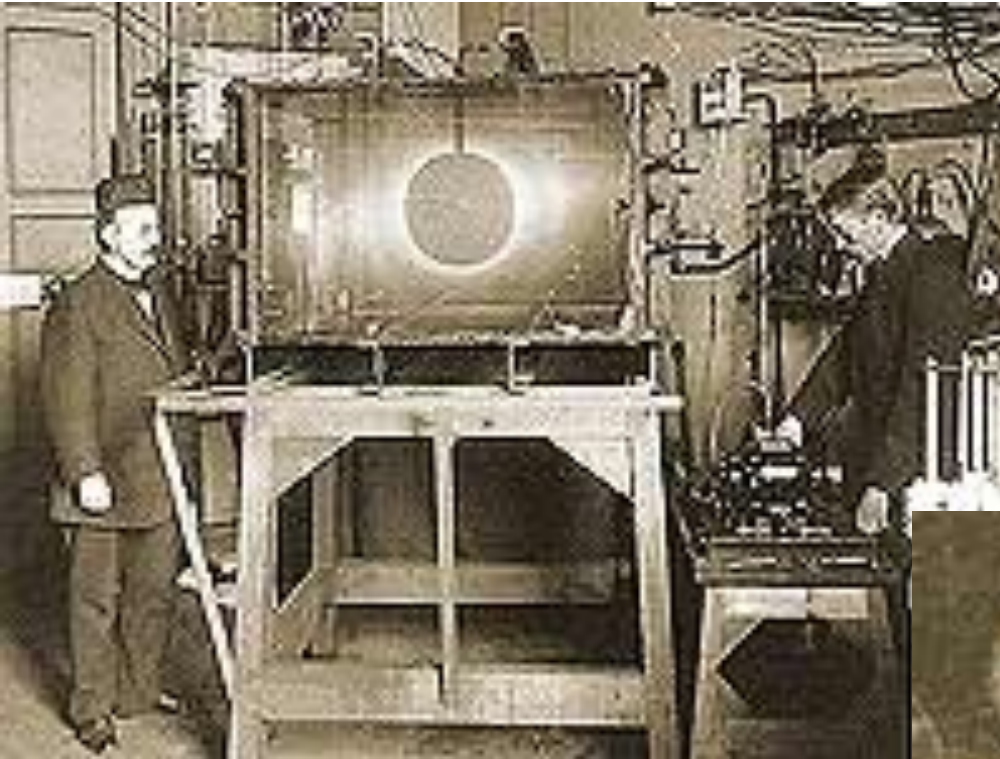
(Cuntz et al., 2000)

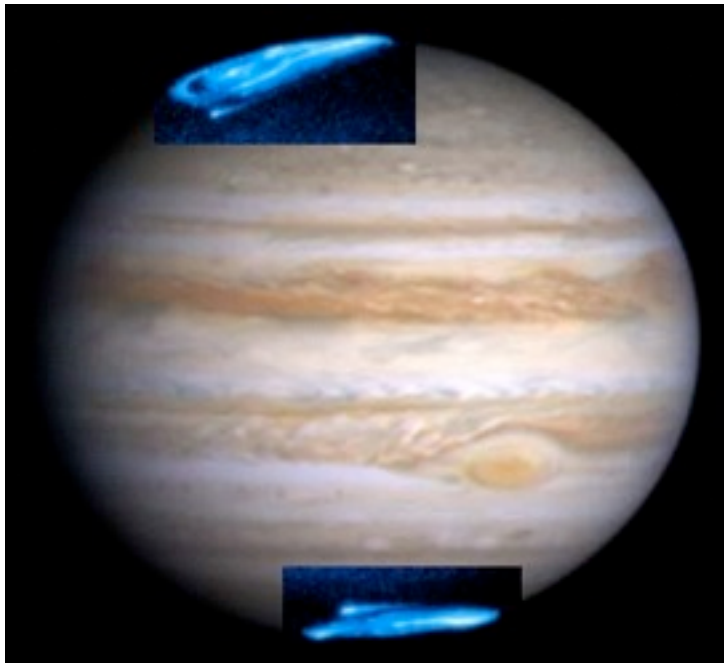
- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

Bombardement d'une atmosphère par particules chargées :

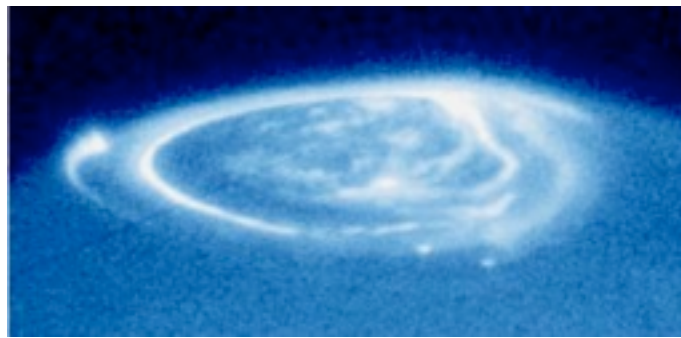
- étoile : chauffage chromosphérique/coronal, flares
→ émission IR/Optique (Ca), UV, X, radio (f_{pe}) [3,4,5]
- planète : aurores UV (H_2 & Ly- α , excitation collisionnelle), IR (H_3^+ , chauffage), radio (f_{ce} , faisceau d'électrons descendant/réfléchi) [1,3,4]

[1] émissions aurales des magnétosphères planétaires
(y compris interactions satellite-planète)



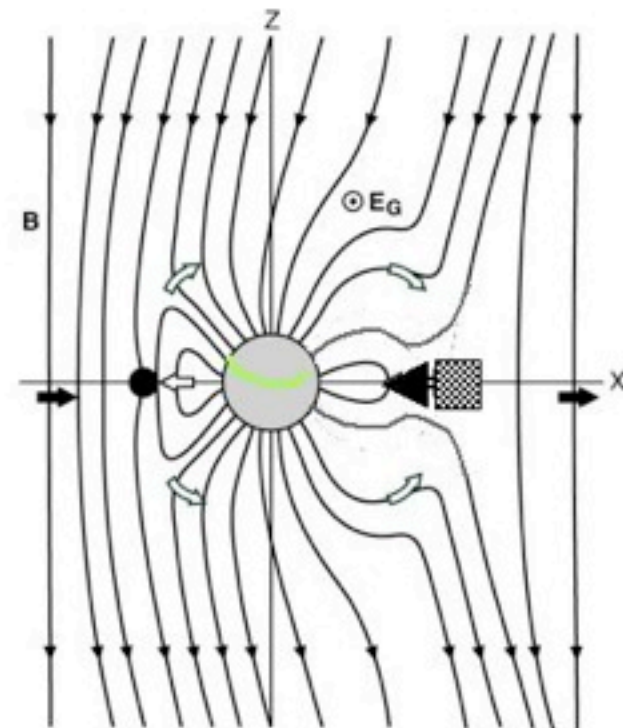
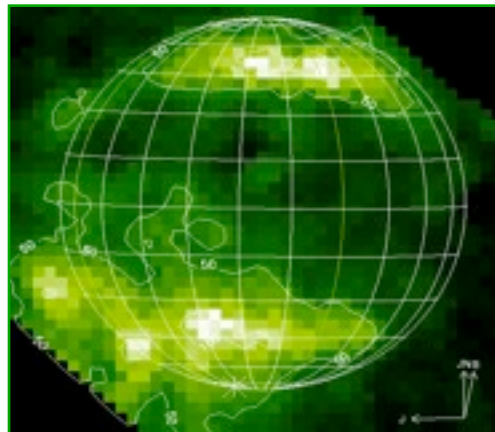


Aurores UV de Jupiter



Atomic oxygen auroral emission

Aurores de Ganymède



- ➔ Torus Plasma Flow
- ↪ Ganymede's Magnetospheric Flow
- Upstream Reconnection Line
- ▣ Downstream Reconnection Line

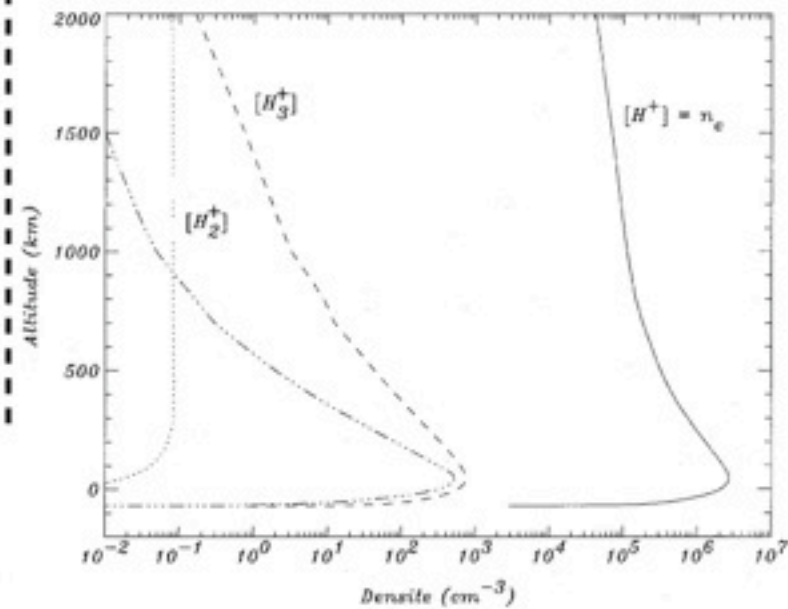
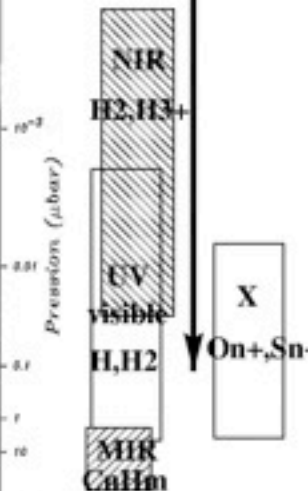
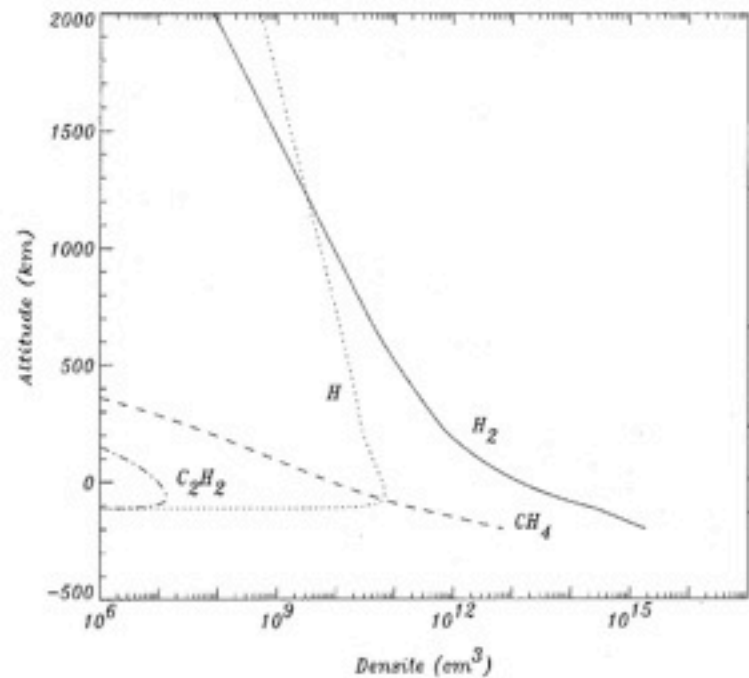
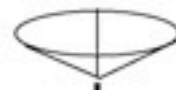
— open-closed boundary

Faisceau incident
 Particules chargées énergétiques (100 eV - qques MeV)
 électrons, protons, ions (O,S)

Faisceau réfléchi
 Emissions radio (DAM, HOM, bKOM)
 (uniquement si électrons)

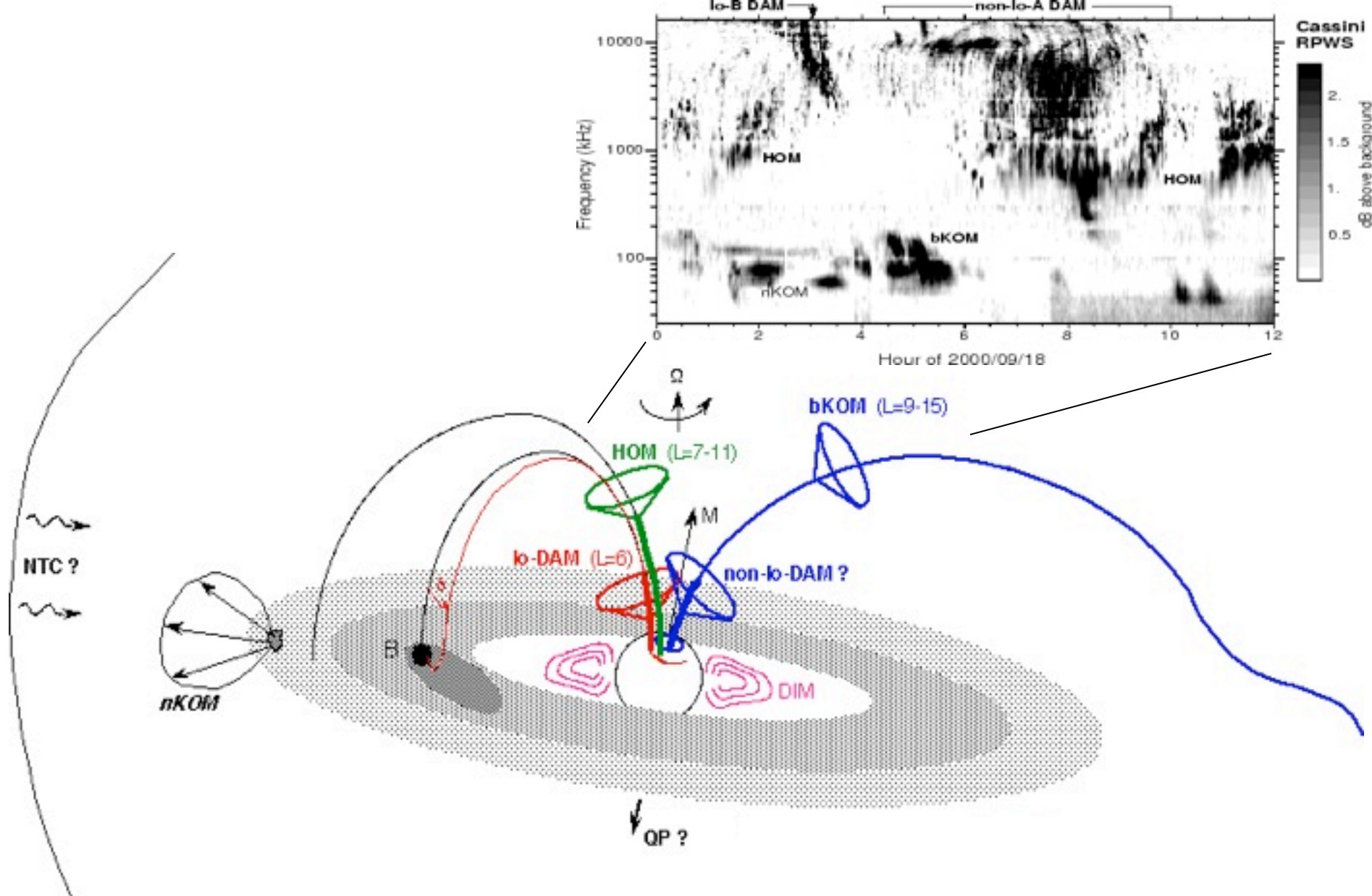
Emissions
 de
 l'atmosphère

Emissions
 du
 faisceau



Jupiter

(Prangé, 2002)



- Aurores UV, IR → observations limitées
- Emissions radio aurorales → observations continues de longue durée

- Propriétés des émissions radio aurorales :

→ $f \sim f_{ce}$

→ $\Delta f \sim f$

→ $S \gg (T_B \sim 10^{15-20} \text{ K})$

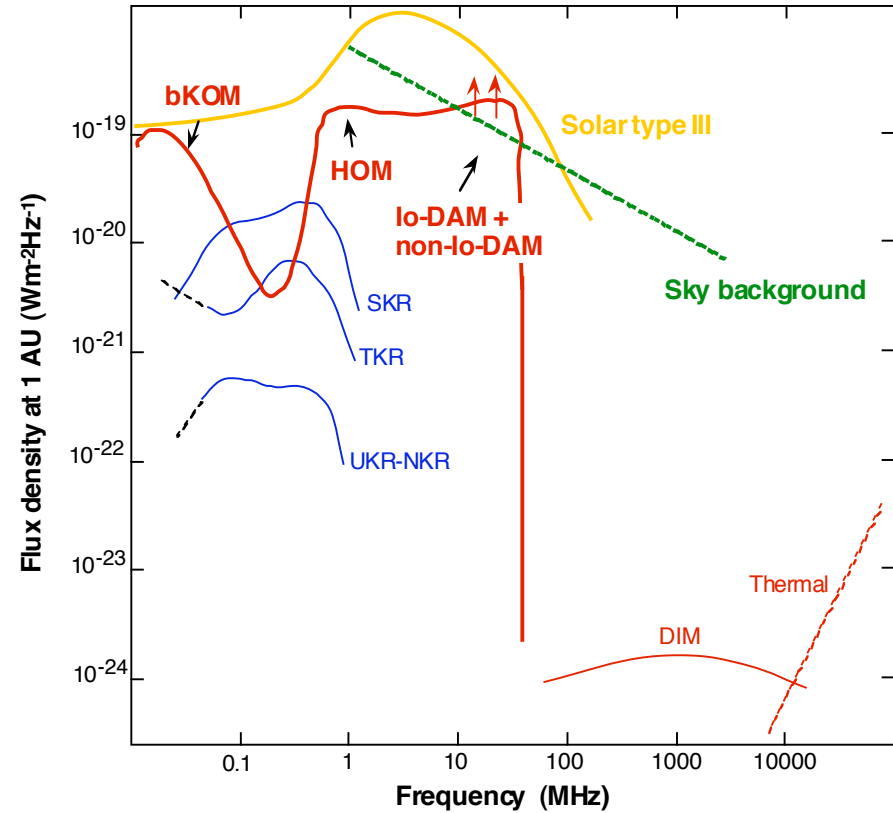
→ mode X, polarisation circ./elliptique

→ directivité très anisotrope (Ω)

→ variabilité /t

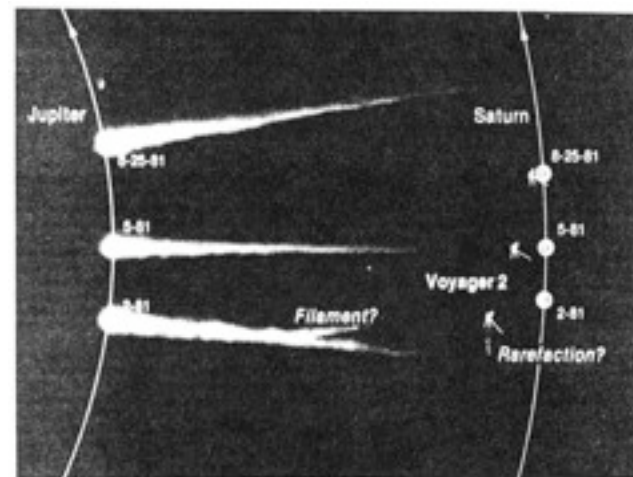
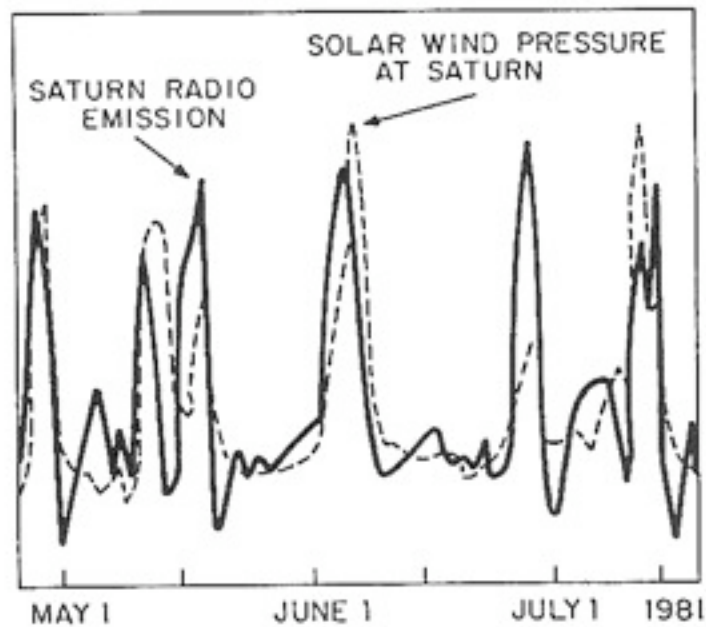
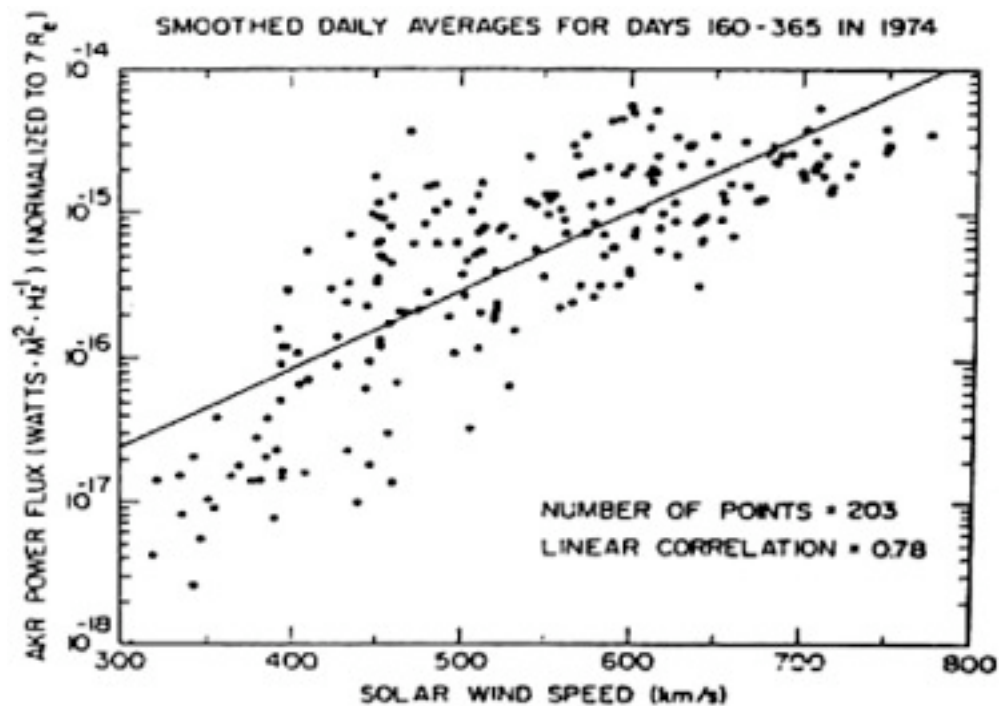
(sursauts, rotation...)

→ corrélation radio / UV



→ Puissance totale émise : $P_r = 2S\Omega R^2\Delta f = 10^{7-11} \text{ W}$

- « Contrôle » des émissions aurorales par le vent solaire (pression, vitesse...)



• Théorie : Instabilité Maser-cyclotron

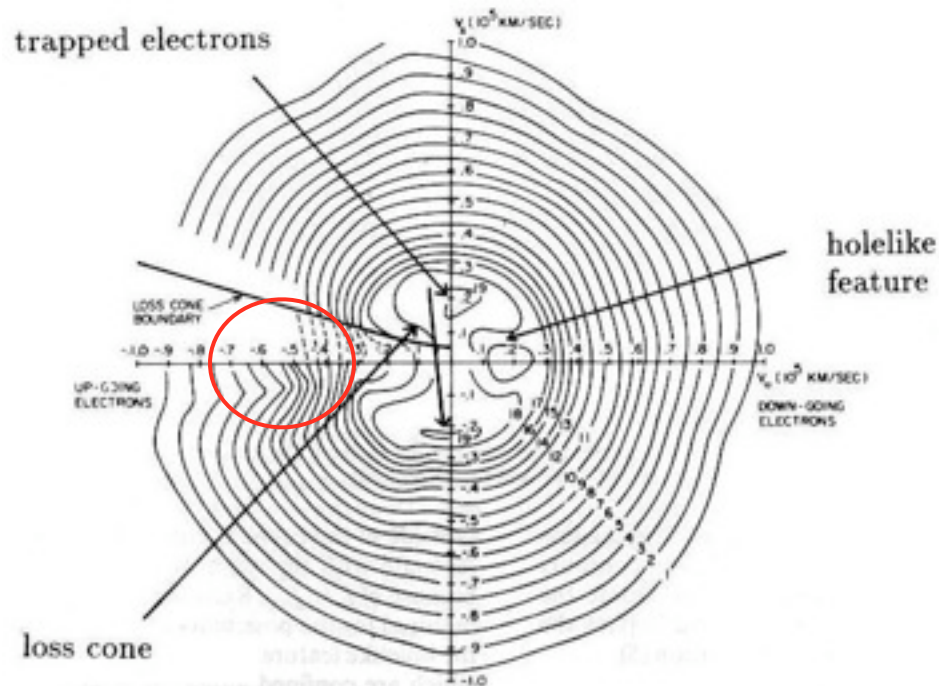
→ plasma magnétisé à faible β ($f_{pe} \ll f_{ce}$) + électrons énergétiques (keV)

→ régions de hautes latitudes magnétiques

→ émission directe de mode X à $f \sim f_x \approx f_{ce}(1+\varepsilon)$ avec $\varepsilon = (f_{pe}/f_{ce})^2$

aux dépens de $m_e v_{\perp}^2/2$

→ taux de croissance : $\text{Im}(\omega) = \gamma \propto \iint v_{\perp}^2 \frac{\partial f}{\partial v_{\perp}} \delta(\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} - n\omega_{ce} / \Gamma) dv_{\parallel} dv_{\perp}$

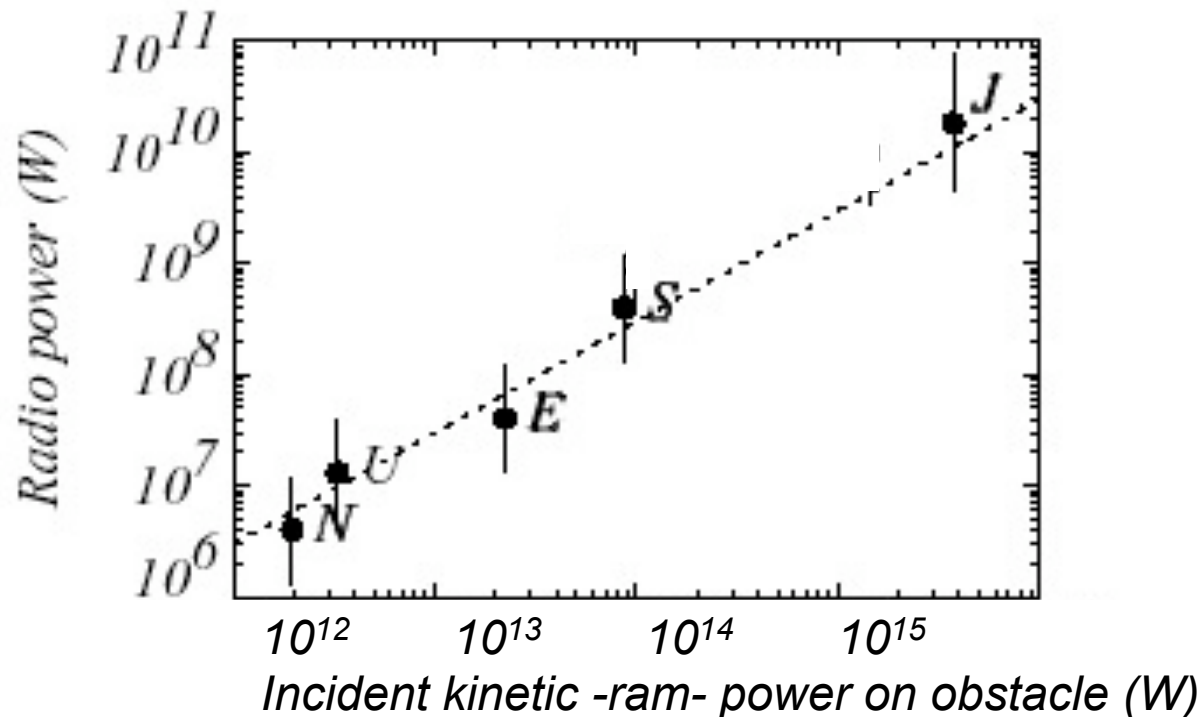


- Loi de Bode Radio cinétique :

$$P_{\text{radio}} = \alpha P_d = \alpha \left(\frac{1}{2} N_1 m_p V_1^2 \right) V_1 \pi R_{\text{MP}}^2 \quad \text{with} \quad N_1 \sim N_o/d^2$$

$$\rightarrow P_{\text{radio}} \propto M_P^{2/3} d^{-4/3} N_o^{2/3} V_1^{7/3}$$

(Desch & Kaiser, 1984; Zarka, 1992)

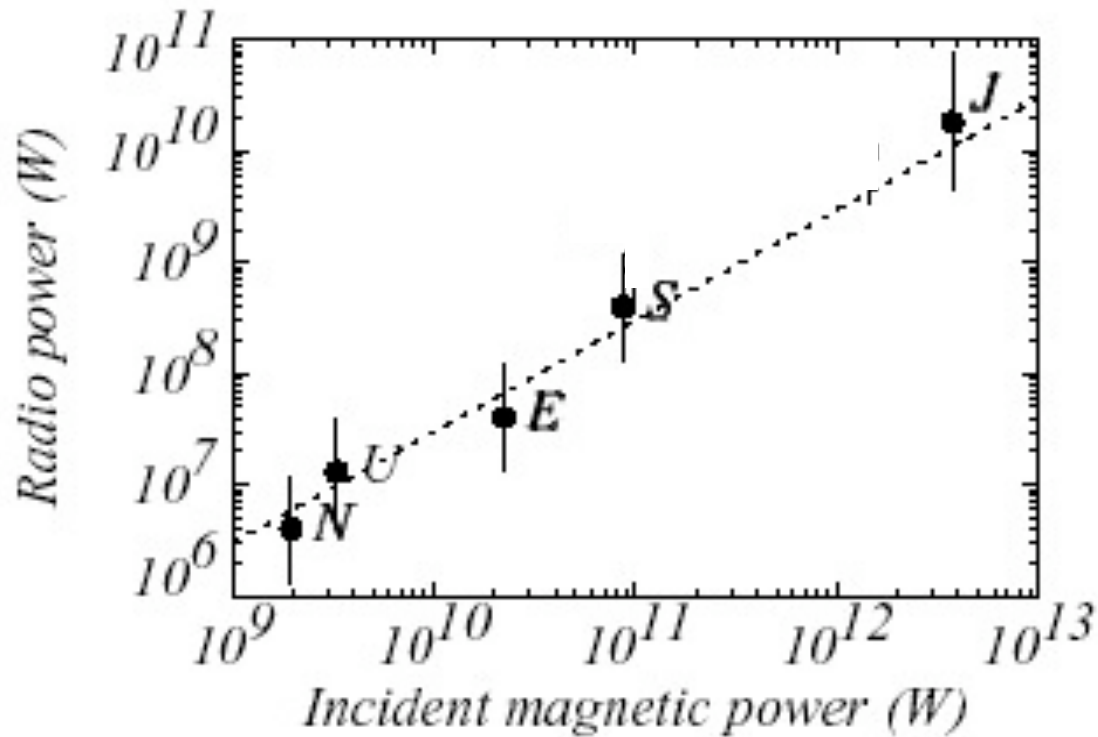


\rightarrow corrélation >99%, pente ~ 1 , $\alpha \sim 7 \times 10^{-6}$

- Loi de Bode Radio magnétique :

$$P_{\text{radio}} = \beta P_d = \beta (B_1^2/2\mu_0) V_1 \pi R_{\text{MP}}^2$$

(Zarka et al., 2001)



→ corrélation >99%, pente ~ 1 , $\beta \sim 3 \times 10^{-3}$

[3,4] Interactions satellite-Jupiter :

$$P_d \approx B_J^2 / 2\mu_0 V \pi R_{\text{obs}}^2 \quad \text{avec} \quad B_J = M_J / L^3 \quad (= B_{\perp})$$

$$V = \Omega_J L R_J$$

	L (R _J)	B _J (G)	V (km/s)	R _{obs} (km)	P _d (W)	P _{radio} (W)	P _{UV} (W)
Io	5.9	0.02	74	1821*1.1	1.5 10 ¹²	~10 ¹⁰	2-10×10 ¹⁰
Europe	9.4	0.005	118	1561	9 10 ¹⁰	?	10 ⁹⁻¹⁰
Ganymede	15	0.001	188	2631*2	1 10 ¹¹	~10 ⁹	10 ⁹⁻¹⁰
Callisto	26.4	0.0002	331	2410	1.3 10 ⁹	?	?

(Kaiser et al., 2000 ; Queinnec & Zarka, 2001 ; Zarka et al., 2004 ; Menietti et al., 1998 ; Higgins et al., 2000 ; Hospodarsky et al., 2001)

(Prangé et al., 1996, 1998; Clarke et al., 2004)

→ 10¹² W pour Io, 10¹¹ W pour Ganymede et Europe

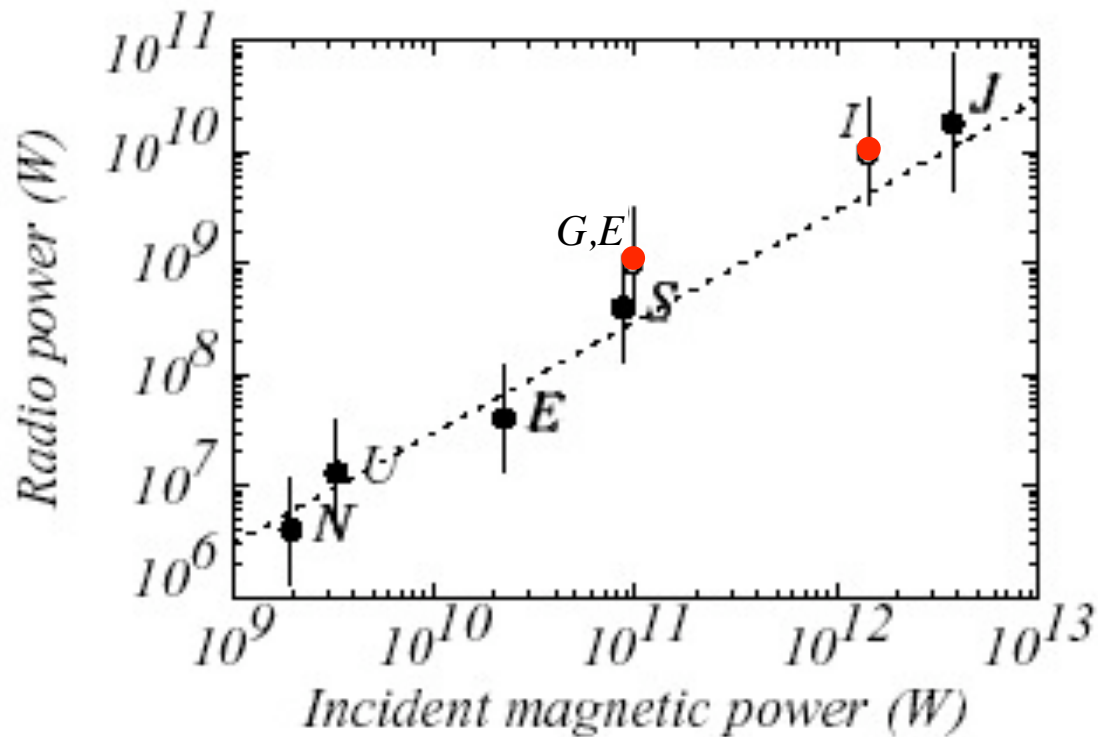
→ compatible avec une efficacité UV ~ 2 - 10 %

et une efficacité radio ~ 0.3 - 1 %

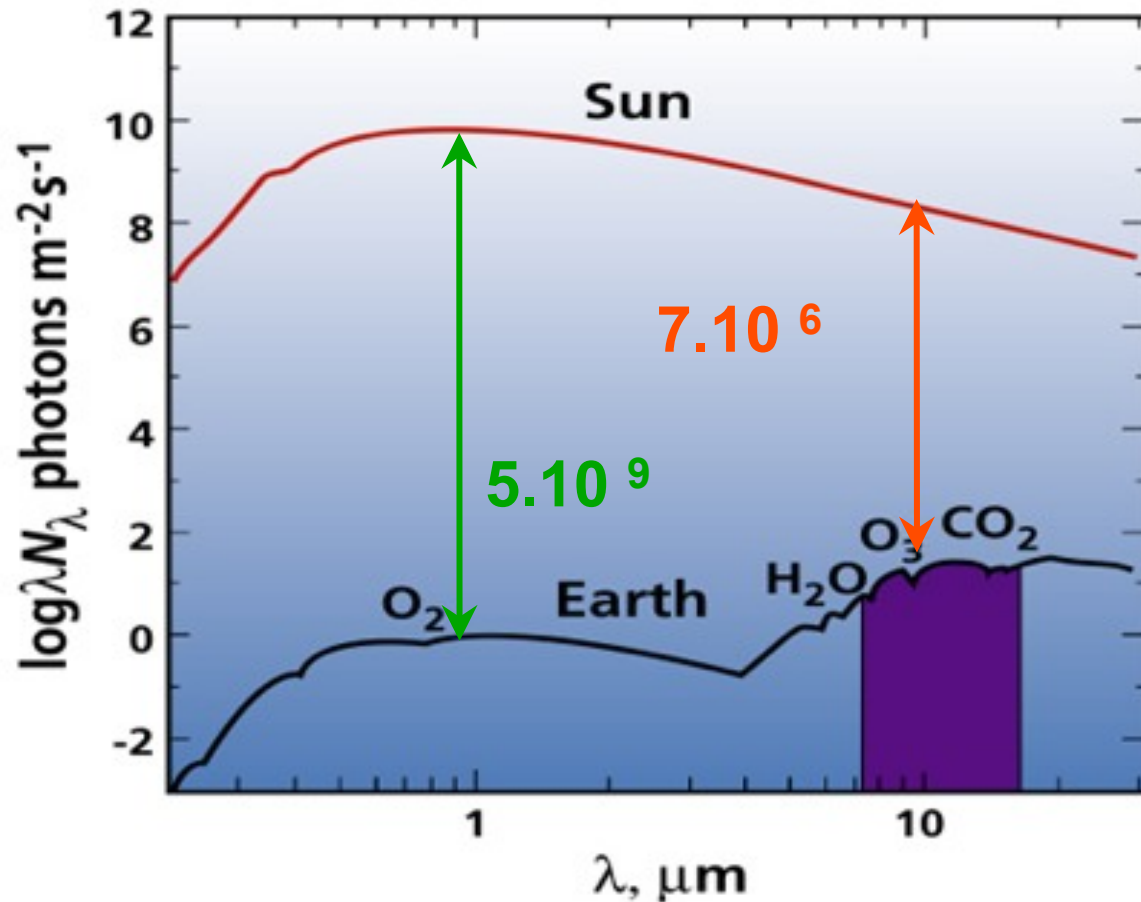
- “Loi de Bode Radio-Magnétique” généralisée S/MS et MS/satellite

$$\rightarrow P_{\text{radio}} \sim \beta (B^2/2\mu_0) V \pi R_{\text{MP}}^2 \quad \beta \sim 3 \times 10^{-3}$$

(Zarka et al., 2001)

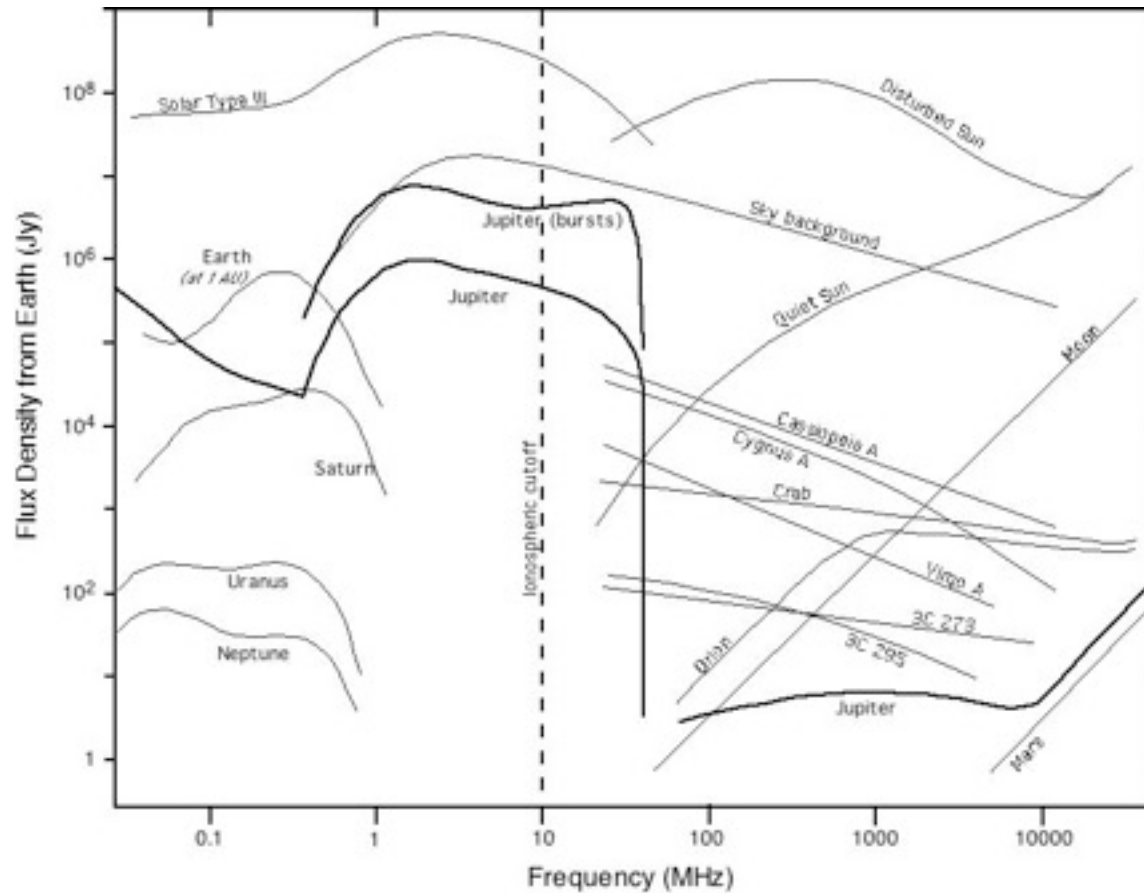


- Observation à distance : contraste * / planète $\sim 10^{6-9}$
= principale limitation en IR/visible



- aux grandes λ , spectre thermique en λ^{-2}

$$B(\nu) d\nu = 2kT\nu^2/c^2 d\nu = 2kT/\lambda^2 d\nu \quad [\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}] \quad (\text{Rayleigh-Jeans})$$



- aux très grandes λ , spectre \neq thermique pour le Soleil et Jupiter émission \gg thermique & contraste ~ 1

→ Émissions radio comme traceur de $P_{\text{dissipée}}$ via l'interaction «plasma»

*-planète (+ UV, IR mais contraste moins favorable)

- Problématique des observations radio :

→ détecter T_a au-dessus de T_{bruit}

$$T_{\text{bruit}} = \text{fluctuations de } T_{\text{fond}} \text{ (fond = ciel+systeme)}$$

→ à TBF (10-100 MHz), $T_{\text{fond}} \sim T_{\text{ciel}} \sim 1.15 \times 10^8 / \nu^{2.5} \sim 10^{4-6} \text{ K}$

$$T_{\text{bruit}} = T_{\text{fond}} / (b\tau)^{1/2}$$

Pour une source étendue / lobe du télescope

$$S = B\Omega \quad [\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}]$$

$$B = 2kT / \lambda^2 \quad [\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}]$$

Et on démontre par ailleurs que

$$A_{\text{eff}}\Omega = \lambda^2$$

$$\rightarrow S = 2kT \Omega / \lambda^2 = 2kT / A$$

$$\rightarrow S_{\text{bruit}} = 2kT / A (b\tau)^{1/2}$$

$$\rightarrow N = S_{\text{Signal}} / S_{\text{bruit}}$$

avec $S_{\text{Signal}} = \eta S_J / d^2$

$$S_J \sim 10^{-18} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1} \text{ (} 10^8 \text{ Jy) à 1 AU}$$

- Distance maximum de détection à $N\sigma$:

$$d_{\max} = (\eta S_J A / 2NkT)^{1/2} (b\tau)^{1/4}$$

$$\Rightarrow d_{\max} (\text{pc}) = 2.5 \cdot 10^{-6} (A\eta)^{1/2} (b\tau)^{1/4}$$

\Rightarrow pour $\eta = 1$:

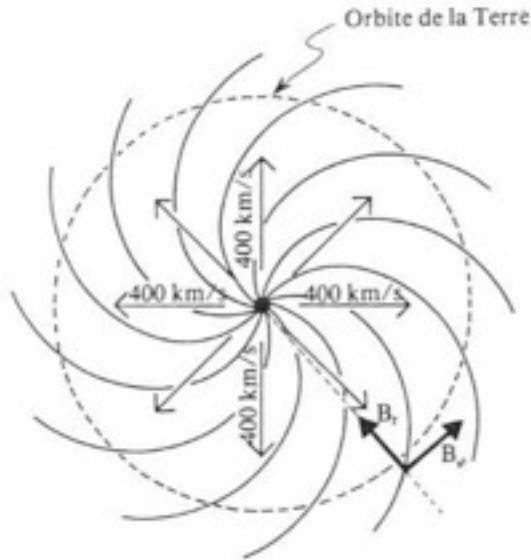
	$b\tau = 10^6$ (1 MHz, 1 sec)	$b\tau = 2 \times 10^8$ (3 MHz, 1 min)	$b\tau = 4 \times 10^{10}$ (10 MHz, 1 hr)
$A_e = 10^4 \text{ m}^2$ (Nançay)	0.013	0.05	0.17
$A_e = 10^5 \text{ m}^2$ (Kharkov)	0.040	0.15	0.55

$\Rightarrow \eta_{\max} ?$

- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

- Jupiters chauds (HJ) de periastre $\leq 10 R^*$:
 - ~17% de >130 planètes
- Champ magnétique à la surface solaire :
 - à grande échelle ~1 G
 - boucles magnétiques $\sim 10^3$ G, sur qq % de la surface
- Étoiles magnétiques : $> 10^3$ G

- Evolution de P_{RAM} et P_{IMF} avec la distance à l^* (de type solaire)

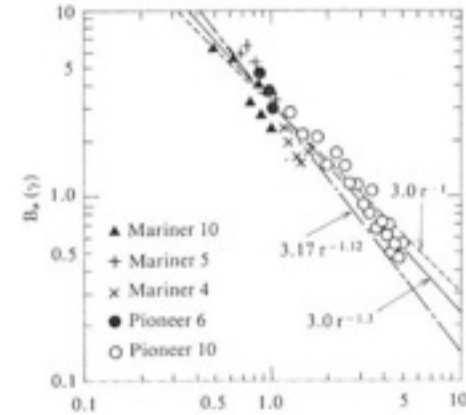


$V \sim c^{te}$, $T \sim c^{te}$
 (en $R^{-2/7} \rightarrow$ facteur $\sim 1/2$ entre 1 et 10 UA)
 $N \sim R^{-2}$ (conservation de la masse)

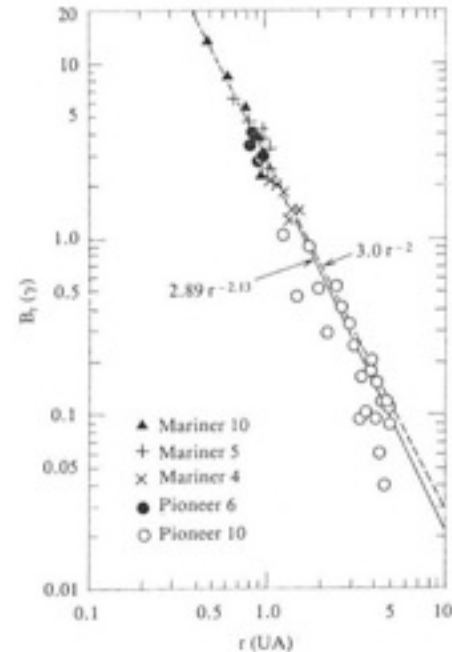
$B_R \sim R^{-2}$ (conservation du flux magnétique)

$B_\phi \sim R^{-1}$ ($B_R/B_\phi = V/\Omega R$) $\rightarrow B \sim R^{-1}$

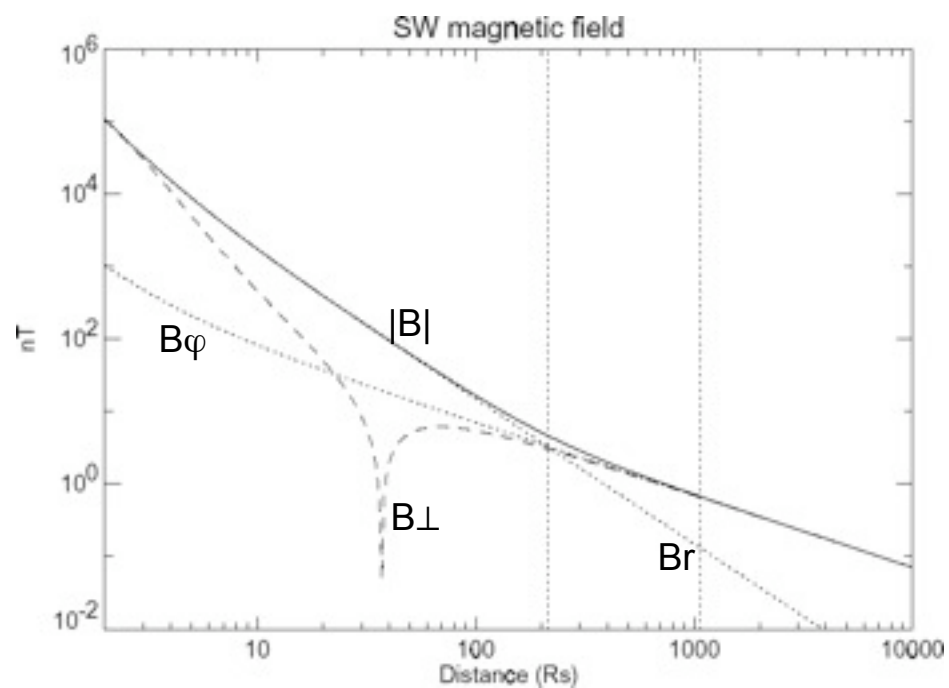
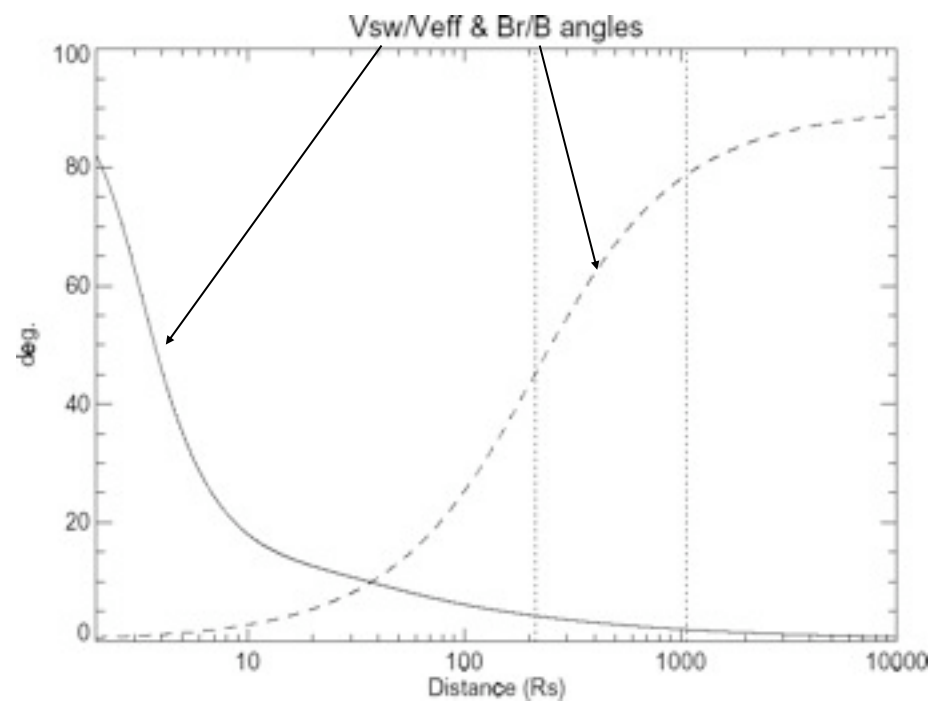
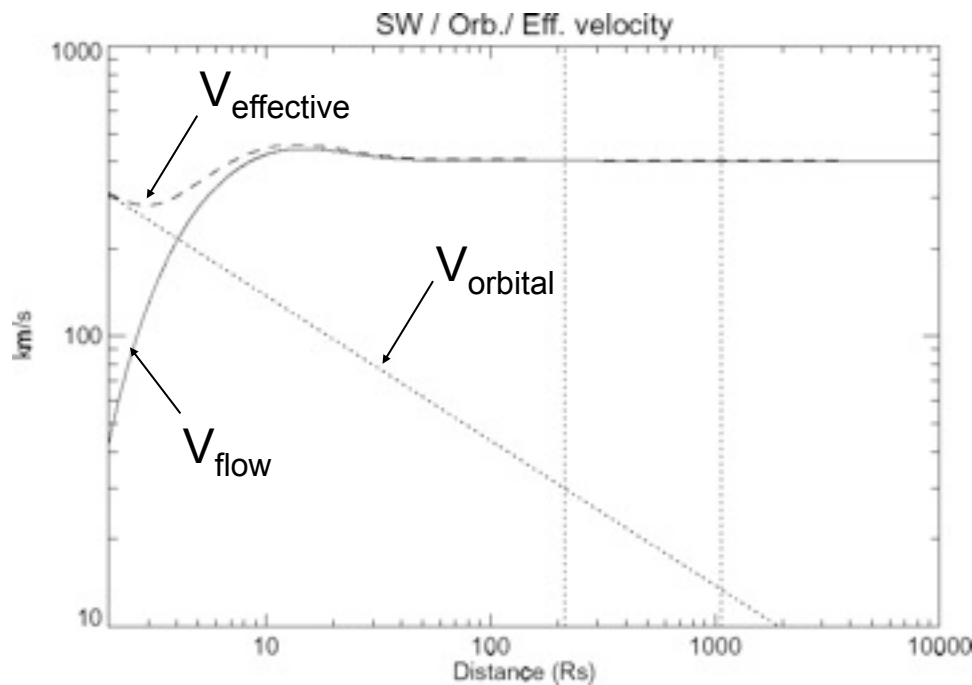
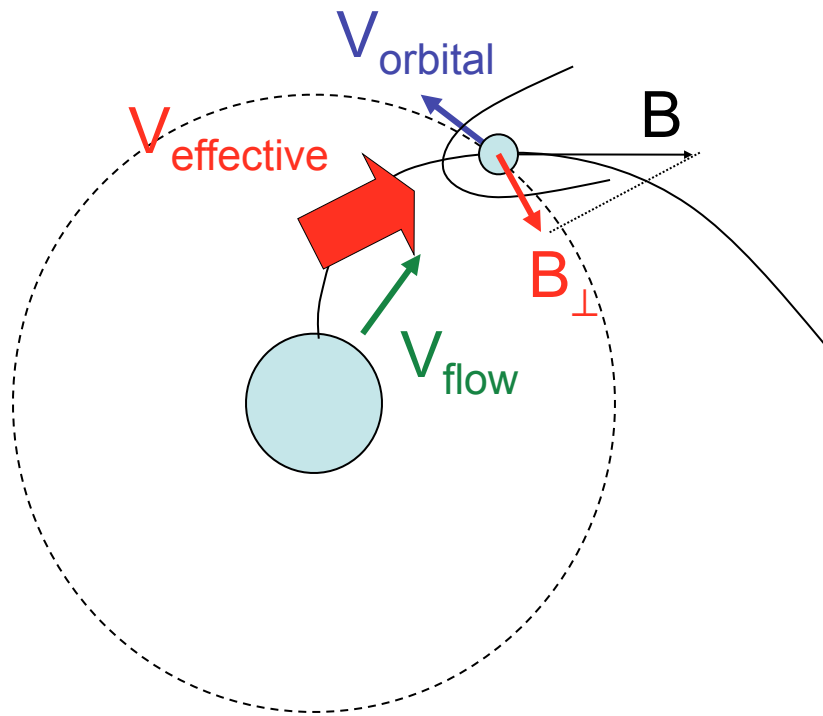
(à partir de l'orbite de Jupiter, $B \sim B_\phi$:
 à Jupiter, spirale à 11° , à Saturne, à 6°)

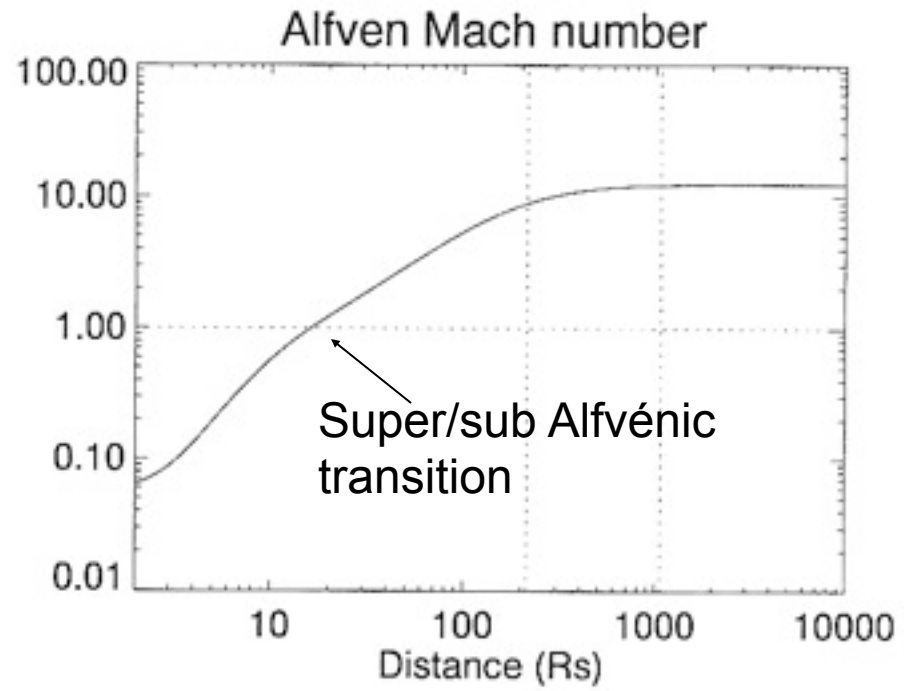
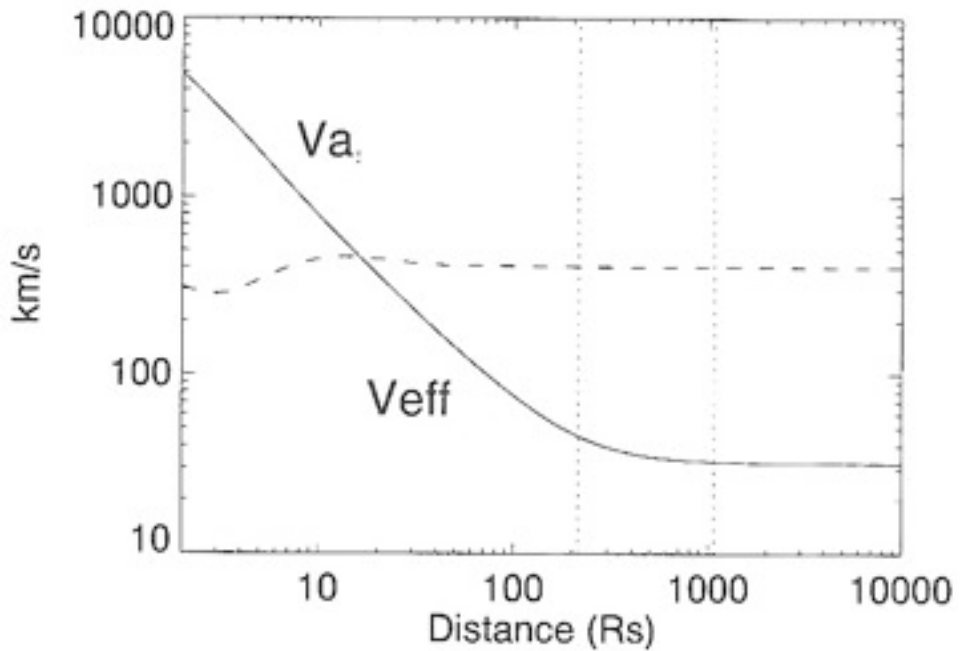


B_ϕ

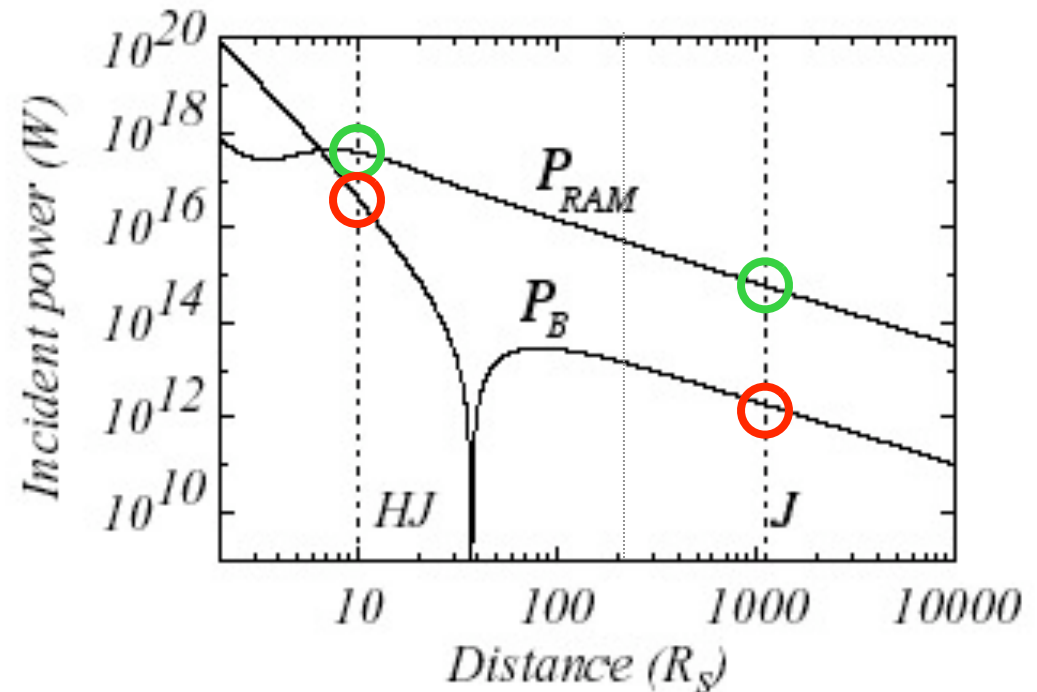
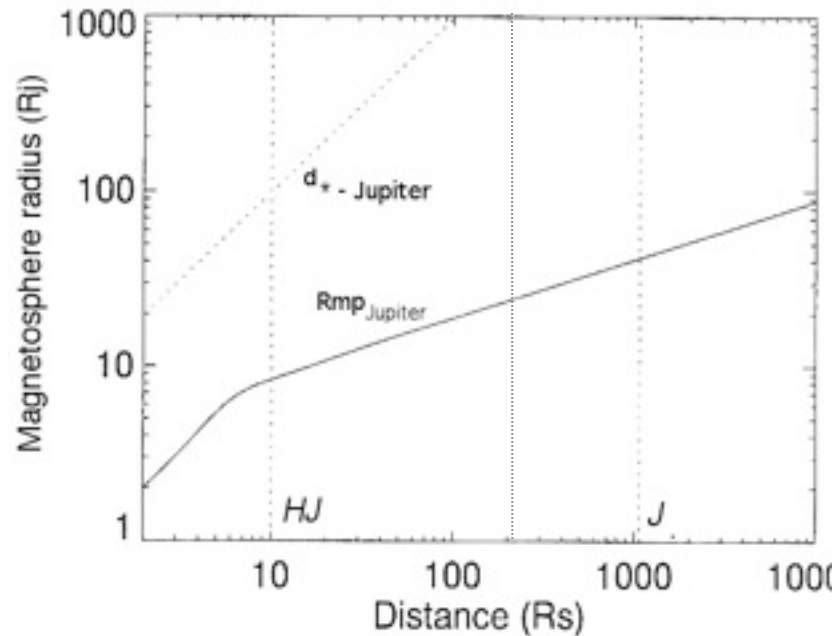


B_R





- [1] Planète magnétisée (Jupiter) à la distance d'un HJ
 → compression magnétosphérique
 → flux d'énergie incident $\times 10^3 - 10^5$ par rapport à Jupiter
 → $P_d = 10^3 - 10^5 \times P_d(\text{Jupiter})$
 → idem pour le flux radio ? (sauf si mécanisme de "saturation")
 (*Farrell et al., 1999 ; Zarka et al., 2001, 2004*)



[3] Planète magnétisée & reconnection magnétique

$$\rightarrow P_{\text{radio}} \sim \beta (B^2/2\mu_0) V \pi R_{\text{MP}}^2 \sim 10^5 \times P_r(\text{Jupiter})$$

(Zarka et al., 2001, 2004)

→ Point chaud chromosphérique/coronal sub-planétaire (IR, optique, UV), flares... ?

(Cuntz et al. 2000; Saar et al., 2004)

→ Périodicité P_{orb}

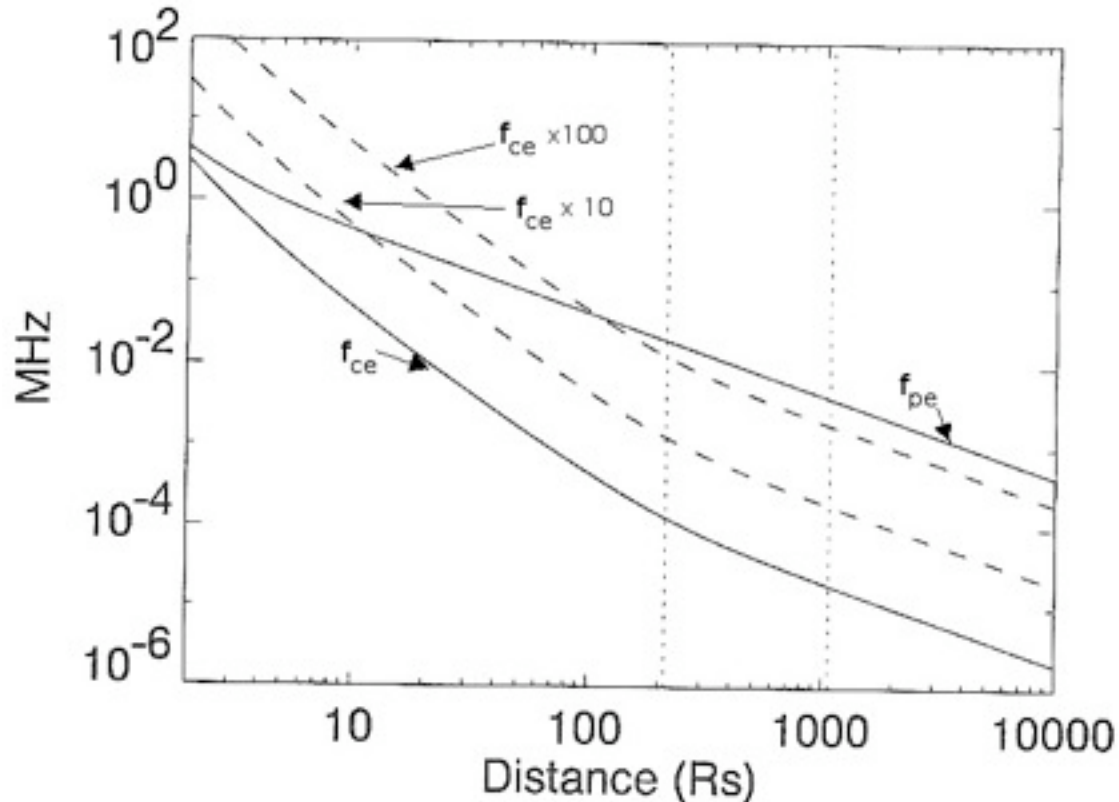
[4] Planète non magnétisée : HJ en régime sub/trans-Alfvénique
(pouvant alterner si orbite elliptique)

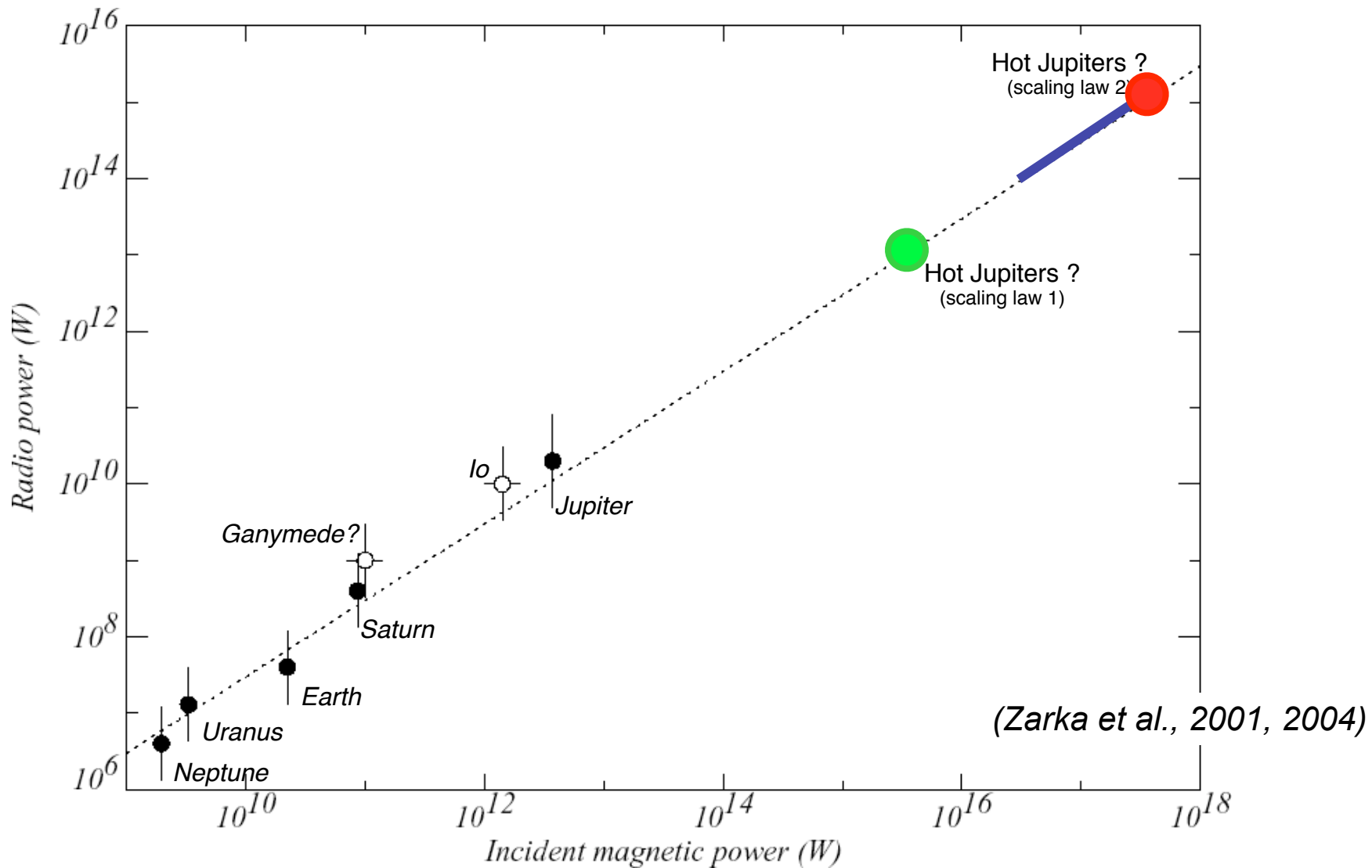
= Inducteur unipolaire (système Io-Jupiter géant) :

$$\begin{aligned} \rightarrow P_d &\sim P_{d(\text{Io-Jupiter})} \times (R_{\text{exosphere}}/R_{\text{Io}})^2 \times (B_*/B_J)^2 \times (V_{\text{orb}}/V_{\text{Io-Jupiter}}) \\ &\sim 10^{4-5} \times P_{d(\text{Io-Jupiter})} \end{aligned}$$

→ Emission radio fonction de f_{pe}/f_{ce}

$B_{\text{Sun}} \sim 1$ G, boucles magnétiques ~ 1000 G, * magnétiques >1000 G





⇒ étoiles à éruptions (radio) = présence de Jupiter chaud ?

→ f_{ce} jusque 100s MHz - GHz (Willes & Wu, 2004, 2005)

→ HJ = moteur de « superflares » ? → périodicités ?

(Schaefer et al., 2000 ; Rubinstein & Schaefer, 2000)

- (5) HJ : Interaction de marée
→ Point chaud chromosphérique/coronal sub-planétaire
(flares IR, optique, UV ?)

$$W_{\text{acoustic}} \propto v_t^8, W_{\text{magnetic}} \propto v_t^6$$

(Cuntz et al. 2000; Saar et al., 2004)

Périodicité $2 \times P_{\text{orb}}$

Si synchronisation $\rightarrow P_{\text{rot}}(*) = P_{\text{orb}}$

→ dynamo amplifiée

(hélicité $\uparrow \rightarrow \alpha \uparrow$, dynamo locale turbulente ou d'interface...)

→ dissipation \uparrow

- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

- Champs magnétiques estimés par des lois d'échelle du type :

$$\mathcal{M}_P \propto \rho_c^{1/2} \omega^{1/2 \dots 1} r_c^{3 \dots 4} \sigma_c^{-1/2 \dots 0} \quad \text{avec } \rho_c \sim \rho \text{ et } r_c \propto M_P^\alpha R_P^\beta$$

→ estimations de f_{ce} & flux radio

(Farrell et al., 1999 ; Griessmeier et al., 2004)

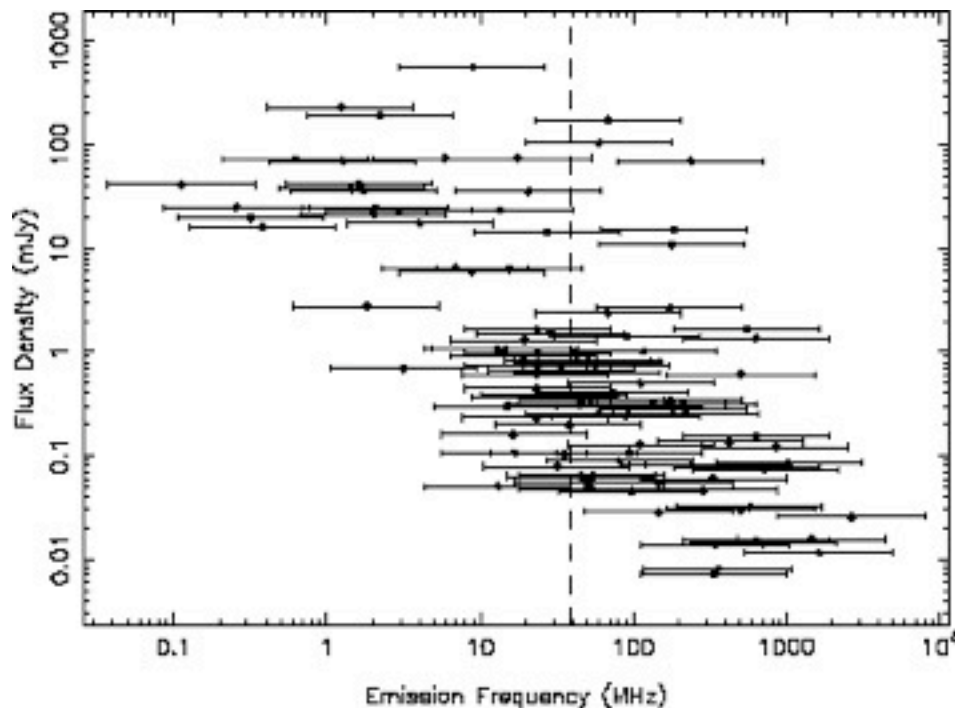
+ Possibility of Radio scintillations \Rightarrow bursts $P_{\text{radio}} \times 10^2$

(Farrell et al., 1999)

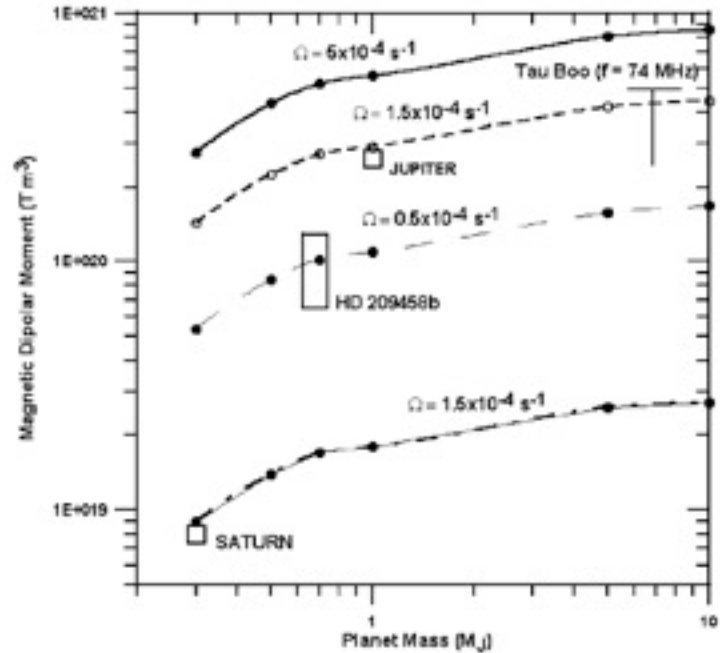
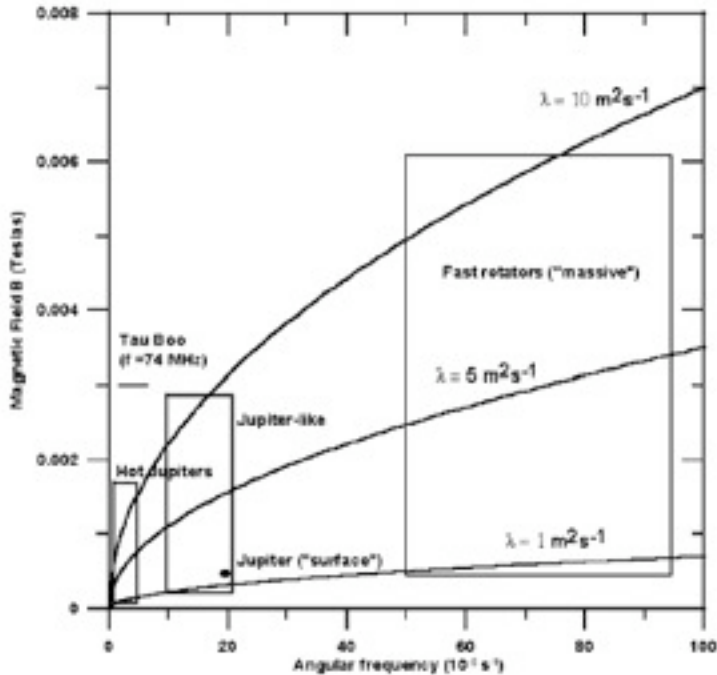
→ Prédications (B & flux) favorables pour τ Boo & HD 179949...

(Lazio et al., 2003)

- Interaction magnétique also \uparrow pour τ Boo & HD283750 (Saar et al., 2004)



- Synchronisation spin-orbite planétaires $\rightarrow \omega \downarrow \rightarrow \mathcal{M} \downarrow$
 \rightarrow Estimations récentes : structure interne + convection
 R_m élevé \rightarrow dynamo auto-excitée $\rightarrow B$ reste $> qq$ G
 (Sanchez-Lavega, 2004)



UPPER LIMIT OF MAGNETIC FIELDS IN HOT JUPITERS

Planet	M (M_J)	P_{orb} (days)	R (R_J)	η	M_D ($G m^3$)	B_s (G)
HD 179949b ^a	0.84	3.093	1.3	0.85	1.1×10^{24}	1.4
HD 209458b	0.69	3.52	1.43	0.75	0.8×10^{24}	0.8
τ Boo b ^a	3.87	3.31	1.3	0.95	1.6×10^{24}	2
OGLE-TR-56b	0.9	1.2	1.3	0.85	2.2×10^{24}	2.8

- Vents stellaires (fonction du type, de l'activité) :

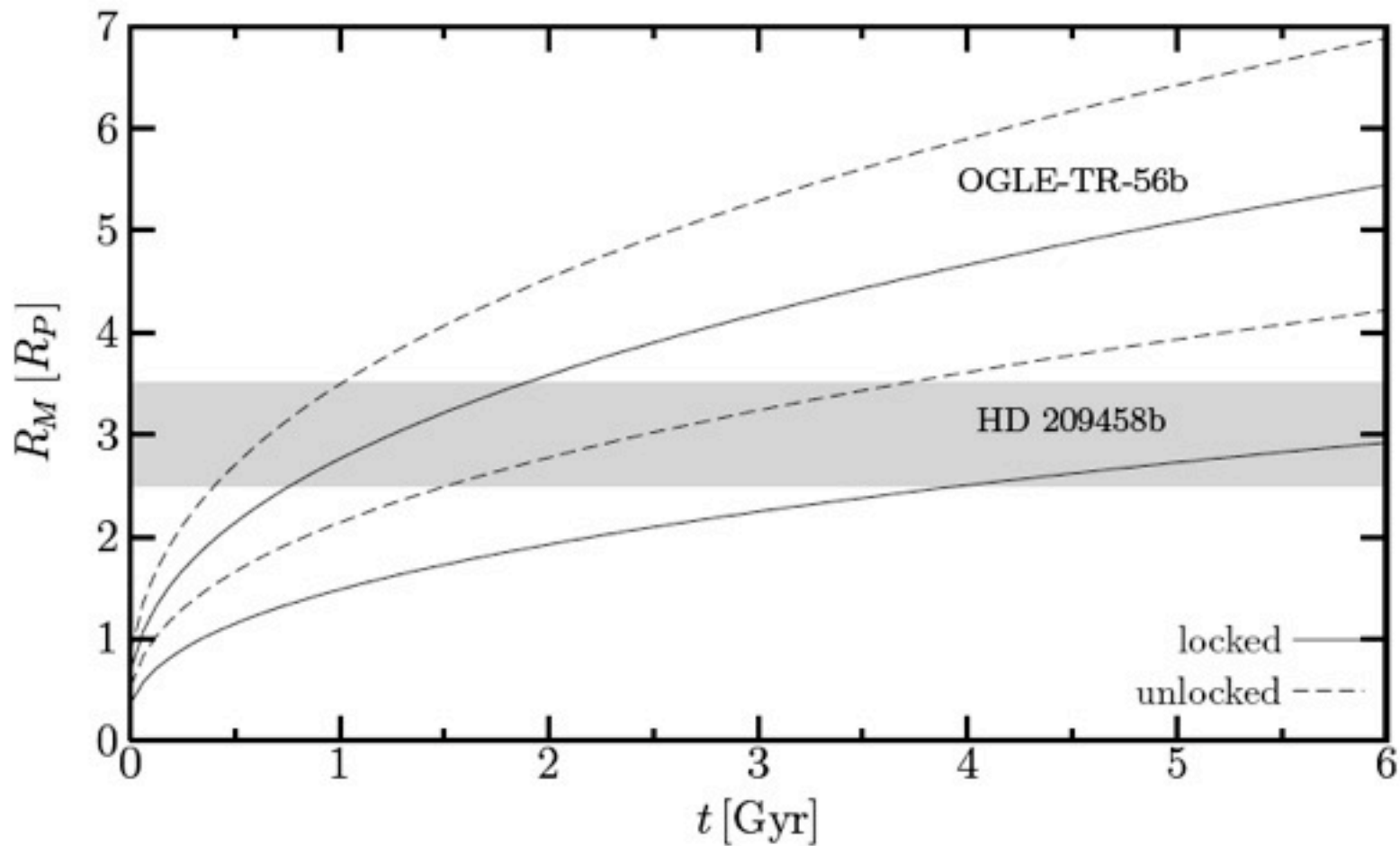
→ modèles =f(rotation, T couronne)

(Preusse et al., 2005)

→ $\rho_1 V_1^2$ & $dM/dt \propto F_x^\alpha$ ($\alpha = -1/2, +1.15\dots$)

(Cuntz et al., 2000 ; Saar et al., 2004, Stevens, 2004)

- Evolution de $V_S(t)$: plus intense pour $t < 0.5-1$ Gyr
(et Rayon planétaire $>$ Rayon actuel)
(*Griessmeier et al., 2004 ; Stevens et al., 2004*)

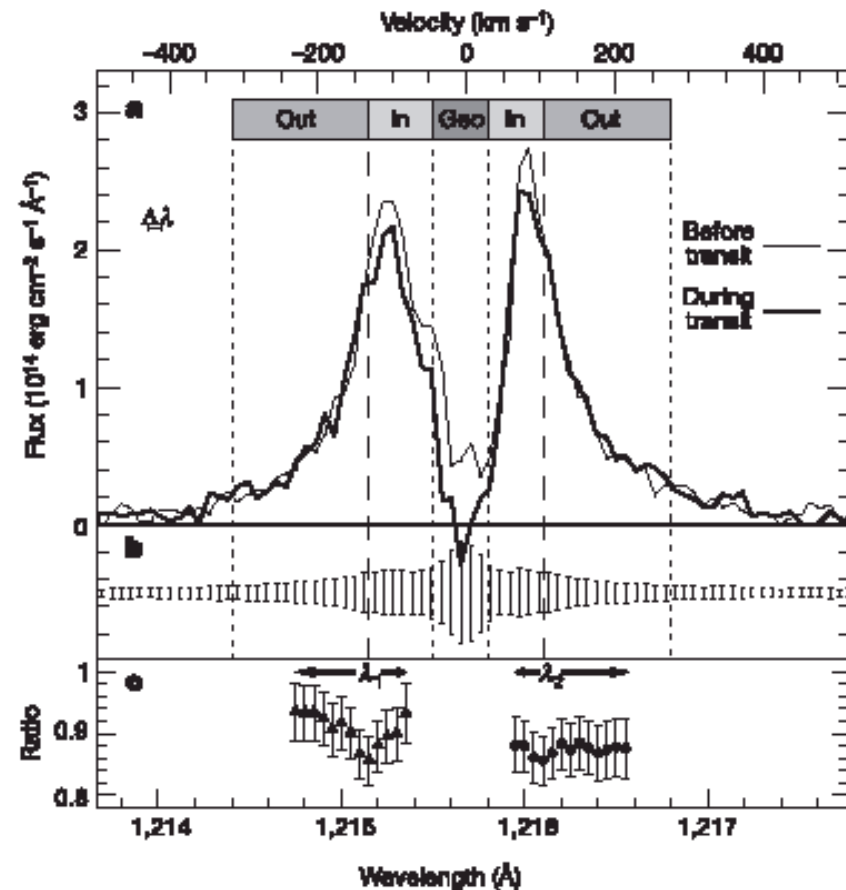
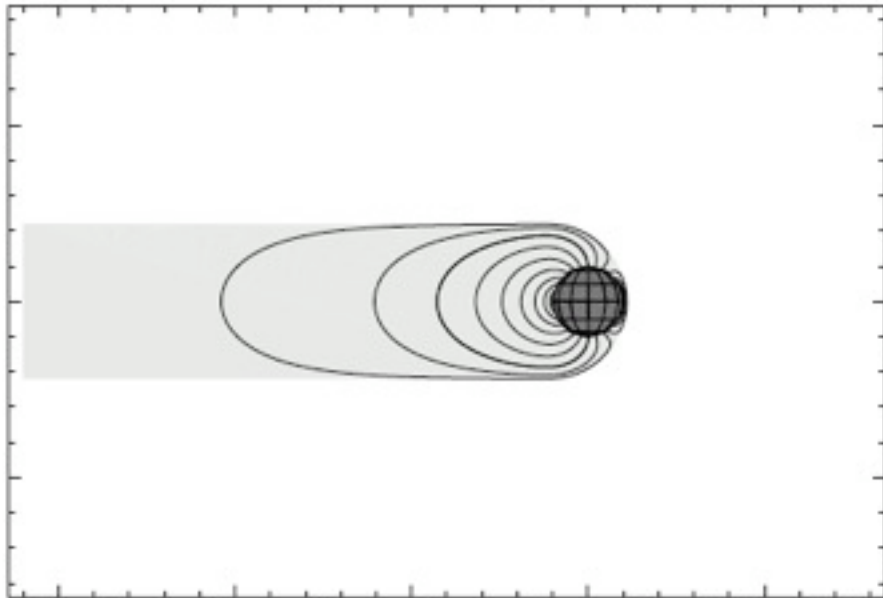


(2) MS compressée peut-être $< R(\text{exosphère en expansion})$

→ échappement du plasma

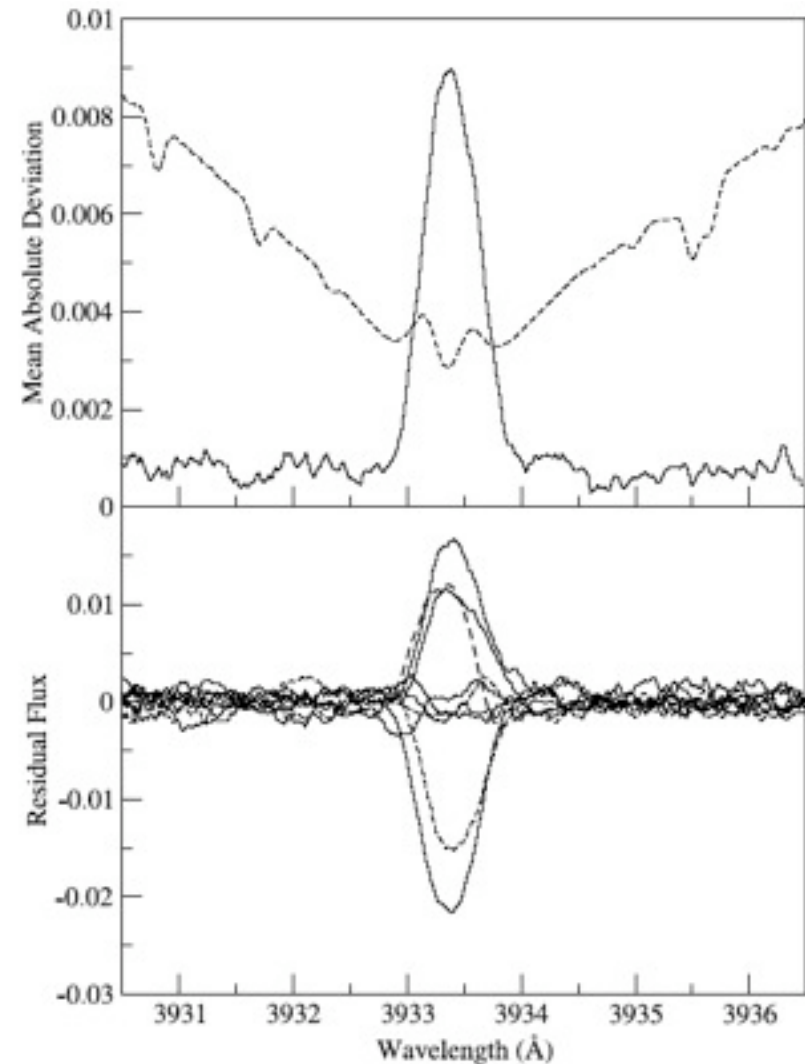
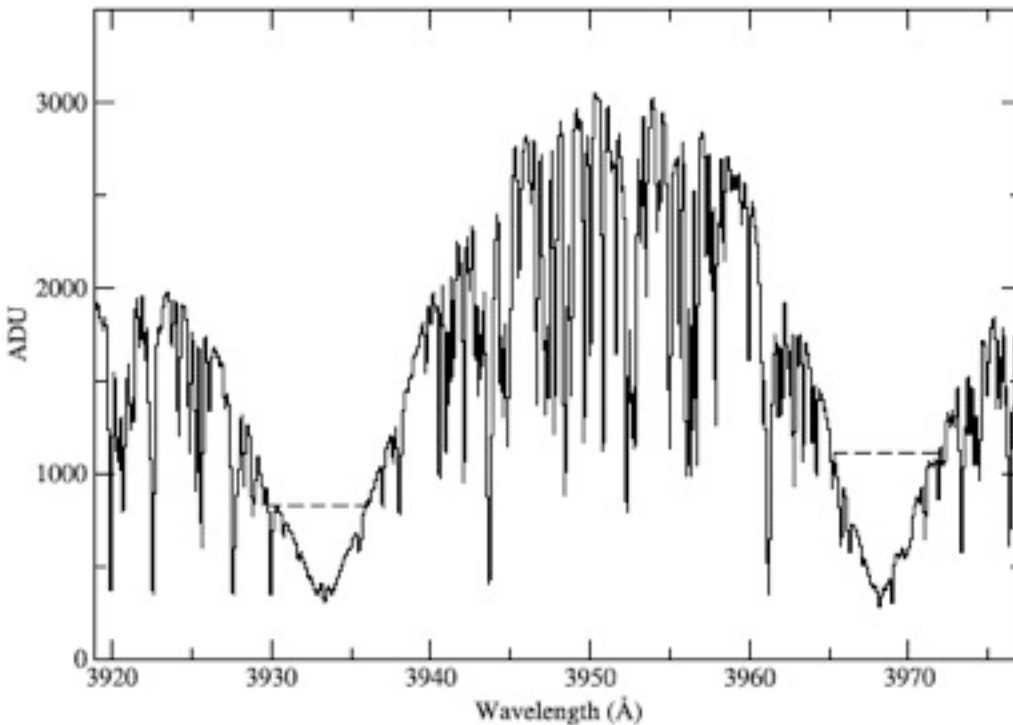
(cf. HD209458b : *Vidal-Madjar et al., 2003, 2004*)

(*Griessmeier et al., 2004 ; Erkaev et al., 2005*)



- 1 • Types d'interaction
- 2 • Estimation des puissances dissipées
- 3 • Production d'émissions e.m. détectables ?
- 4 • Application aux exoplanètes
- 5 • Paramètres stellaires et planétaires
- 6 • Observations passées/présentes/futures

- Recherche d'intensifications à $1-2 \times P_{\text{orb}}$
 - du triplet IR Ca (chromosphérique) \rightarrow négative (*Saar & Cuntz, 2001*)
 - de la raie visible CaII HK (chromosphérique) ...



- Découverte du système *-planète en interaction HD179949 :
 → reconnection magnétique ou inducteur unipolaire (1 point chaud)

[TBC : test des périodes à la Saar & Cuntz 2001 ?]

(*Shkolnik et al., 2003*)

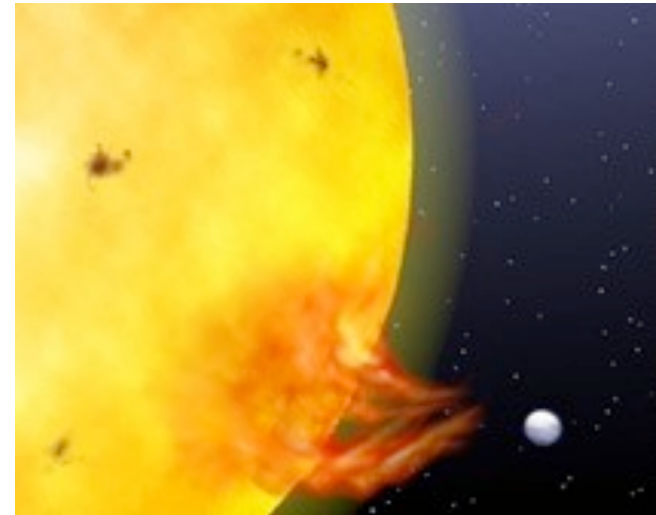
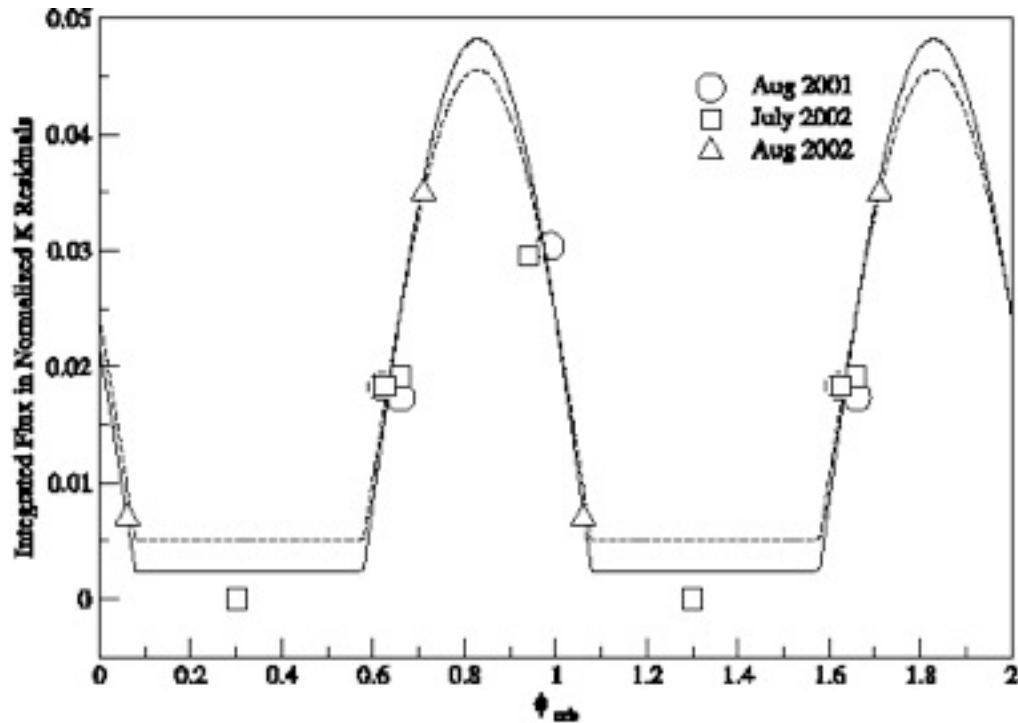
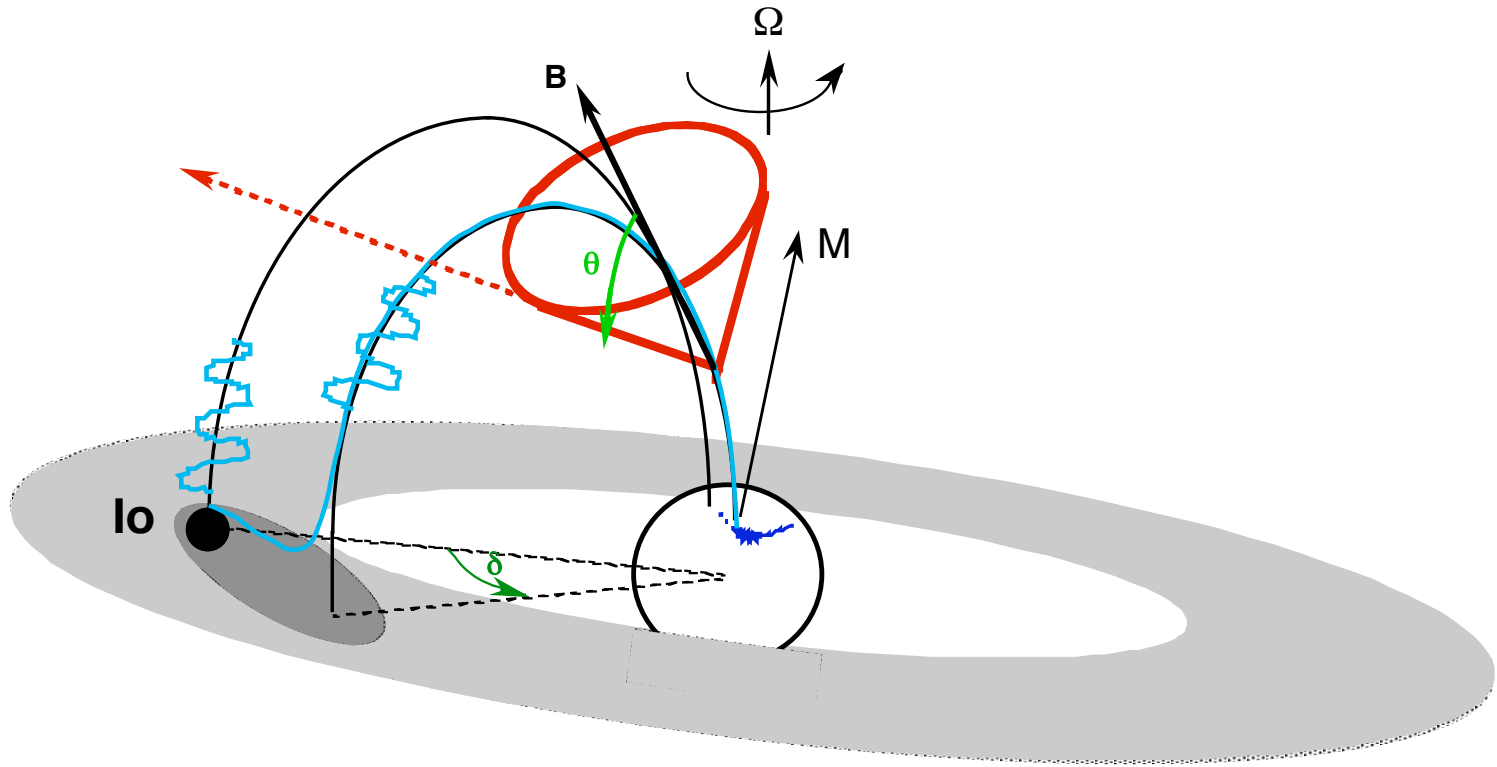


FIG. 6.—Integrated flux of the nine K-line residuals taken from a normalized mean spectrum. The minimum flux was set to zero and all others scaled accordingly. The size of the points is the size of the error bars. The solid line is the best-fit bright-spot model discussed in the text with the spot at a latitude of 30° and stellar inclination angle $i = 87^\circ$. The dashed line is a model with $i = 83^\circ$. Units of the integrated flux are in equivalent angstroms relative to the normalization level, which is approximately 1/3 of the stellar continuum.



→ angle δ : $\Delta\phi = +0.17$ observé

P_* (6-10 jours) $>$ P_{orbitale} (~ 3 jours) $\Rightarrow \Delta\phi$ devrait être < 0

\Rightarrow Spirale de Parker à 0.045 AU ($V \sim 400$ km/s) $\Rightarrow \Delta\phi \sim +0.03$

\Rightarrow * = rotateur plus rapide ? $V \ll 400$ km/s ? Topologie de B ?

→ Emission radio pour HD179949? ($B < 10 B_{\odot}$?)

- Distance maximum de détection à $N\sigma$:

$$d_{\max} = (\eta S_J A / 2NkT)^{1/2} (b\tau)^{1/4}$$

$$\Rightarrow d_{\max} (\text{pc}) = 2.5 \cdot 10^{-6} (A\eta)^{1/2} (b\tau)^{1/4}$$

\Rightarrow pour $\eta = 10^5$:

	$b\tau = 10^6$ (1 MHz, 1 sec)	$b\tau = 2 \times 10^8$ (3 MHz, 1 min)	$b\tau = 4 \times 10^{10}$ (10 MHz, 1 hr)
$A_e = 10^4 \text{ m}^2$ (Nançay)	4	16	54
$A_e = 10^5 \text{ m}^2$ (Kharkov)	13	47	174
$A_e = 10^6 \text{ m}^2$ (LOFAR)	41	158	537

+ type stellaire $\Rightarrow P_{VS} \times 10^{2-3}$

+ scintillations $\Rightarrow P_{\text{radio}} \times 10^2$

- Observations radio :

- coupure ionosphérique terrestre : $f \geq 10$ MHz

- $B_p > 3,6$ G (hautes latitudes, + anomalie ?)

- effets de propagation ≤ 30 MHz

- RFI

- distinction planète / étoile (flux équivalents) ?

- via polarisation circulaire/elliptique & périodicité

- 1996-2004 : observations au VLA & UTR2

- résultats jusqu'ici négatifs...

• Observations de τ Boo au VLA

→ 27 antennes \times 25m : $A_{\text{eff}} \sim 13000 \text{ m}^2$

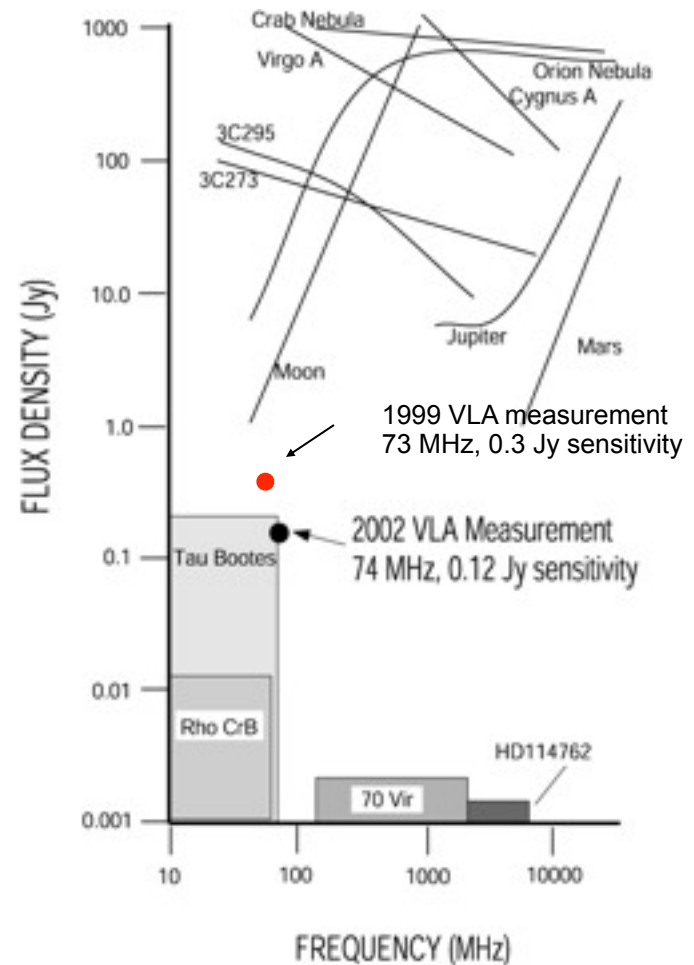
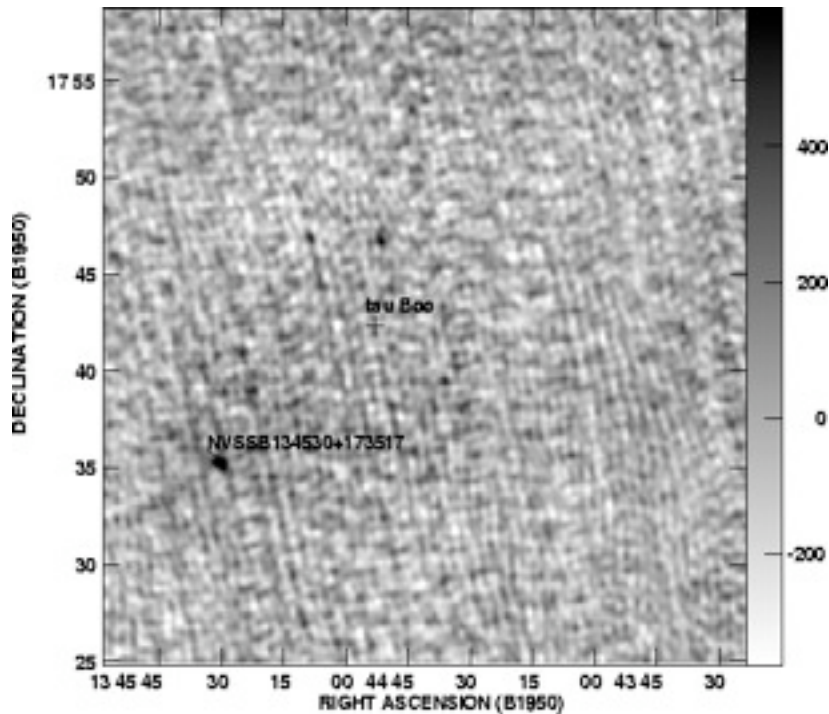
→ bande instantanée $\leq 1.5 \text{ MHz}$

à 74, 333, 1465 MHz

→ Lobe $\geq 0.4'$

→ 2 polarisations

→ cartes 2D (spatiales)



(Bastian et al., 2000 ; Farrell et al., 2003, 2004)

• Observations à UTR-2 / Kharkov

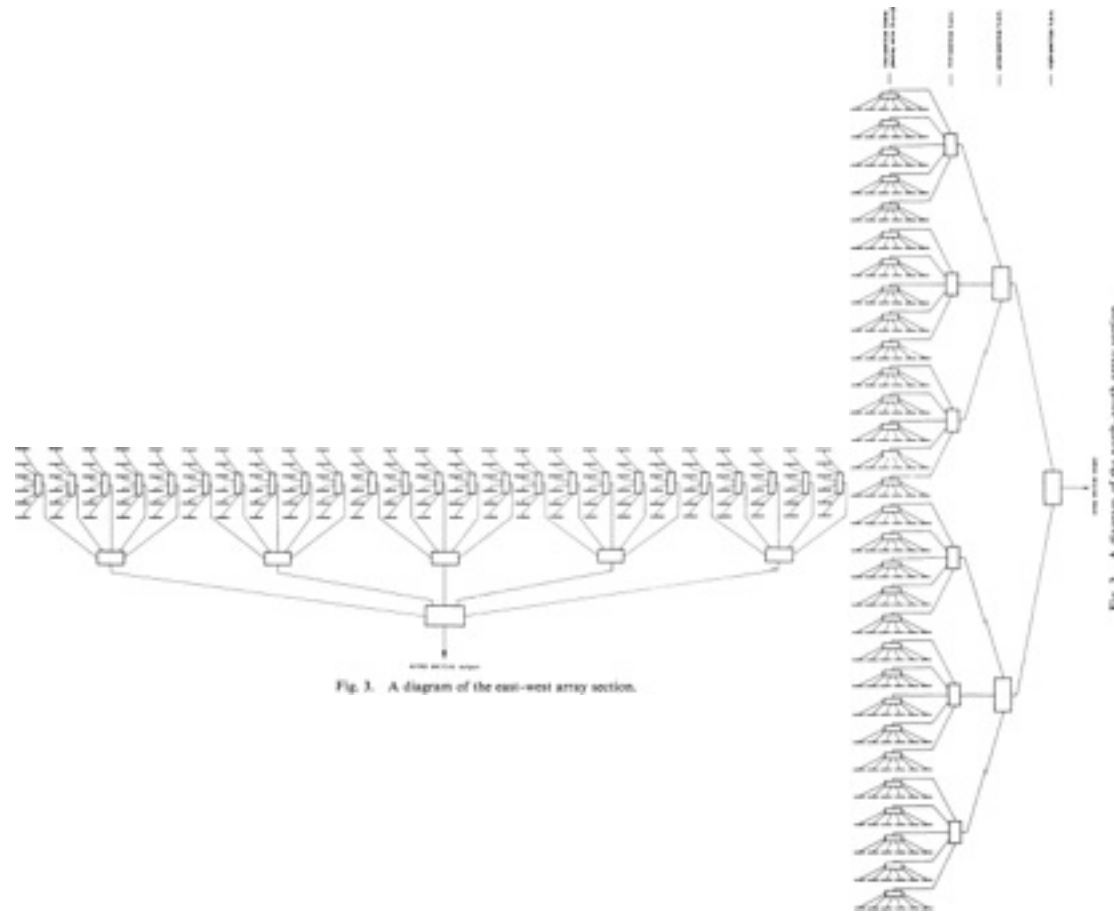
→ $A_{\text{eff}} \sim 60000 \text{ m}^2$

→ bande instantanée de 10 MHz \subset 10-35 MHz

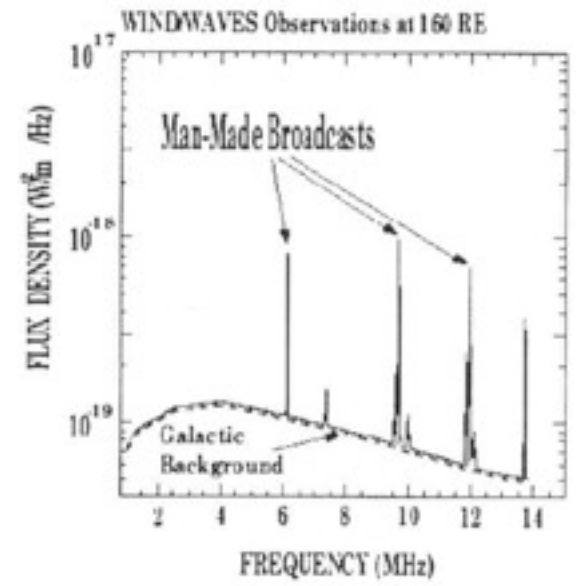
→ récepteur multicanal (333 canaux \times 30 kHz), $< 1 \text{ sec/spectre}$

→ Lobe $30' \times (1^\circ - 10^\circ)$

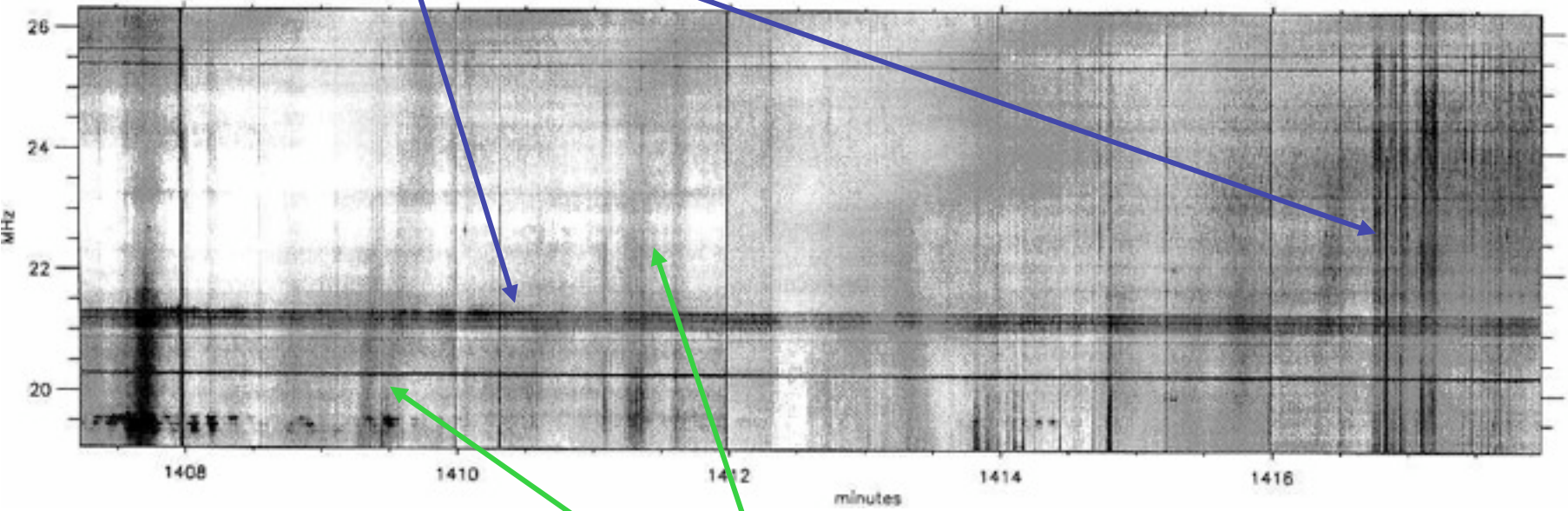
→ 1 polarisation linéaire



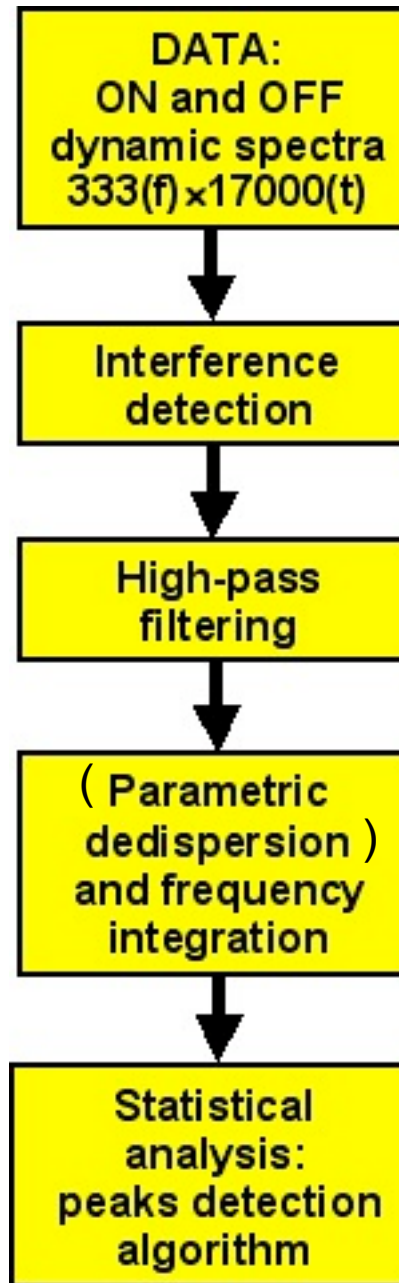
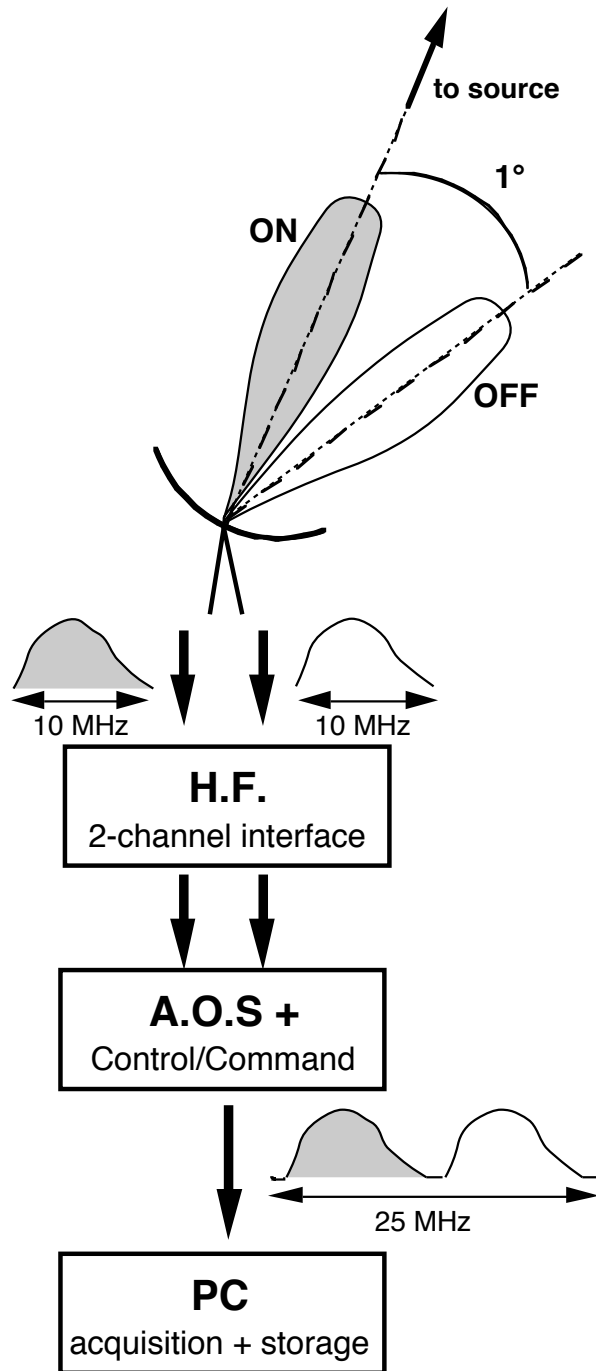
(Zarka et al., 1997, 2002 ; Ryabov et al., 2004)



RFI (parasites)



Scintillations ionosphériques



« Exoplanet » mode :

- Simultaneous ON/OFF observations
- $\delta t = 20-300$ msec

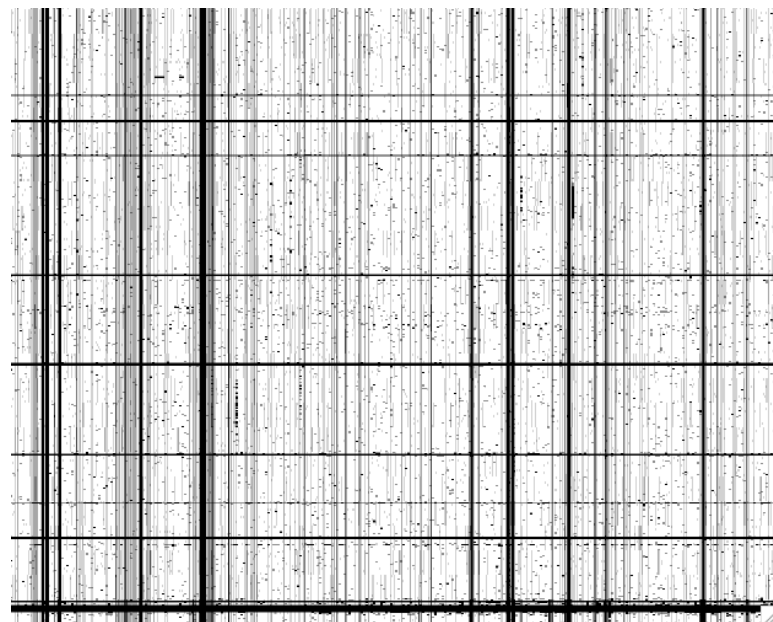
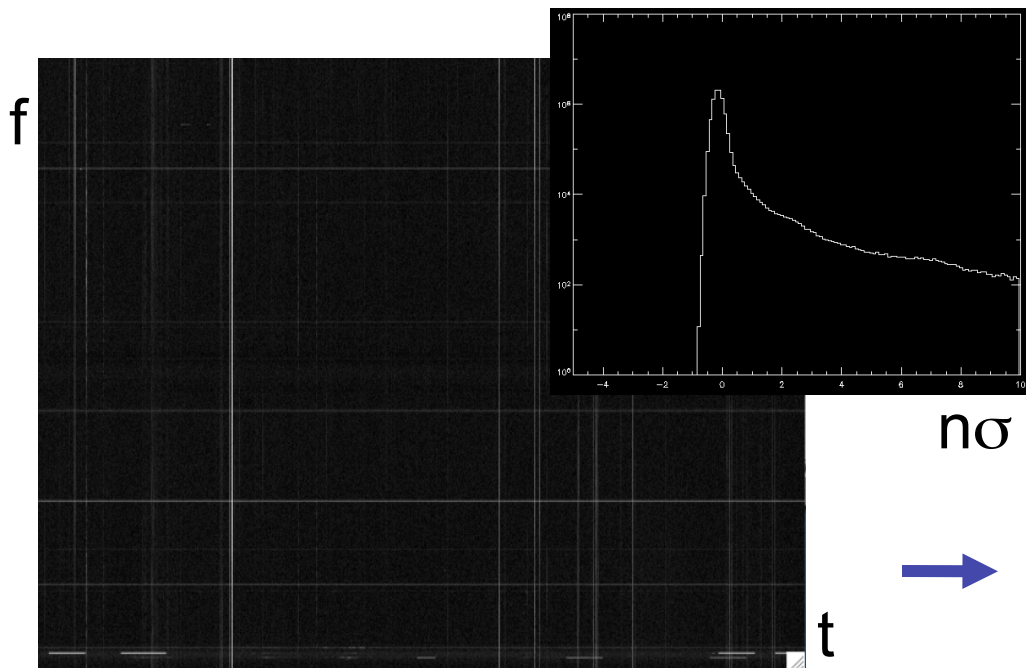
- Post-processing :
→ RFI recognition / elimination

- Correction of ionospheric scintillations

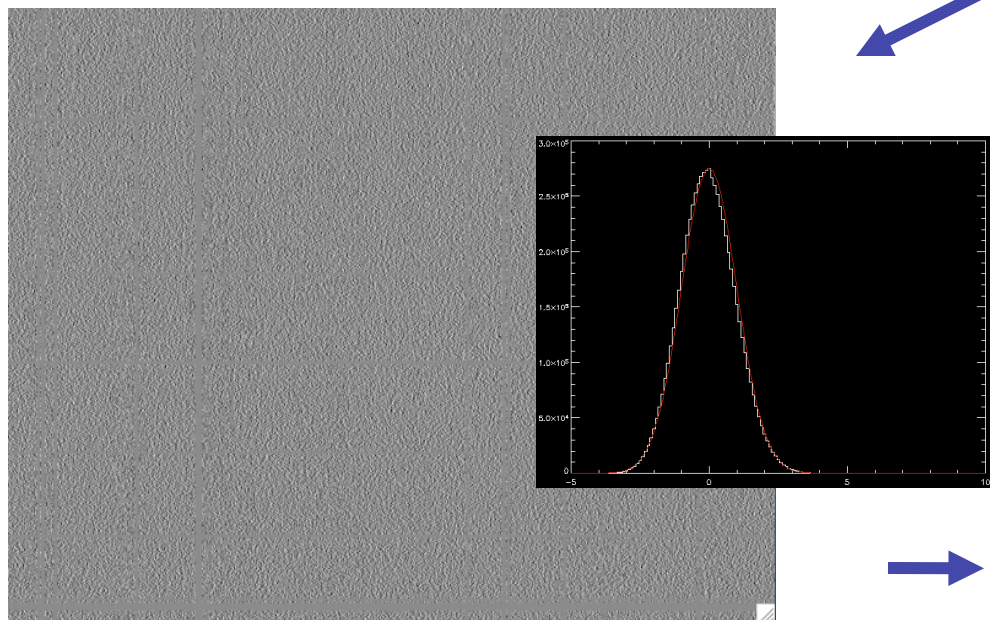
- Spectral integration

- Peak detection

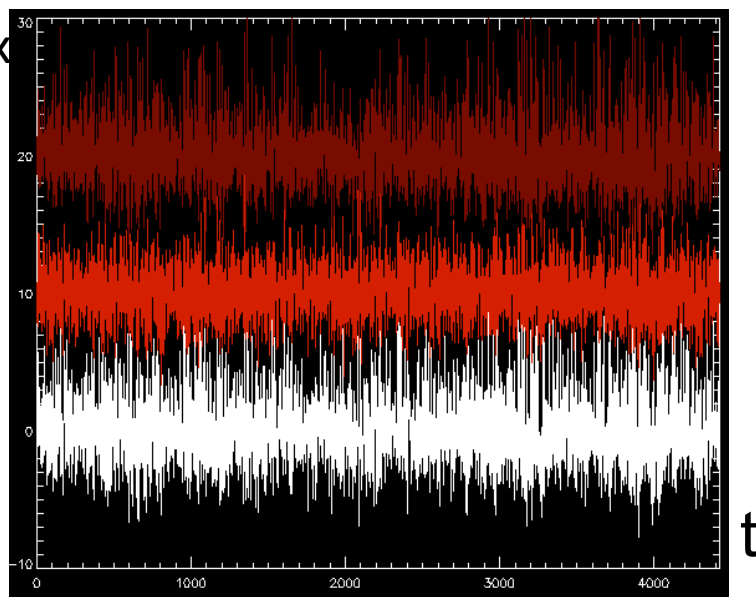
RFI mitigation tests @ Nançay :

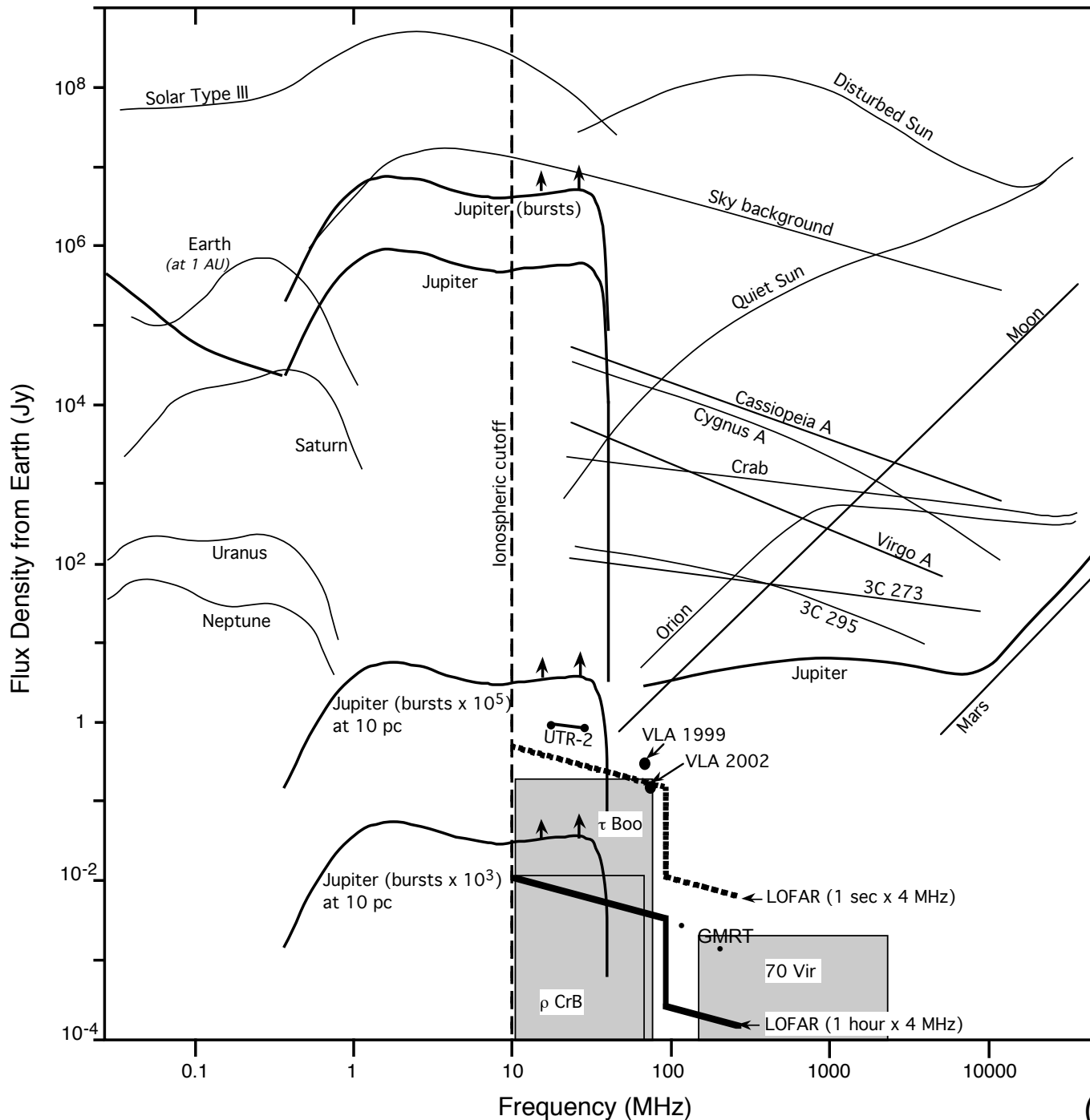


$n\sigma$



Flux





(Zarka, 2005)

• Absence de détection ?

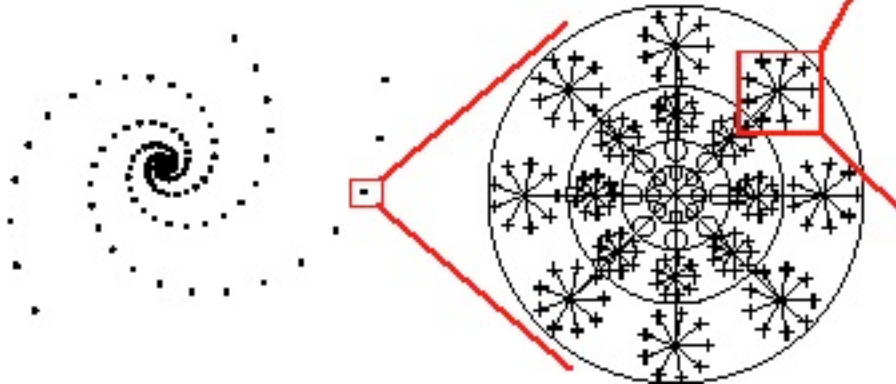
- Signal sporadique, absent durant les observations (séquences de qq heures = couverture temporelle insuffisante de P_{orbitale})
- Emission dans une bande spectrale \neq observée ($B \gg$ or $\ll B_{\text{jupiter}}$?)
- Sensibilité d' UTR-2 insuffisante (≤ 1 Jy) / signal trop faible
- RFI imparfaitement éliminés
- Signal exoplanétaire éliminé avec les parasites
- Algorithme de détection non optimisé / caractéristiques (inconnues) du signal recherché
- Dérive spectrale intrinsèque des sursauts émis

Algorithme Sys-Rem, Mazeh, MNRAS, 2005; image (t,star); initial estimate airmass $a(t)$ → sorting columns → $i(a,star)$ → colour $c(star)$ → ordering by colours → $i(a,c)$ → matrix = products $a_i c_j$ subtracted from the image → iteration, quick convergence ; on obtient des séries temporelles nettoyées des erreurs systématiques dues à l'airmass (effective) et à la couleur (effective), et on peut réétudier $a_{\text{eff}}(t)$ pour chaque nuit d'observation pour déterminer des effets instru. Devrait marcher pour toute erreur systématique, corrélée → radio ? Différents t, f non corrélés entre eux...

- Observations futures : HJ / * de type ~solaire
 - nouveaux candidats jupiters-chauds
 - UTR-2 + récepteur numérique / minimum solaire
[10-35 MHz]
 - campagnes au GMRT [150, 230... MHz]
 - VLA [≥74 MHz]
 - LOFAR [10-200 MHz] (≥2007)
 - observations optiques

• LOFAR : the LOW Frequency ARray

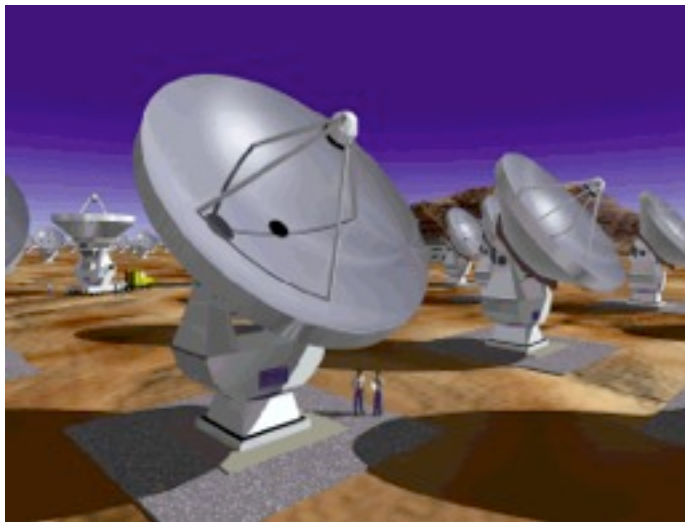
- Interferomètre de réseaux phasés
- $A_e \sim 10^6 \text{ m}^2$ (cœur de 250 000 m^2 + ~ 100 "stations")
- Imagerie à grand champ (qq °) avec résolution angulaire 1"-10"
- 32 MHz \subset 10-220 MHz
- acquisition/traitement numériques, résolutions 1 kHz \times 1 msec / bande spectrale
- multi faisceaux (jusqu'à 8 simultanément)
- polarisation complète (4 paramètres de Stokes)
- sensibilité $\ll 1$ Jy
- grande dynamique
- faisceau étroit \Rightarrow "confusion" faible
- techniques anti-RFI + correction (\sim OA) ionosphérique intégrées
- En opération à partir de ~ 2007



- Observations futures : Terres chaudes / Naines blanches
(Willles & Wu, 2004, 2005)

→ SKA [0.2-20 GHz] (≥ 2015)
sensibilité $\sim \mu\text{Jy}$

→ ALMA [100-650 GHz] (≥ 2010)
sensibilité 0.1-1 mJy



- Enjeux / intérêts :

- Détection directe

- P_{rotation} planète

- Mesure de B \Rightarrow contraintes des lois d'échelle

- Physique magnétosphérique comparative

- Découverte possible de radio-exoplanètes intenses

A SUIVRE ...