

Deux énigmes du champ magnétique de Saturne

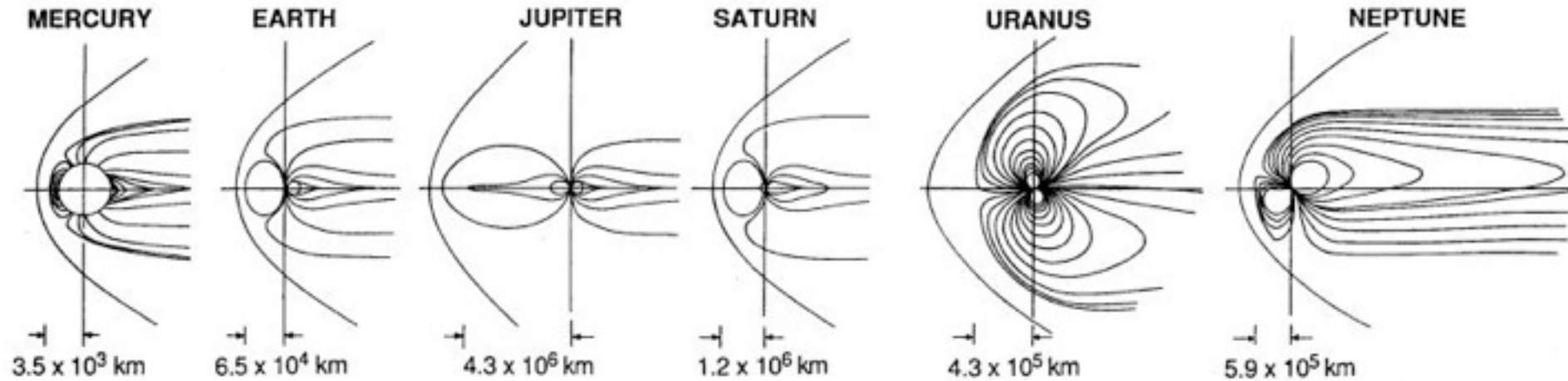
Philippe Zarka

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

- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

Champs magnétiques et magnétosphères planétaires



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

Description du champ magnétique

- Hors des régions contenant des courants : $\mathbf{B} = \nabla\psi$

ψ potentiel scalaire développé en harmoniques sphériques :

$$\psi = R_p \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{R_p}{r} \right)^{n+1} S_n^i + \left(\frac{r}{R_p} \right)^n S_n^e \right]$$

Sources internes :
$$S_n^i = \sum_{m=0}^n \left[P_n^m(\theta) \left(g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right) \right]$$

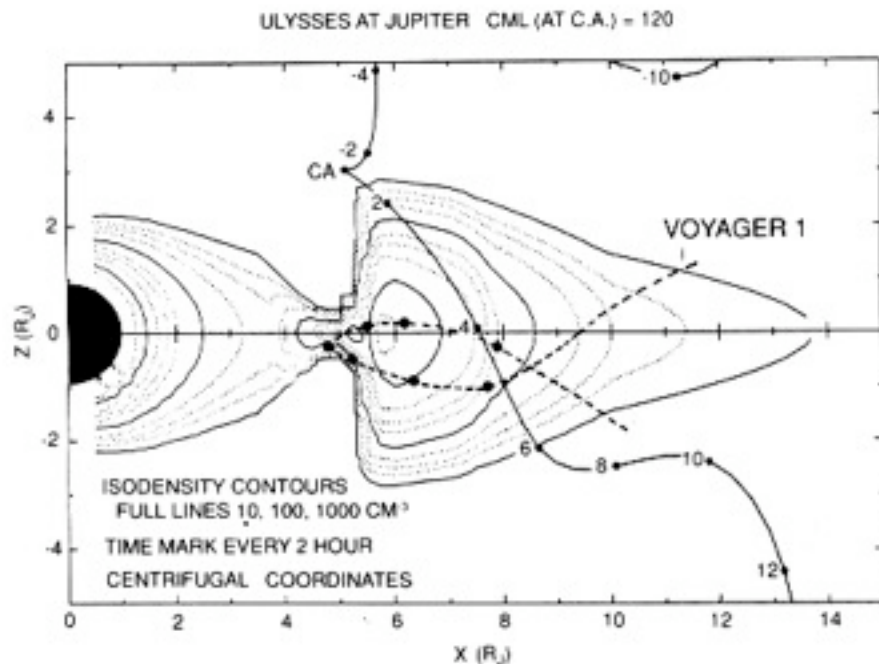
Sources externes :
$$S_n^e = \sum_{m=0}^n \left[P_n^m(\theta) \left(G_n^m \cos(m\phi) + H_n^m \sin(m\phi) \right) \right]$$

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

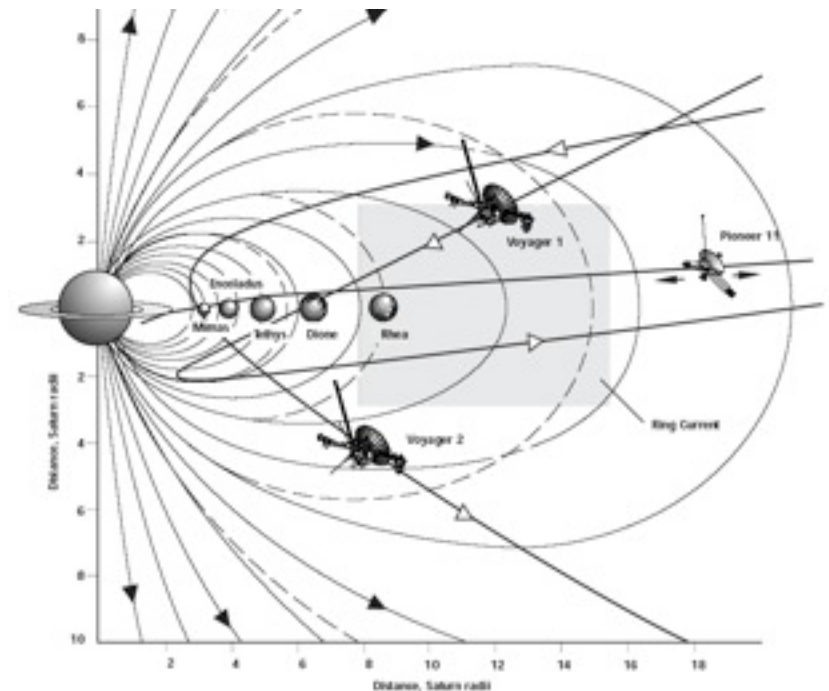
$g_n^m, h_n^m, G_n^m, H_n^m$ = coefficients de Schmidt.

Mesures du champ magnétique

- Magnétomètres embarqués, le long de trajectoires de survols (Pioneer 10 & 11, Voyager 1 & 2, Ulysses) ou d'orbites (Galileo, Cassini ...)
⇒ Détermination non unique des $g_n^m, h_n^m, G_n^m, H_n^m$ par ajustement modèle-mesures (moindres carrés)
- Erreur de mesure $\chi \Rightarrow$ précision à l'ordre $n \propto \chi \cdot (r/R_p)^{n+2}$



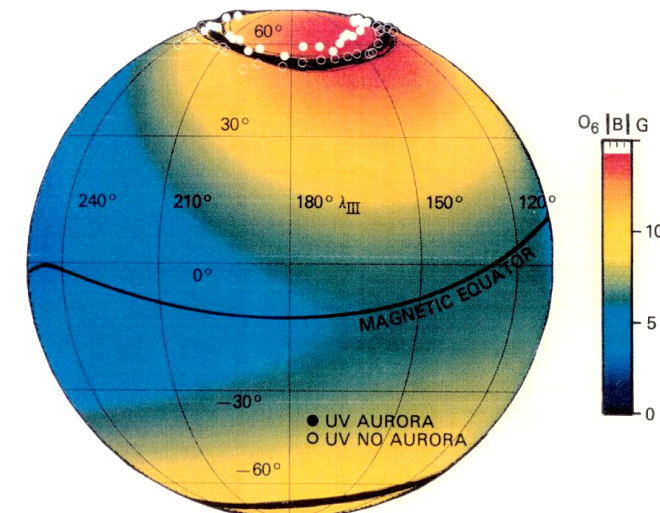
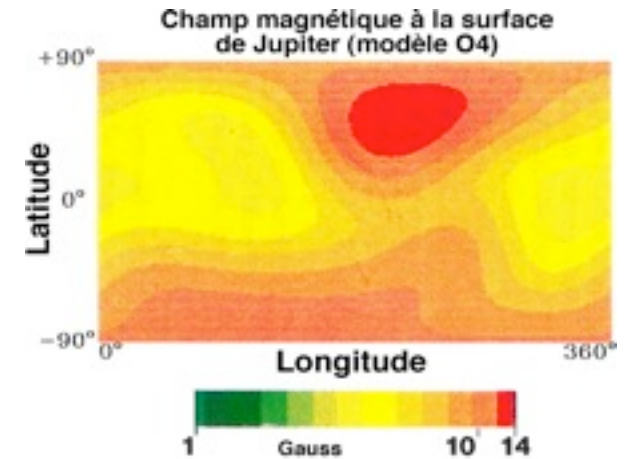
[Stone et al., 1992]



Champs magnétiques de Jupiter et Saturne

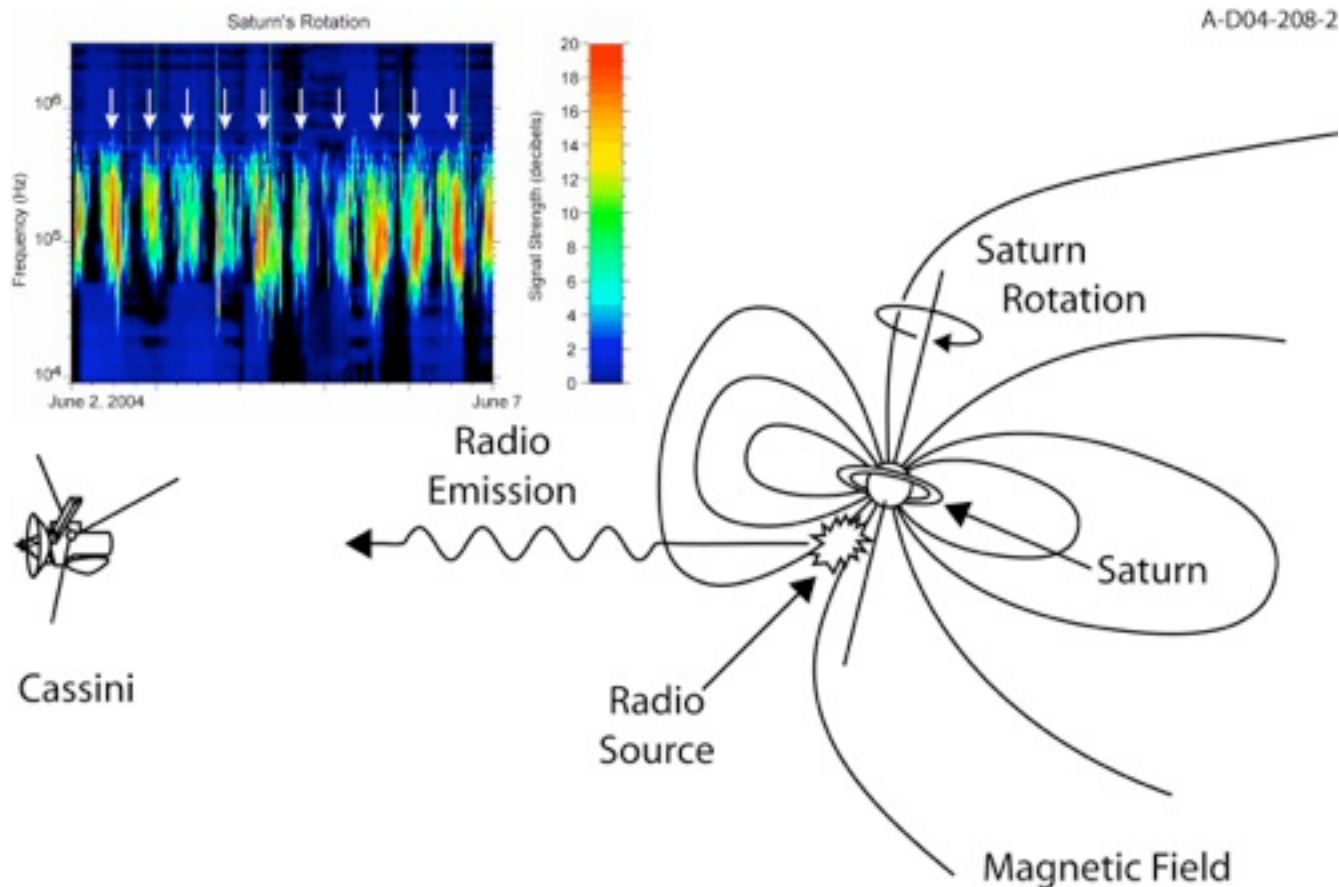
Planète	Jupiter	Jupiter	Jupiter	Saturne	Saturne
R_p (km)	71372	71372	71372	60330	60330
Modèle	O4	O6	VIP4	Z3	SPV
g_1^0 (G)	+4.218	+4.24202	+4.20543	+0.21535	+0.21160
g_1^1	-0.664	-0.65929	-0.65920	0	0
h_1^1	+0.264	+0.24116	0.24992	0	0
g_2^0	-0.203	-0.02181	-0.05118	+0.01642	+0.01560
g_2^1	-0.735	-0.71106	-0.61904	0	0
h_2^1	-0.469	-0.40304	-0.36052	0	0
g_2^2	+0.513	+0.48714	+0.49690	0	0
h_2^2	+0.088	+0.07179	+0.05250	0	0
g_3^0	-0.233	+0.07565	-0.01576	+0.02743	+0.02320
g_3^1	-0.076	-0.15493	-0.52036	0	0
h_3^1	-0.580	-0.38824	-0.08804	0	0
g_3^2	+0.168	+0.19775	+0.24386	0	0
h_3^2	+0.487	+0.34243	+0.40829	0	0
g_3^3	-0.231	-0.17958	-0.17597	0	0
h_3^3	-0.294	-0.22439	-0.31586	0	0
M^l dipolaire ($G.R_p^3$)	4.22	4.26	4.27	0.215	0.212
Inclinaison (B / Ω)	-9.6°	-9.6°		-0°	-0°
Offset centre dipôle / centre planète (R_p)	0.07	0.07		0.04	0.04

[Connerney et al., 1981; Connerney, 1992;
Connerney et al., 1982, 1998; Davis & Smith,
1990]



Modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne

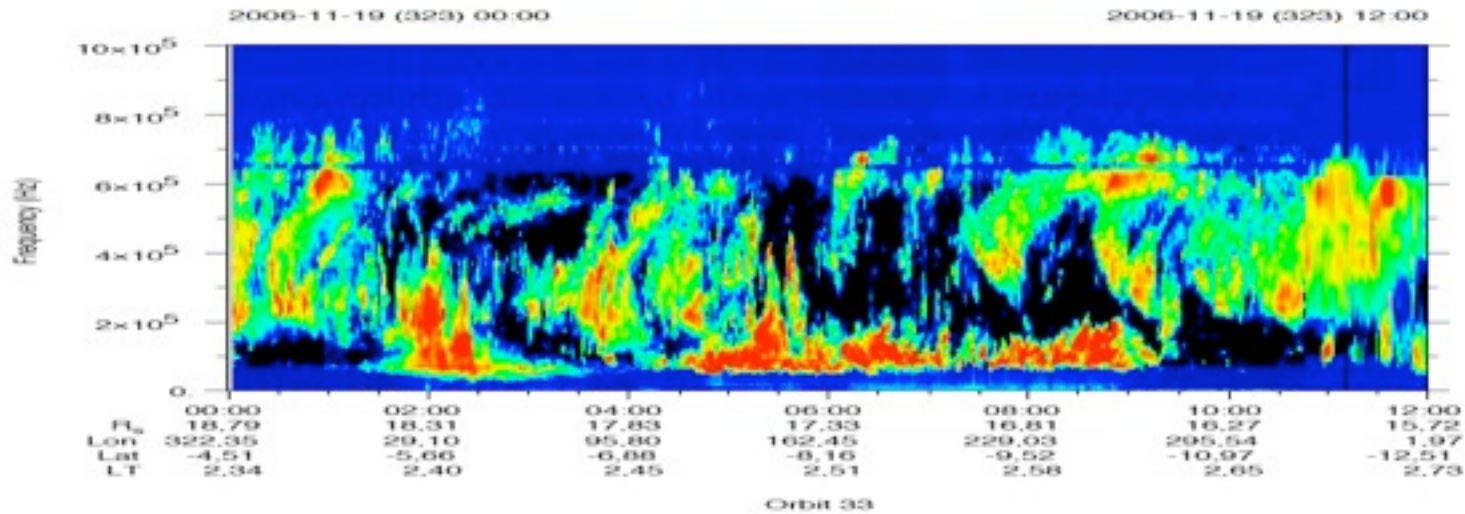
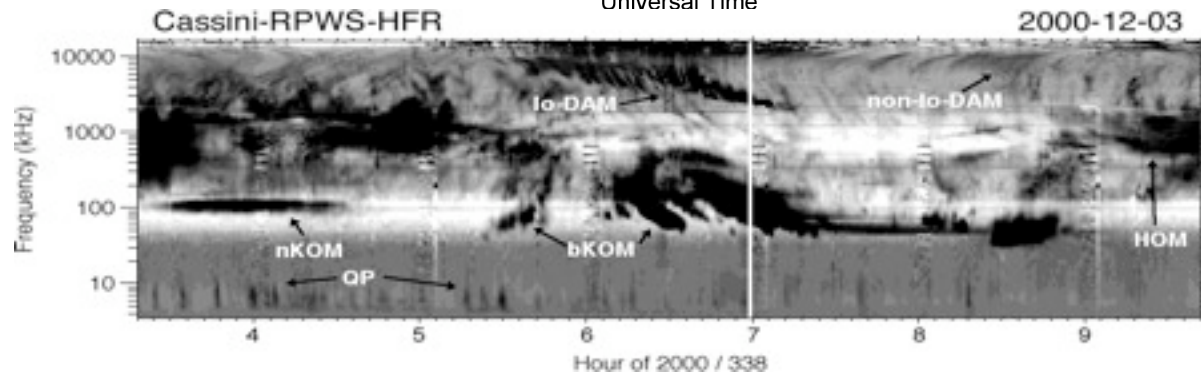
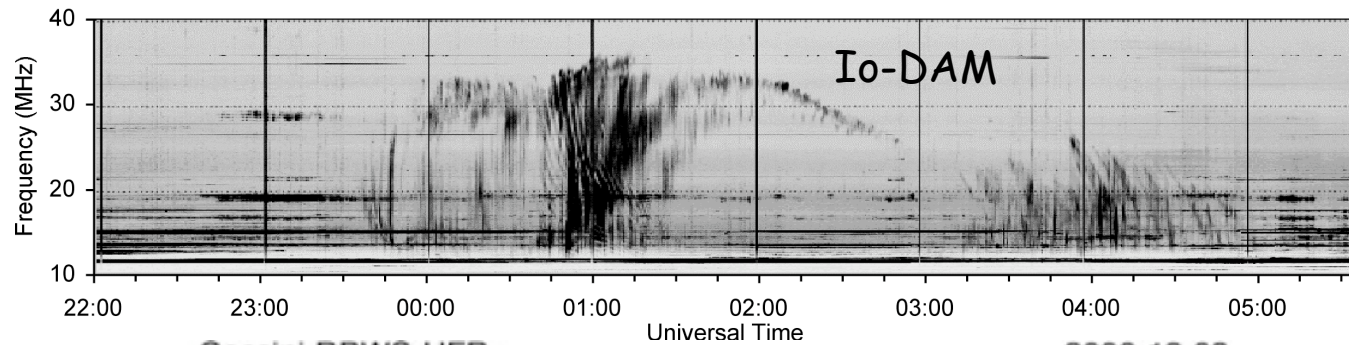
- Emissions radio, flux de particules énergétiques ... modulés à ~10h40m @ Saturne, malgré un champ magnétique en apparence axisymétrique
⇒ Diagnostic du champ magnétique et de la rotation planétaires via les émissions radio magnétosphériques



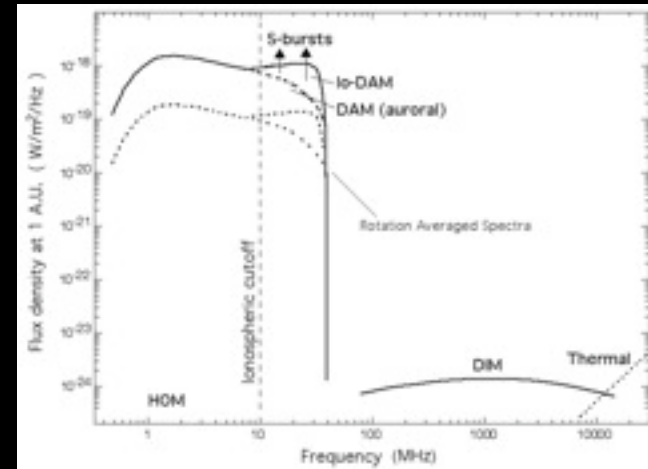
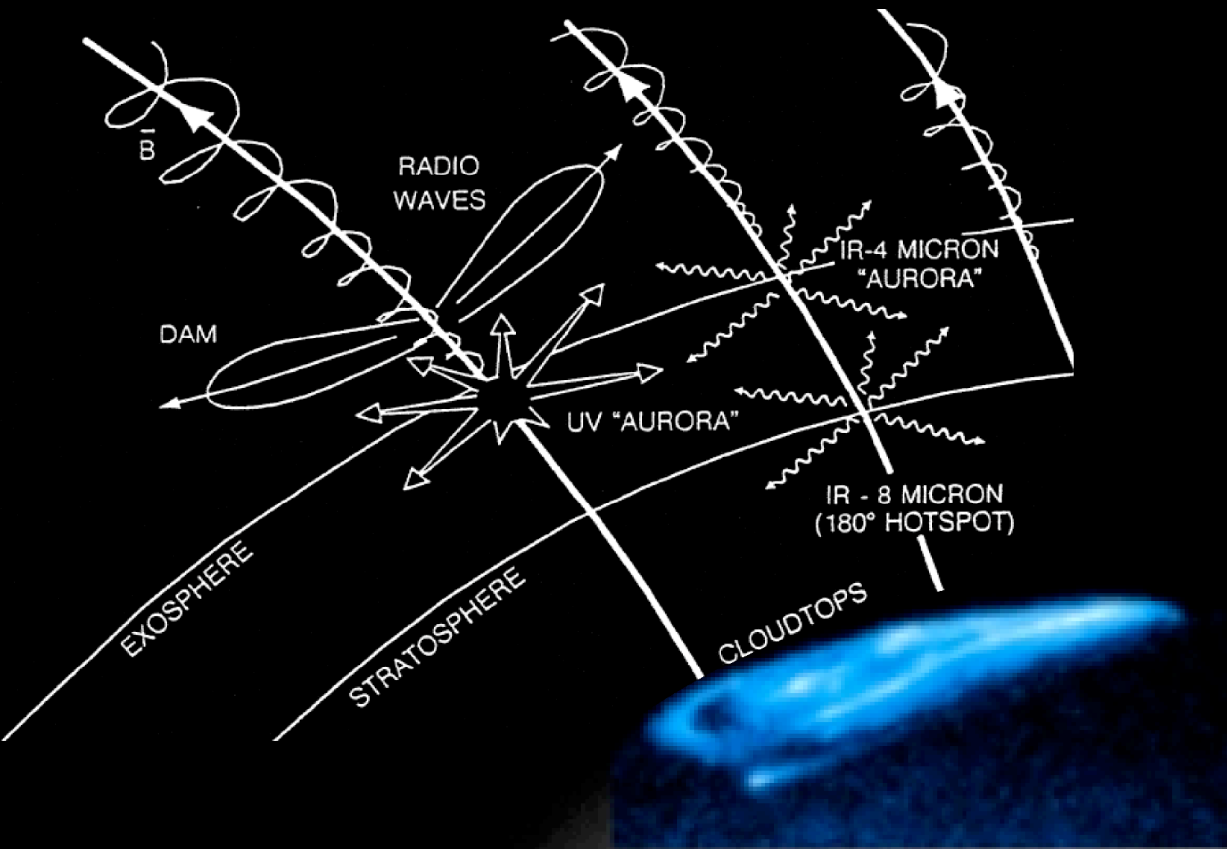
- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

Emissions radio BF de Jupiter et Saturne

JUPITER 1991 Jan1 (Ionospheric conditions : winter - early morning)

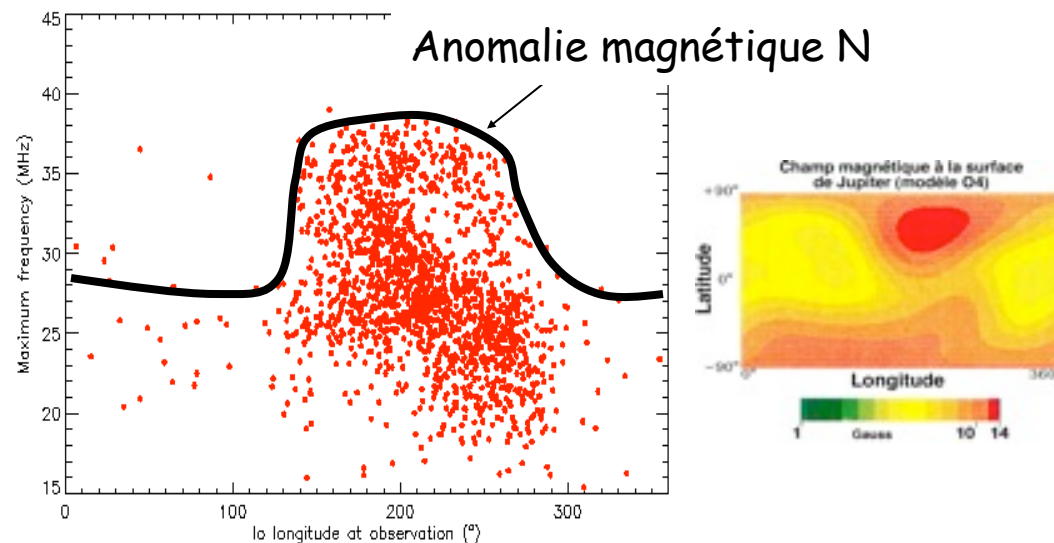
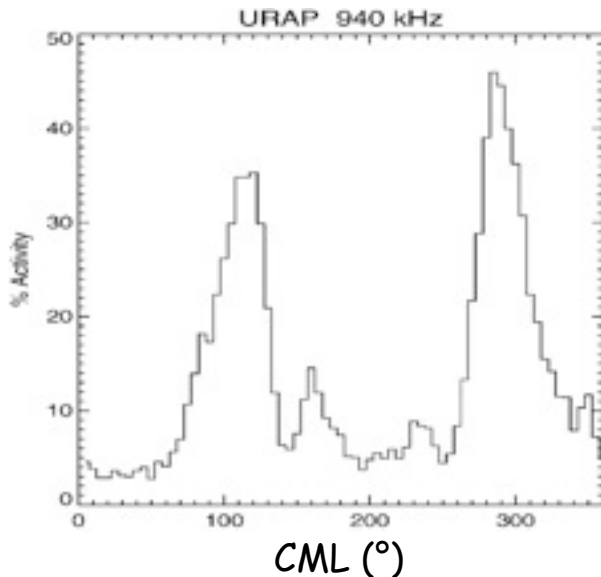


Jupiter : émissions radio



Jupiter : émissions radio

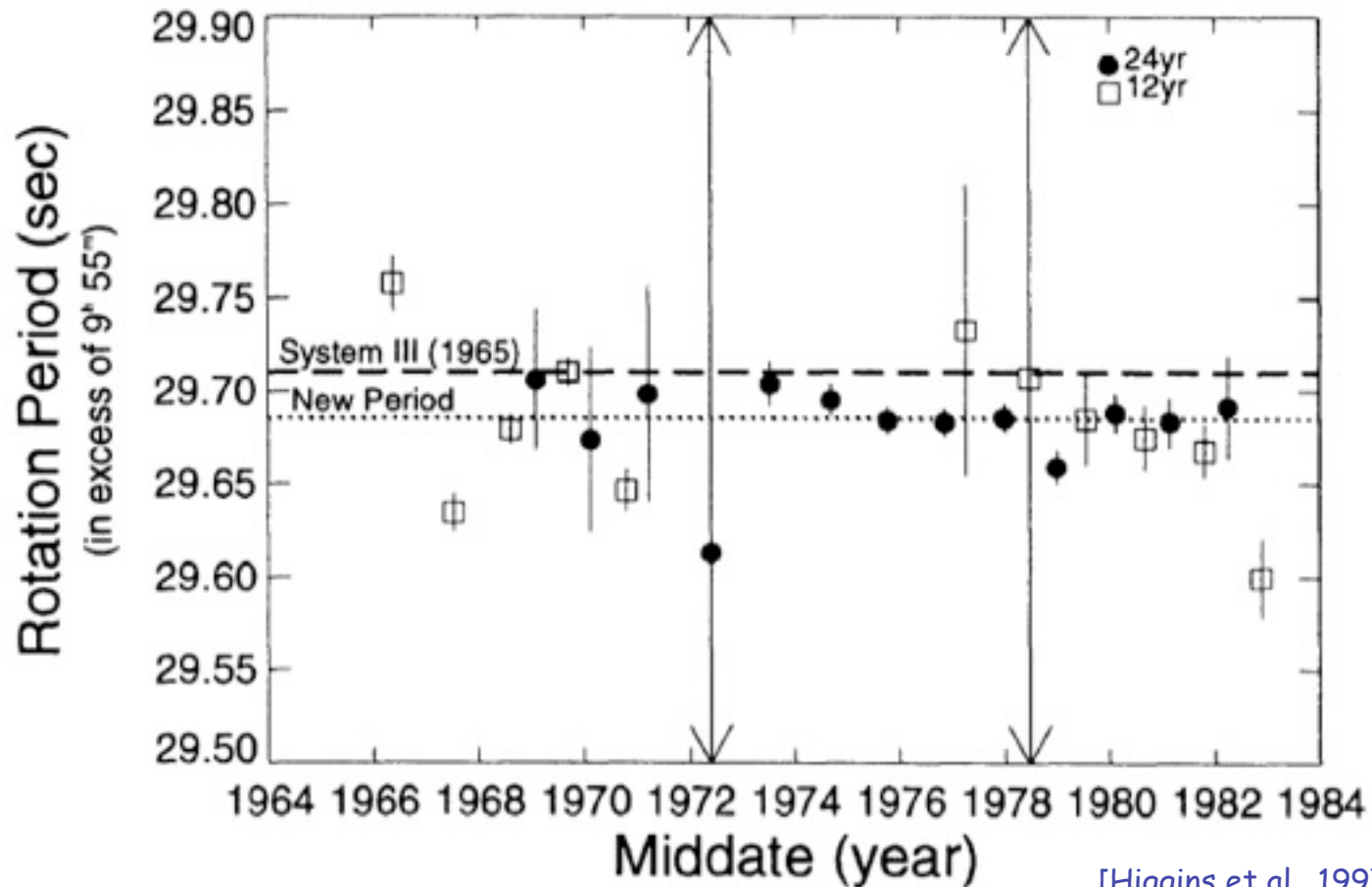
- émissions radio BF très intenses ($T_B > 10^{15}$ K)
- $f \sim f_{ce}$, $\Delta f \sim f$, polarisation $\sim 100\%$ circulaire/elliptique (mode X)
- sources aurorales N & S, où $f_{pe} \ll f_{ce}$
- émission à 30° - 90° / B source
- corrélation avec les aurores UV
 $\Rightarrow$ instabilité Maser-Cyclotron
- modulation par satellites (Io), (Vent Solaire, chocs IP)
- modulation par (co)rotation planétaire $\equiv$ faisceau tournant de phare



Jupiter : rotation

- analyse de 24 ans d'observations radio « sol »

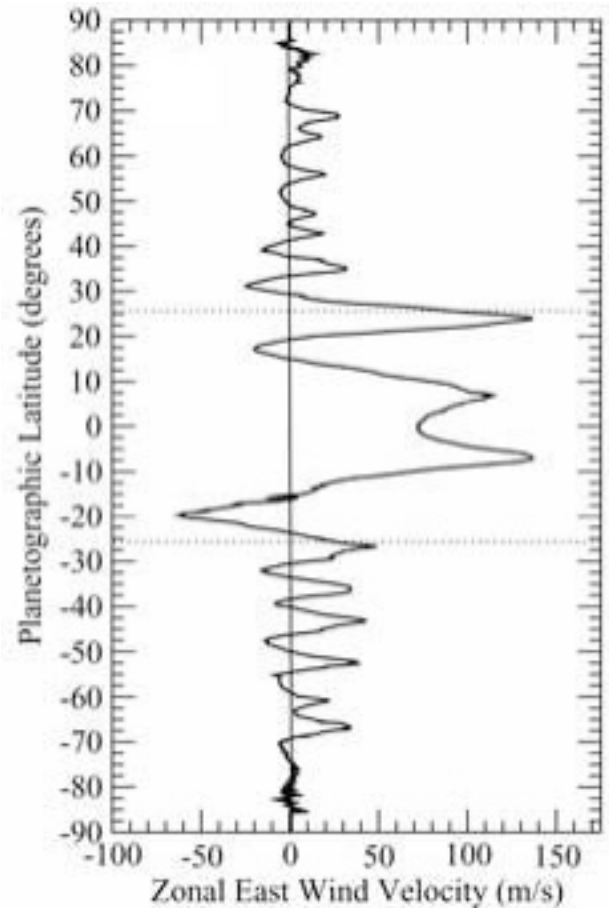
$$\Rightarrow P_{\text{DAM}} = 9\text{h } 55\text{m } 29.685\text{s} \pm 0.04\text{s} \quad (\sim 10^{-6})$$



[Higgins et al., 1997]

Jupiter : rotation

⇒ Profil des vitesses des vents atmosphériques



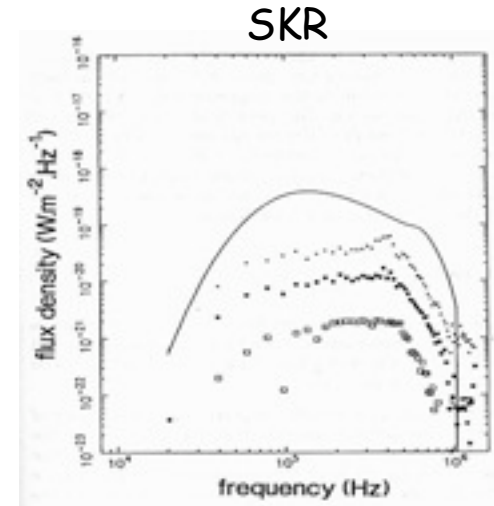
[Vasavada & Showman, 2005]

- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

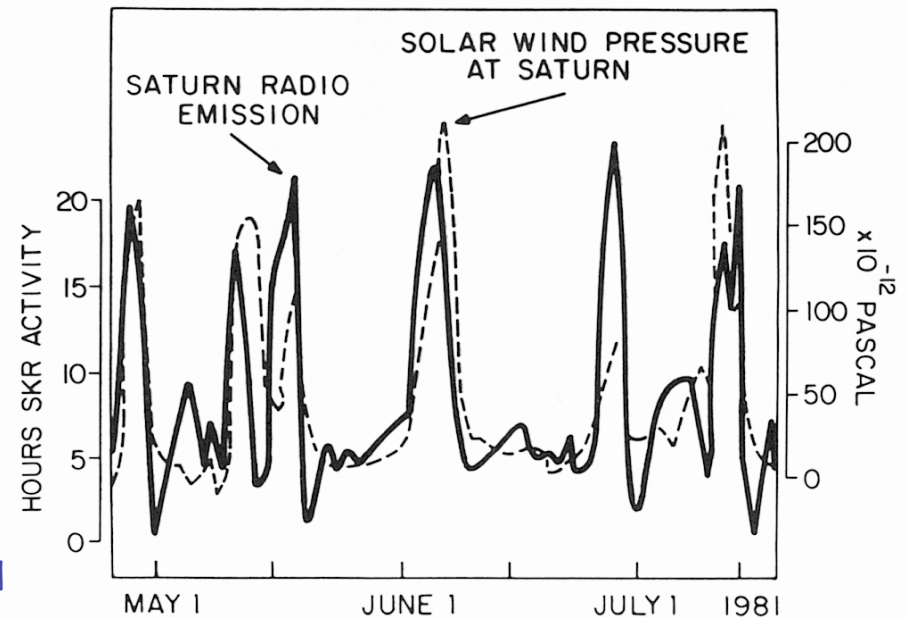
Saturne : émissions radio

- idem Jupiter $\Rightarrow$ instabilité Maser-Cyclotron

[Galopeau, Zarka, LeQuéau, 1989]



- modulation par Vent Solaire (ρV^2 , ρV^3), chocs IP, (satellites ?)

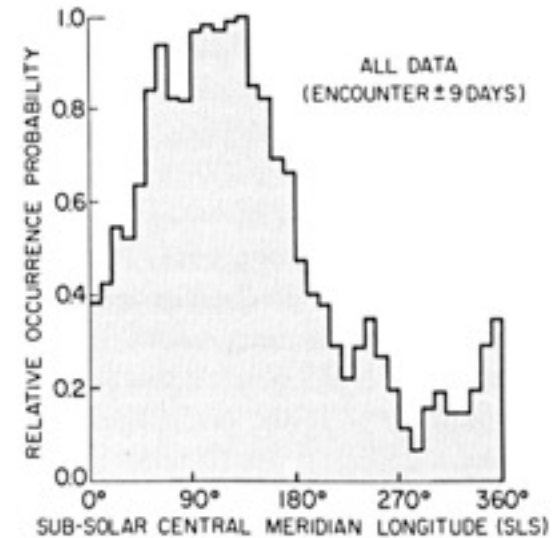
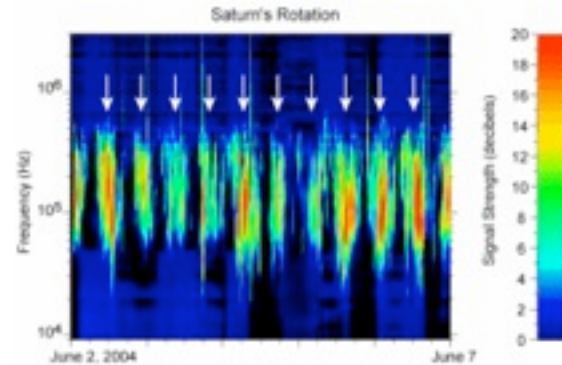
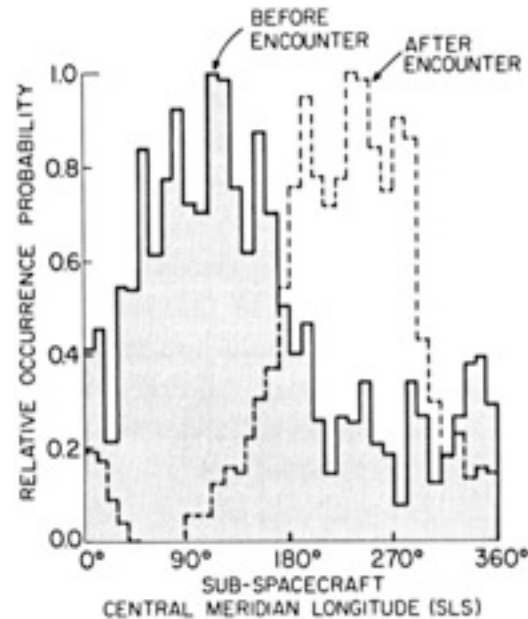
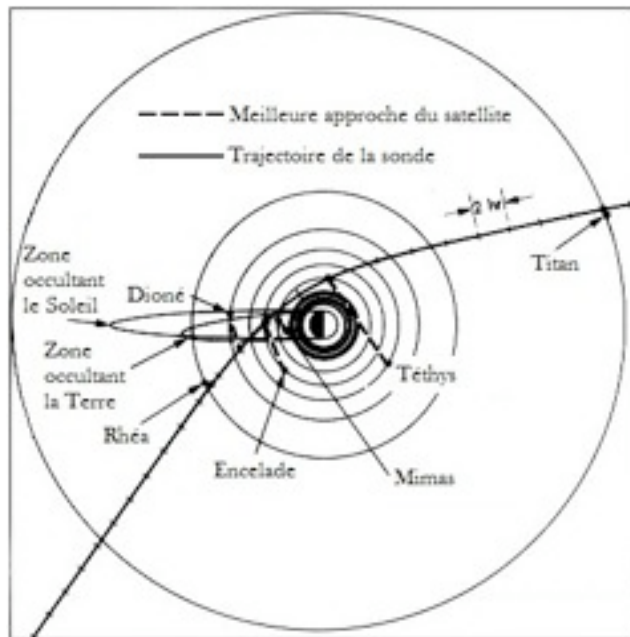


[Desch, 1982 ; Desch & Rucker, 1983]

Saturne : émissions radio

- modulation à la rotation planétaire $\equiv$ stroboscope

Voyager 1

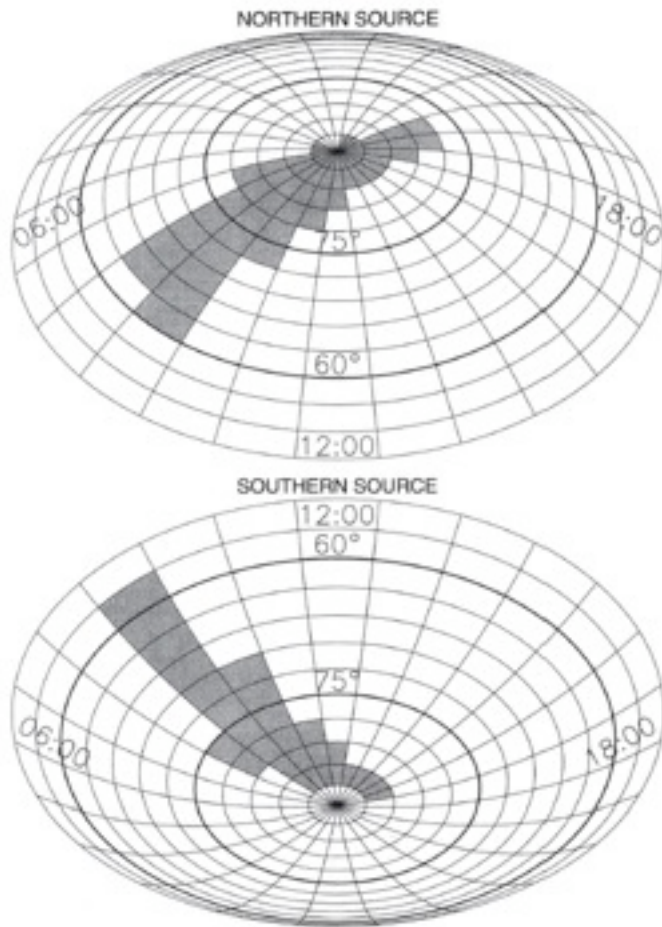


[Warwick et al., 1981]

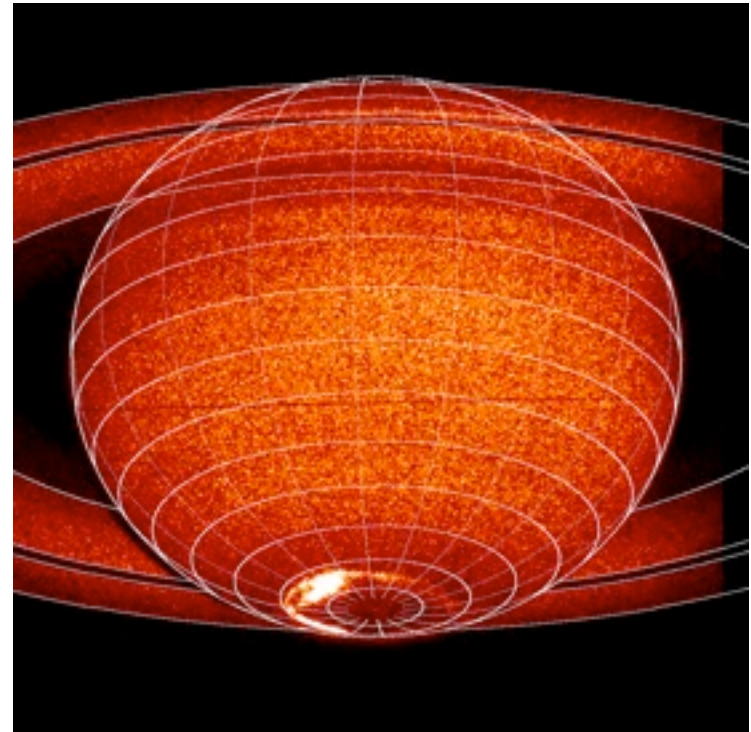
Saturne : radiosources

- modulation à la rotation planétaire $\equiv$ stroboscope

(les sources du SKR ne sont pas en corotation $\Rightarrow$ limitées au secteur matin-midi, idem aurores UV)



[Galopeau, Zarka, LeQuéau, 1995]

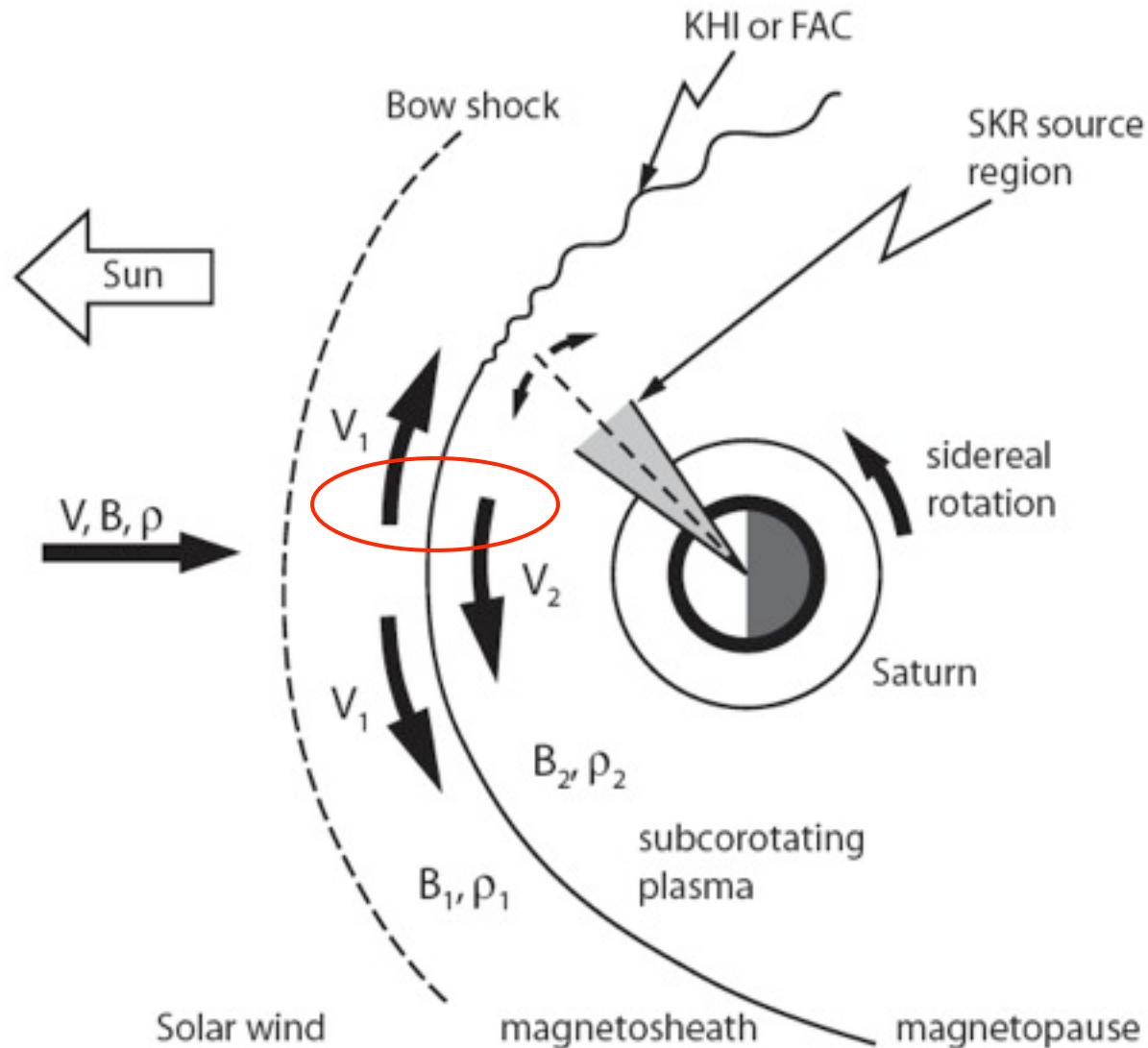


[Prangé et al., 2004]

Saturne : radiosources

- accélération des électrons liée au cisaillement de V in/out ?

[Galopeau et al., 1995; Cowley et al., 2004]

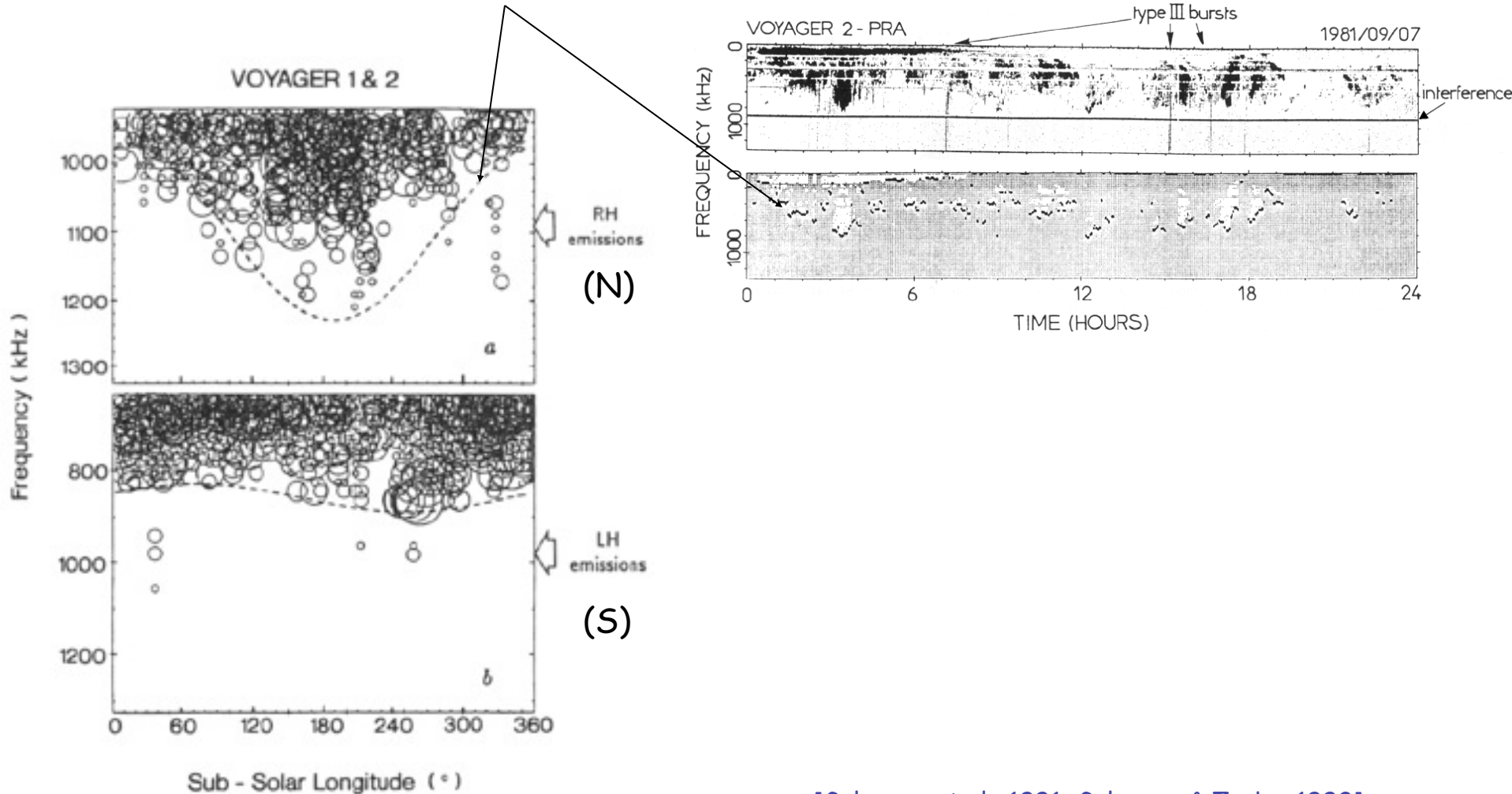


- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- mesure de $f_{\text{max-SKR}}(\text{longitude})$

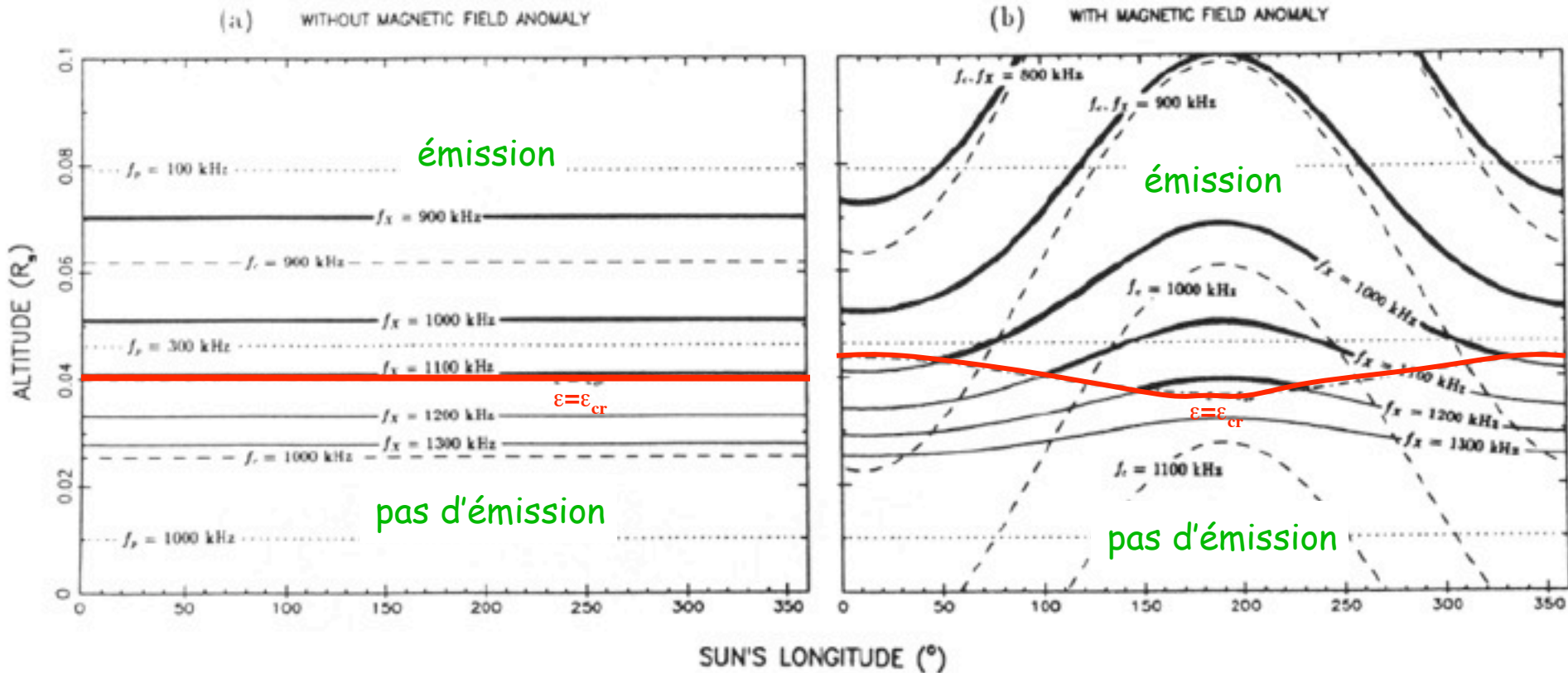


Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- interprétation de $f_{\text{max-SKR}}(\text{longitude})$ / instabilité Maser cyclotron

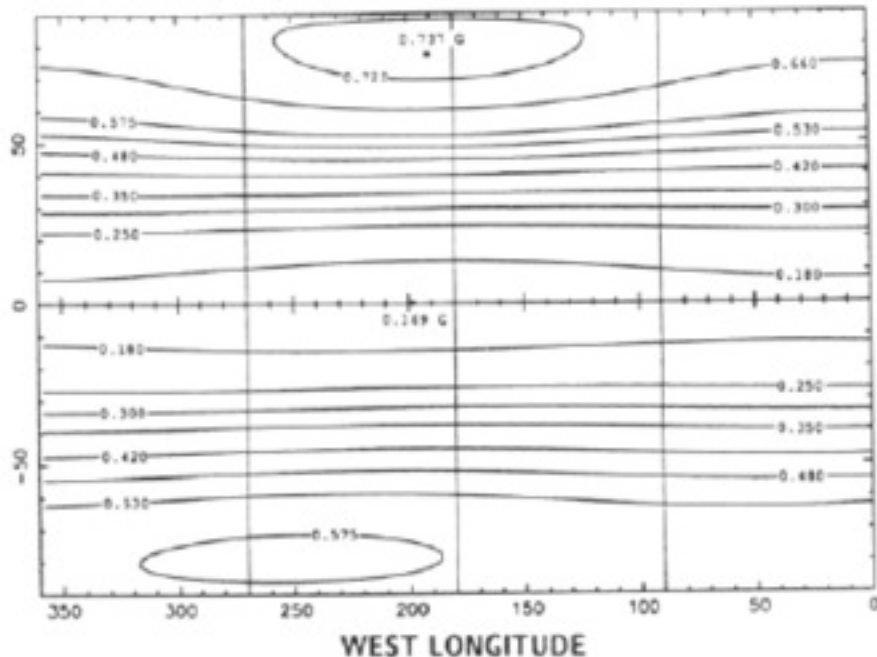
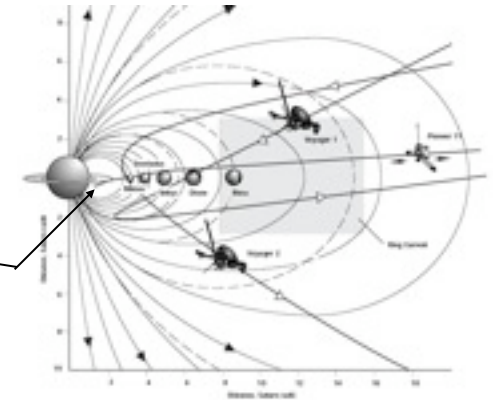
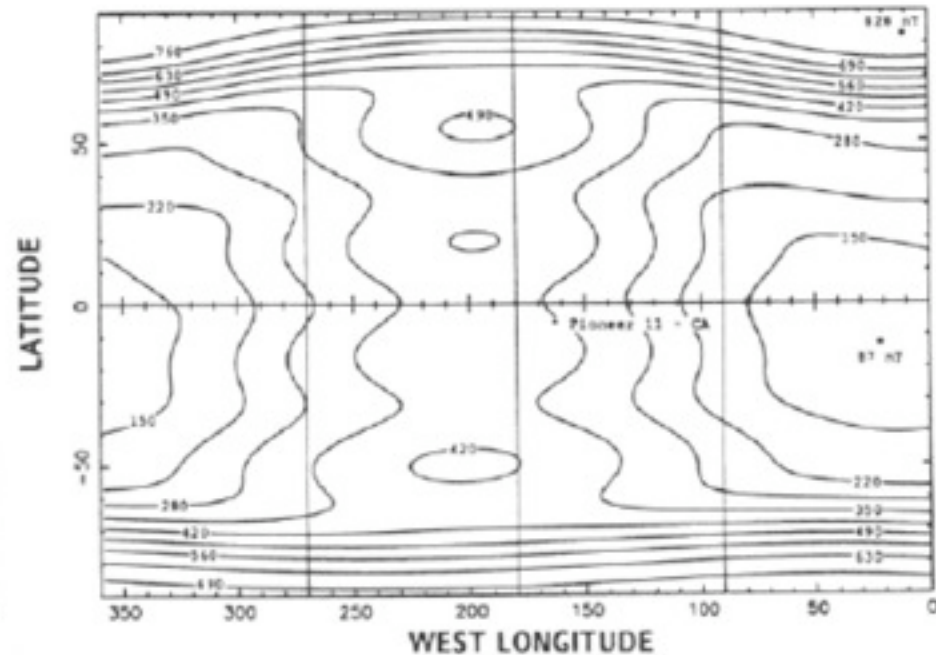
$$[\epsilon = f_{\text{pe}}^2 / f_{\text{ce}}^2 \leq (\epsilon_{\text{cr}} = 0.02-0.15)]$$



Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- résidus élevés (~350 nT) @ CA Pioneer 11

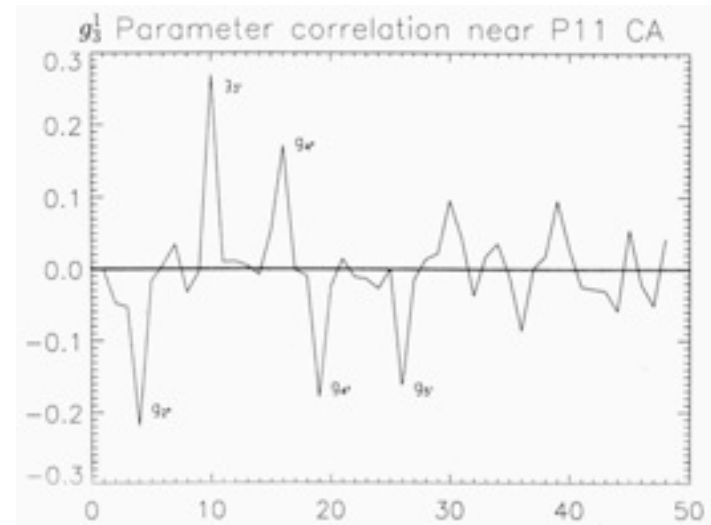
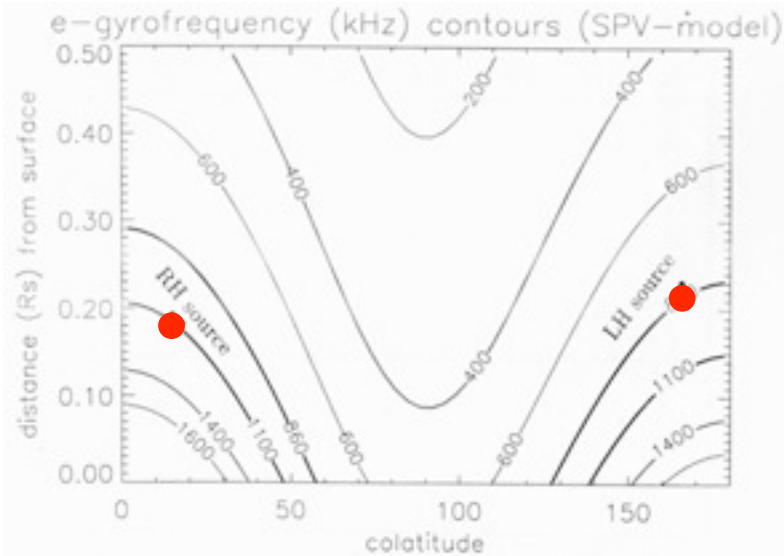
DEVIATION FROM Z_3 MODEL AT $1.35 R_S$ 

[« Comment » de Connerney & Desch, 1992;
« Reply » de Galopeau & Zarka, 1992]

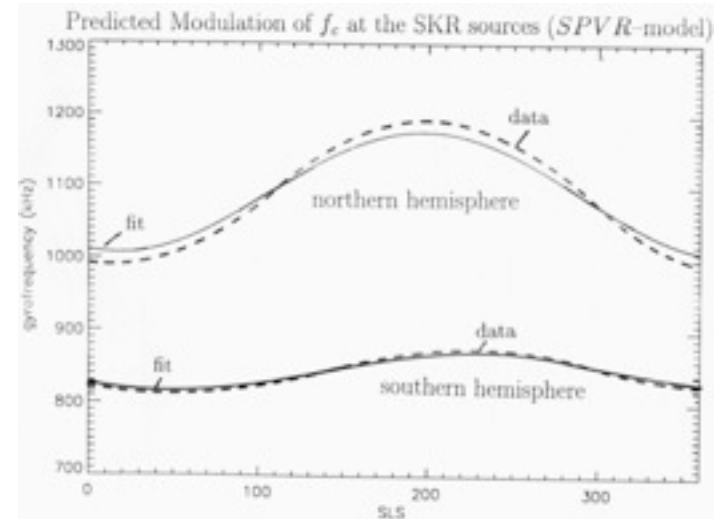
Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- réanalyse SVD des données magnétiques ⇒ modèle « SPV-R »



Modèle	SPV	SPV-R
g_1^0 (nT)	+21160	+21160
g_2^0	+1560	+1560
g_3^0	+2320	+2320
g_3^1	0	-300
g_4^1	0	-400
g_5^1	0	-500
g_6^1	0	-700
h_4^1	0	+200
h_6^1	0	+350

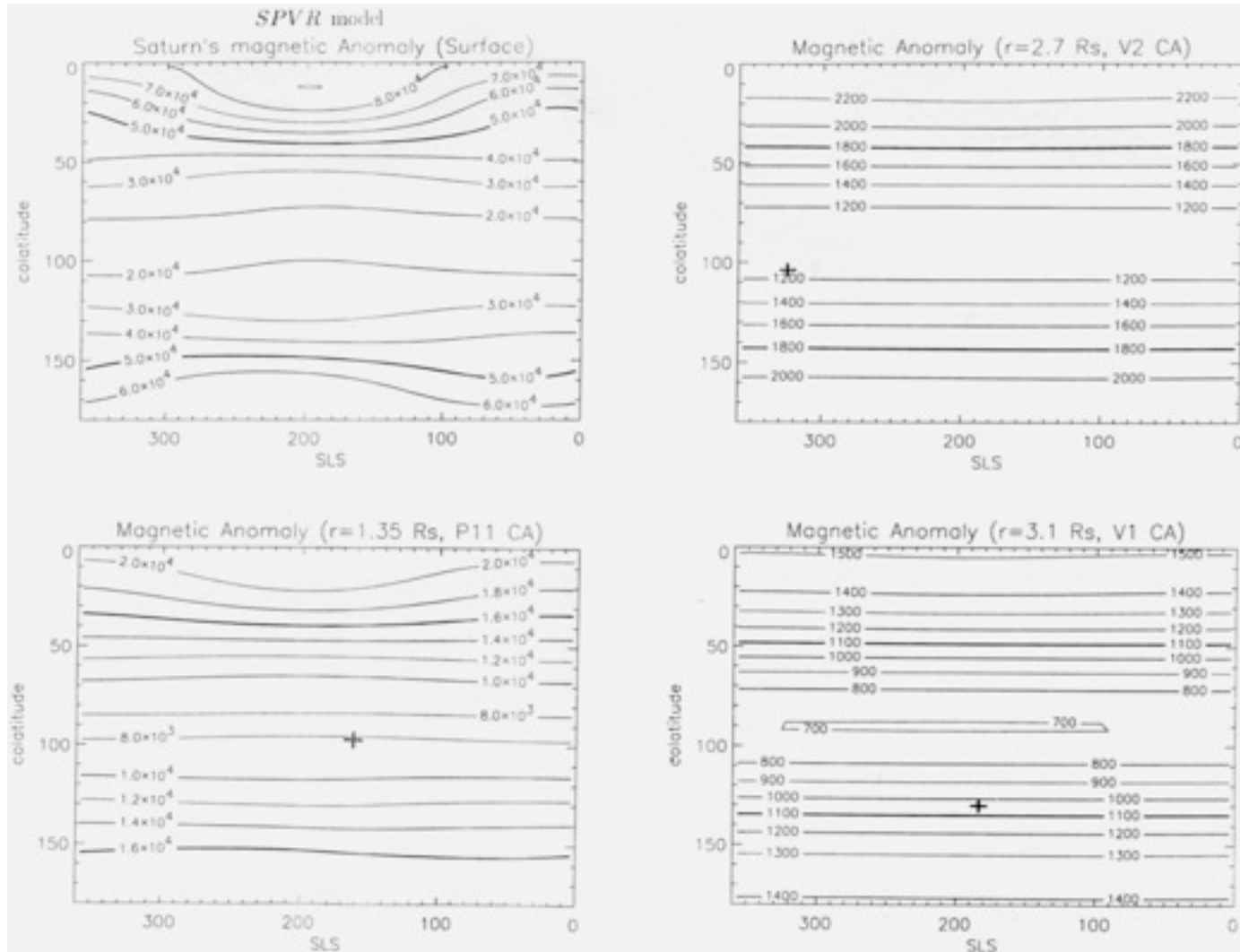


(Ladreitner, Zarka, Galopeau, 1994)

Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- réanalyse SVD des données magnétiques ⇒ modèle « SPV-R »

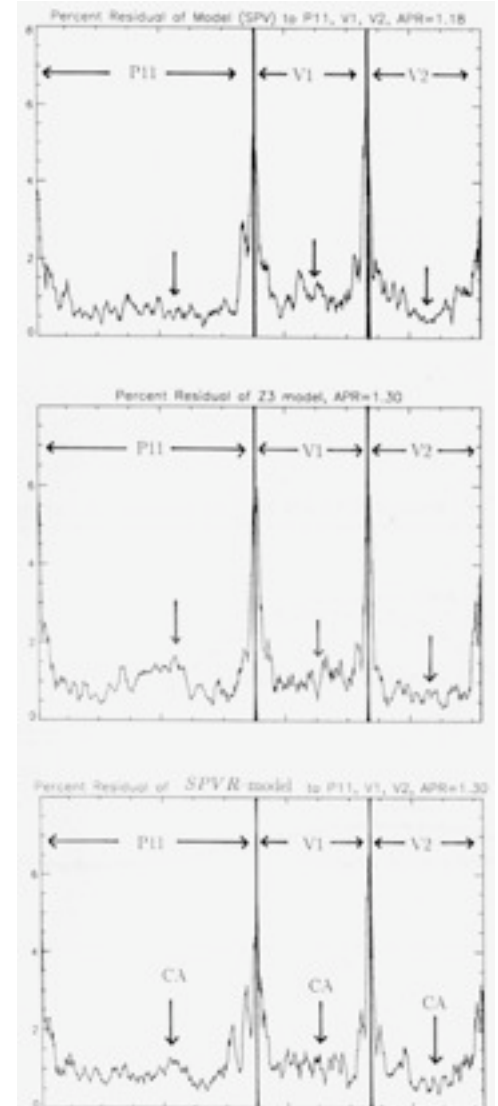
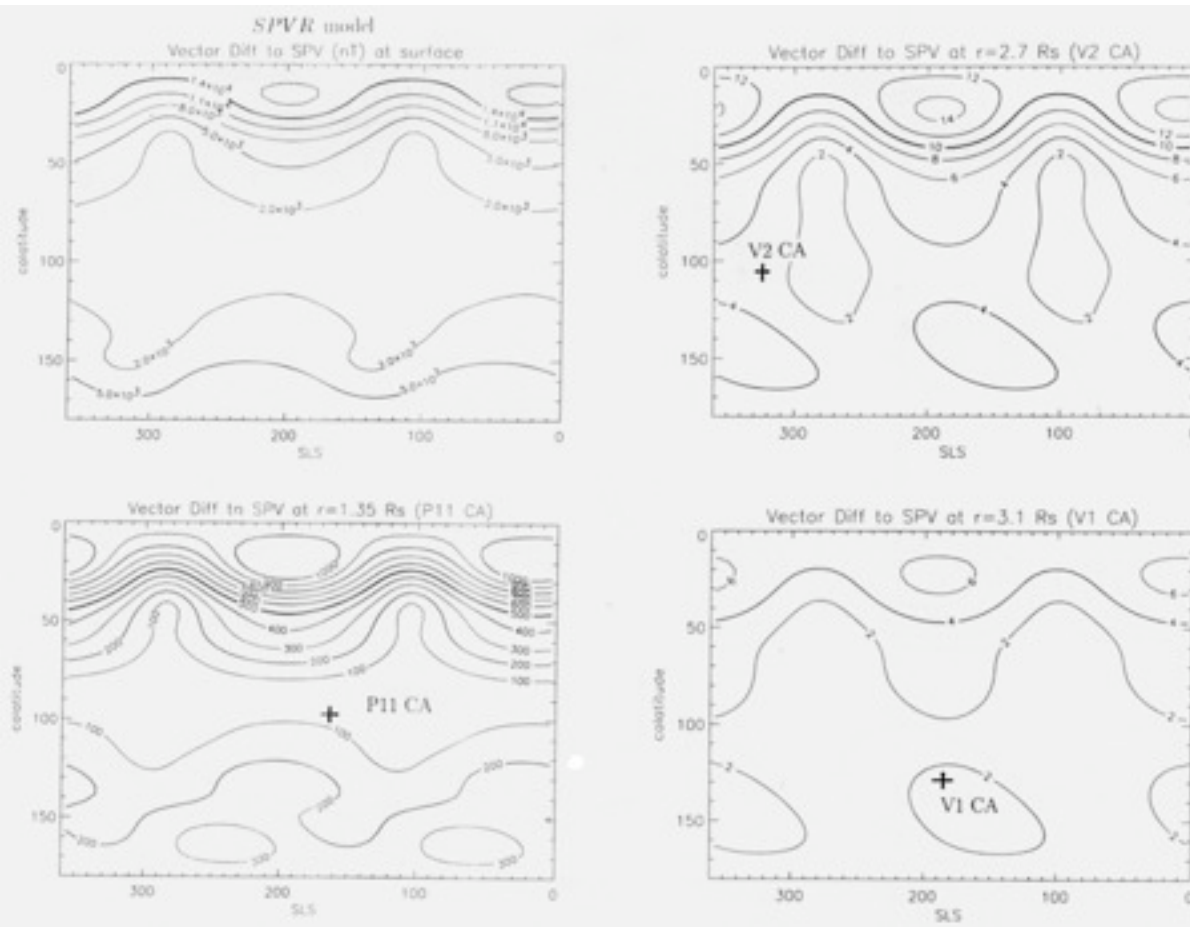


(Ladreitner, Zarka, Galopeau, 1994)

Première énigme : modulation rotationnelle @ Saturne

⇒ mise en évidence d'une anomalie magnétique ?

- réanalyse SVD des données magnétiques ⇒ modèle « SPV-R »

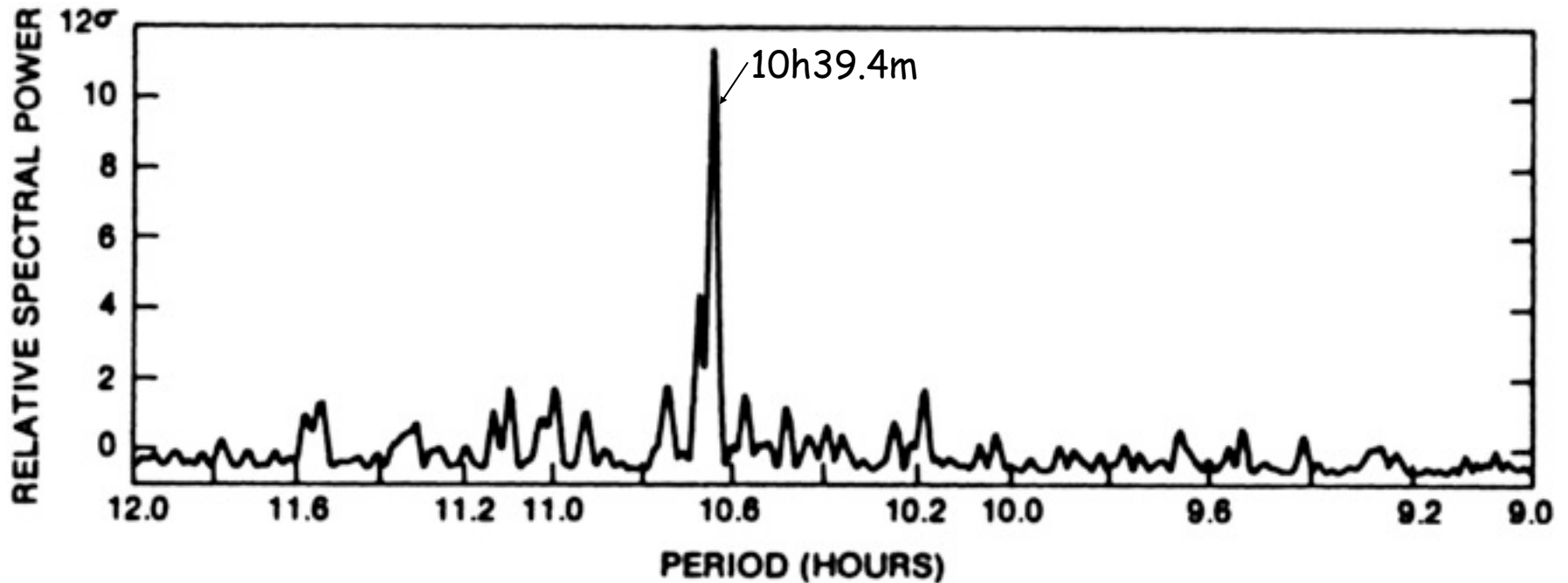


- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

Saturne : rotation

- analyse de 267 jours d'observations par Voyager 1

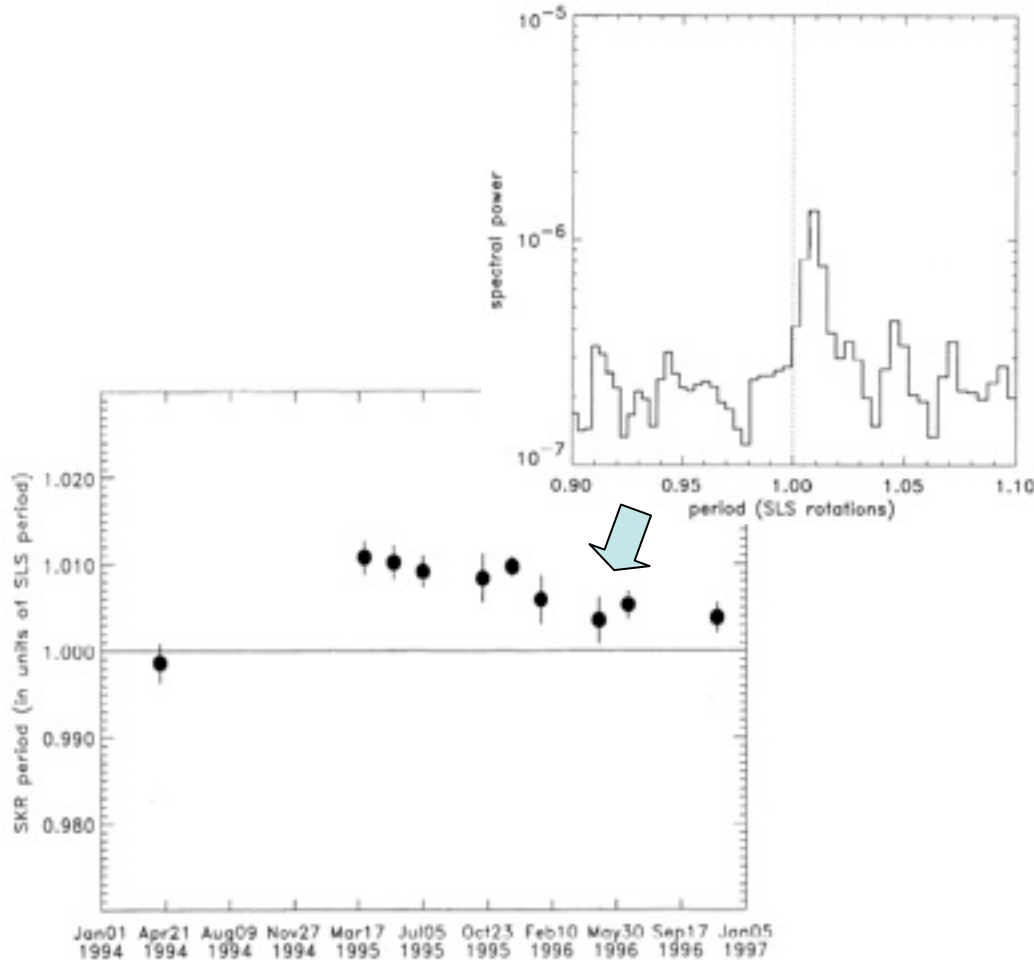
$$\Rightarrow P_{\text{SKR}} = 10\text{h } 39\text{m } 24\text{s} \pm 7\text{s} \quad (\sim 2 \times 10^{-4})$$



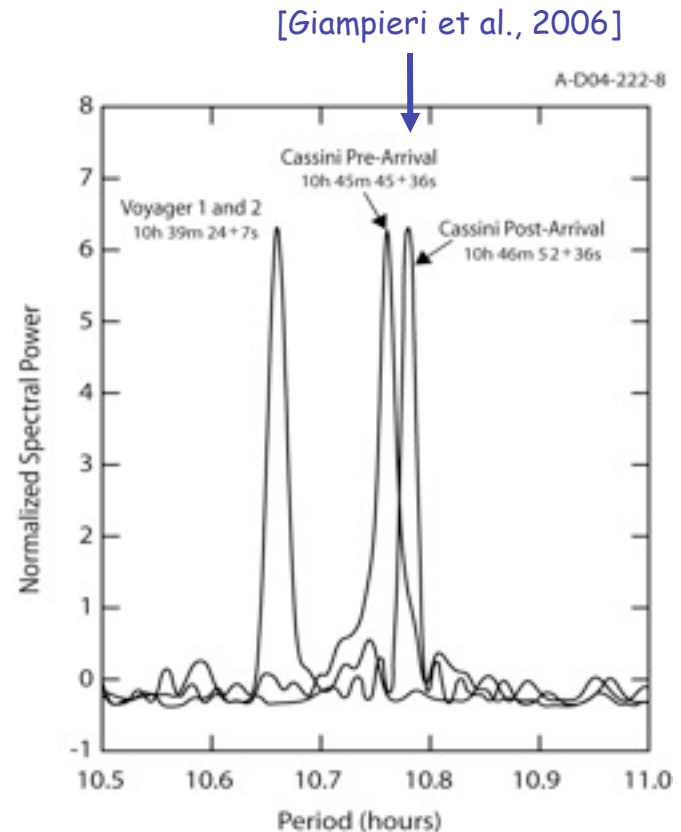
[Desch & Kaiser, 1981]

Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- analyse du SKR observé par Ulysses et Cassini
⇒ période radio variable $P_{\text{SKR}} (\sim 1\%)$



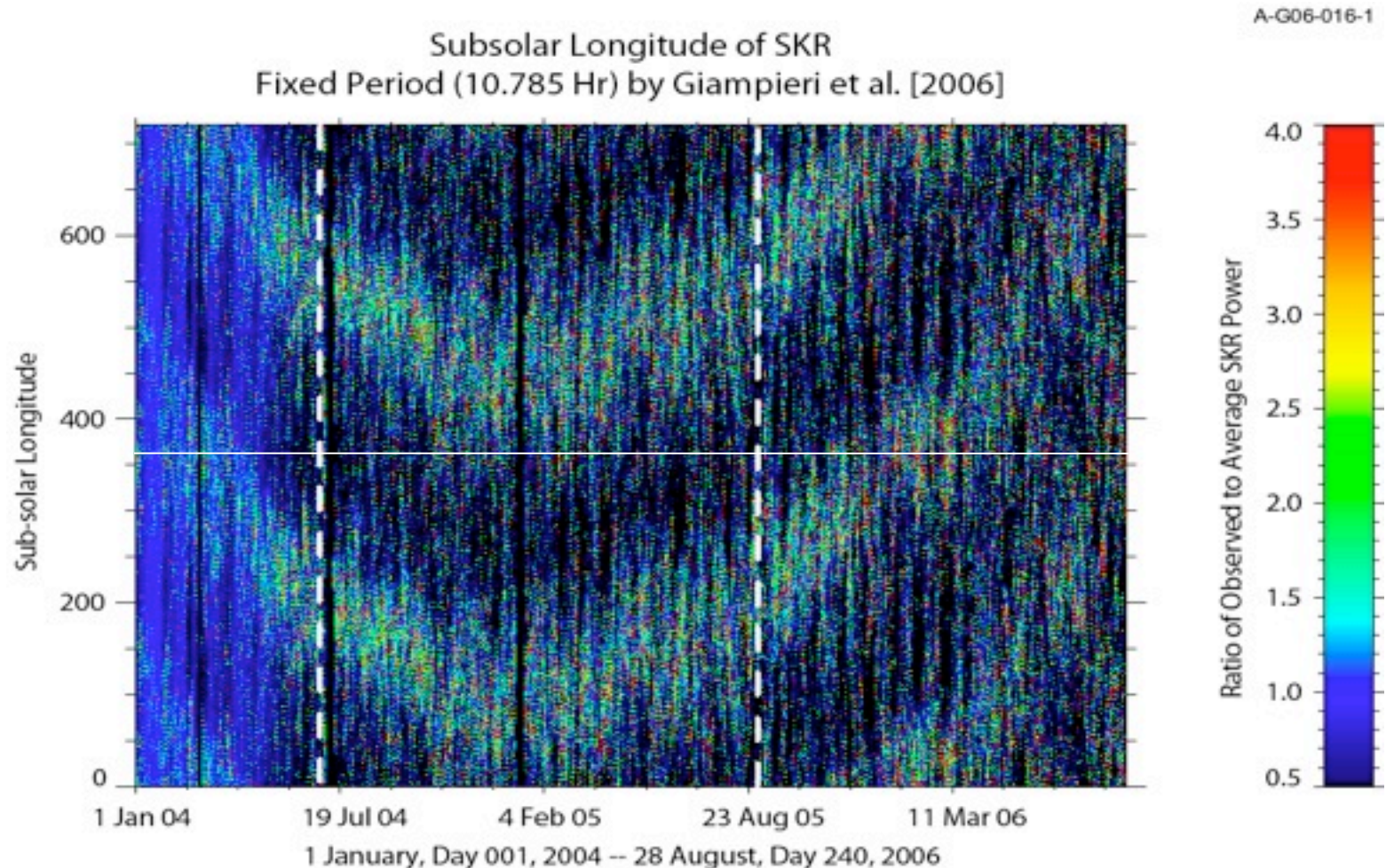
[Galopeau & Lecacheux, 2000]



[Gurnett et al., 2005]

Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

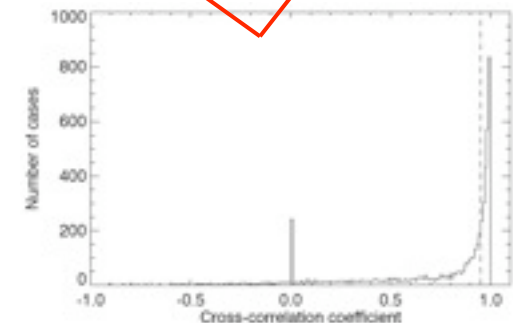
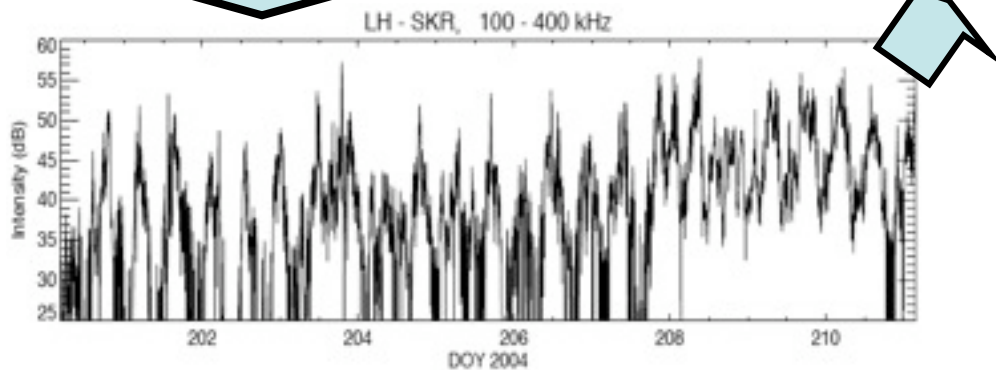
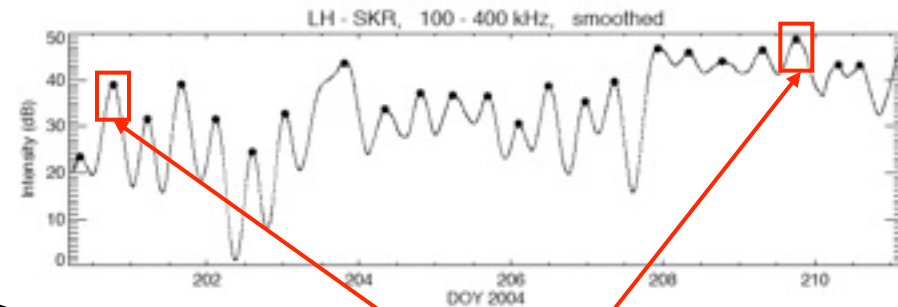
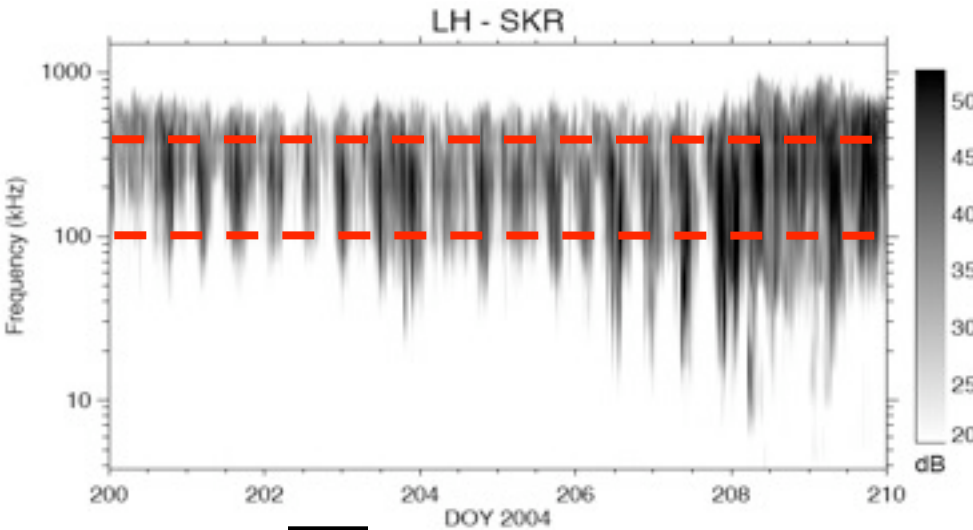
- origine des variations à long-terme de la période ?



[Kurth et al., 2006]

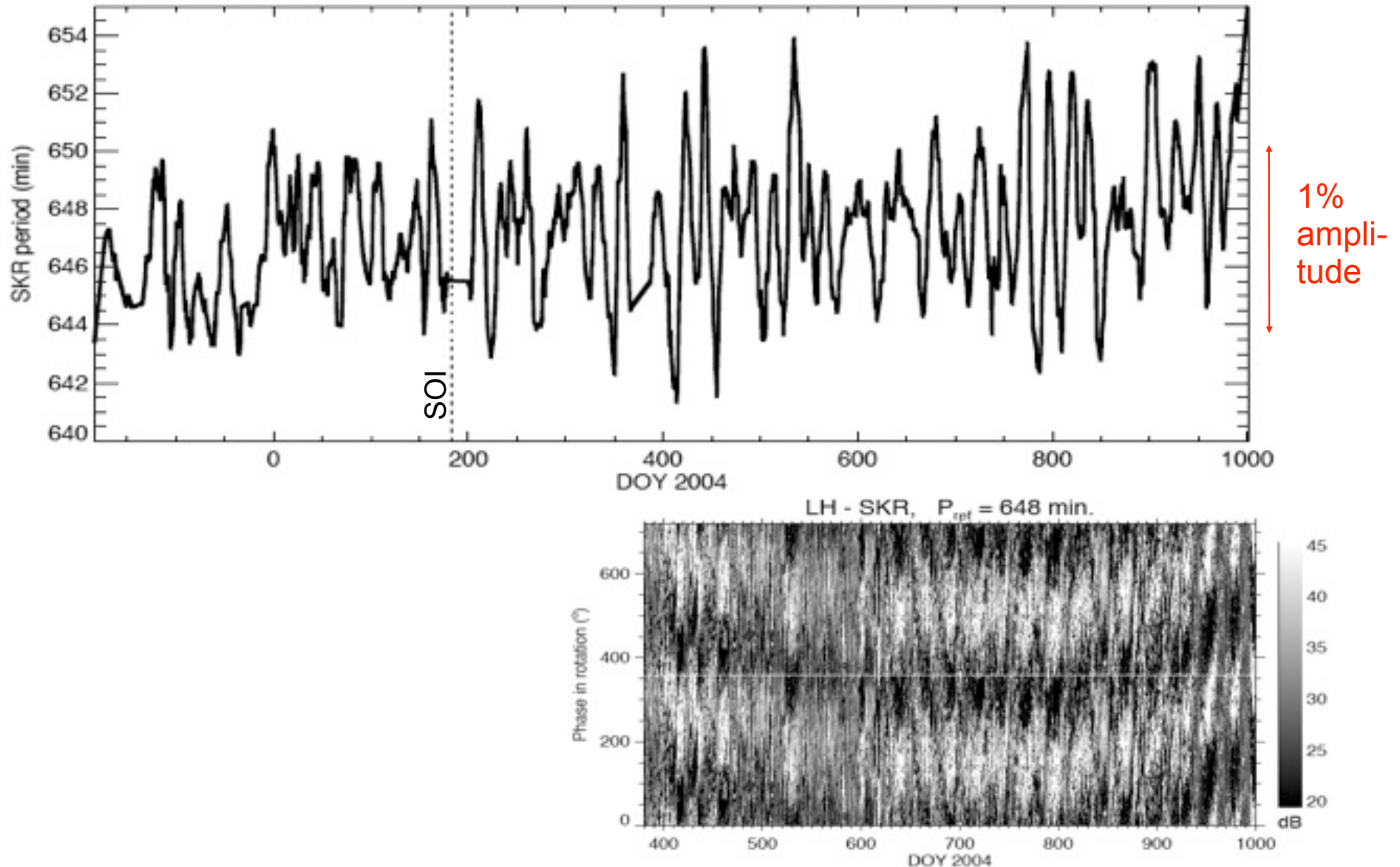
Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- analyse des variations à court-terme de la période :
 - intégration
 - lissage
 - maxima locaux
 - cross-corrélation



Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

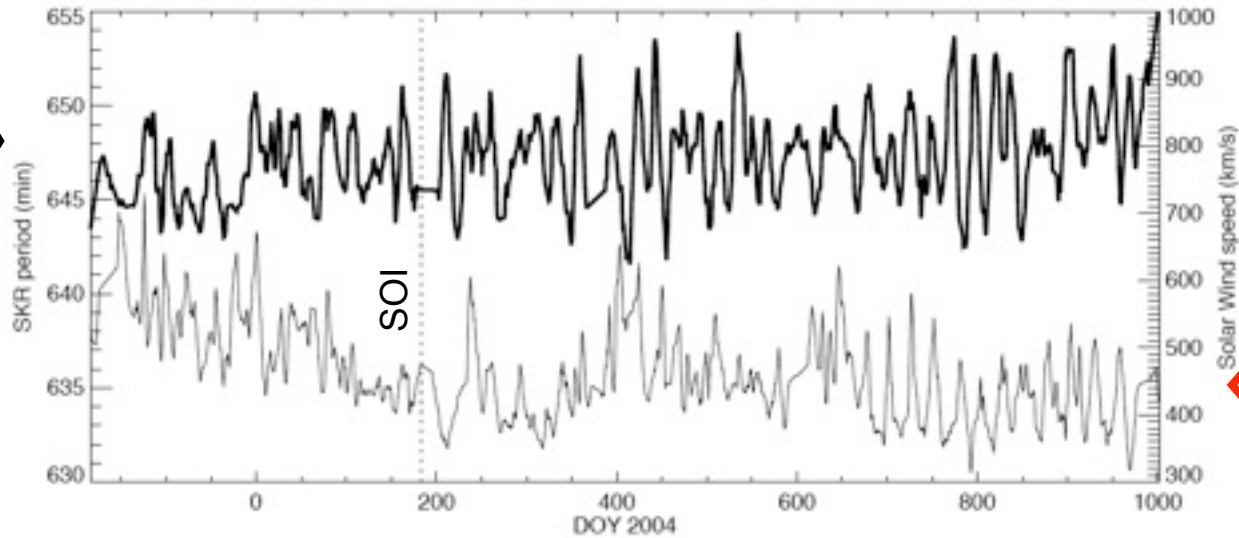
⇒ oscillations de P_{SKR} à 20-30 jours entre 1/7/2003 & 1/10/2006



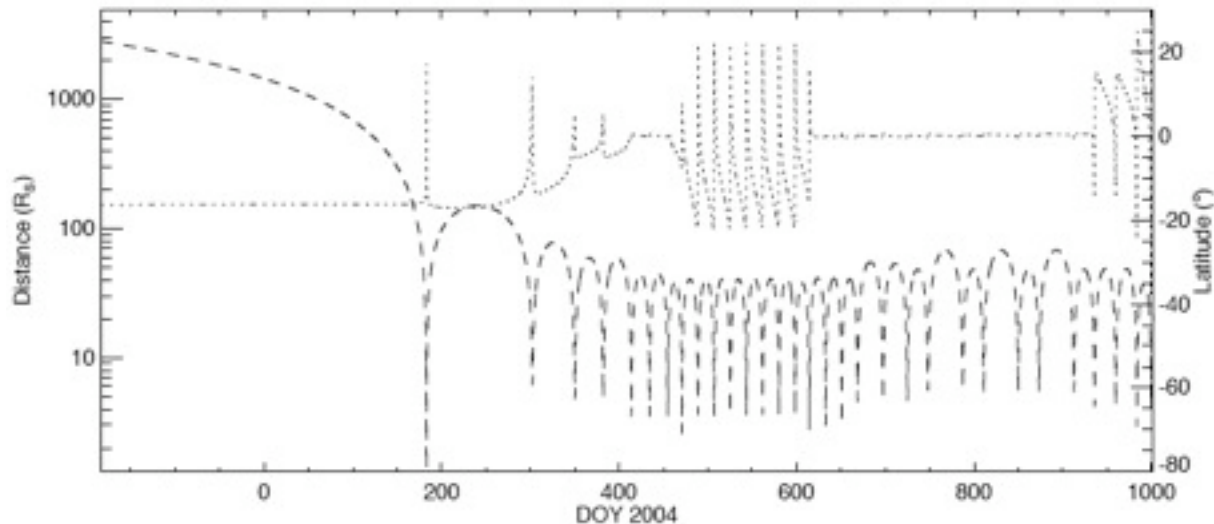
Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- origine de ces oscillations ?

P_{SKR} →



← V_{SW}
(proj. ballistique
depuis Wind)



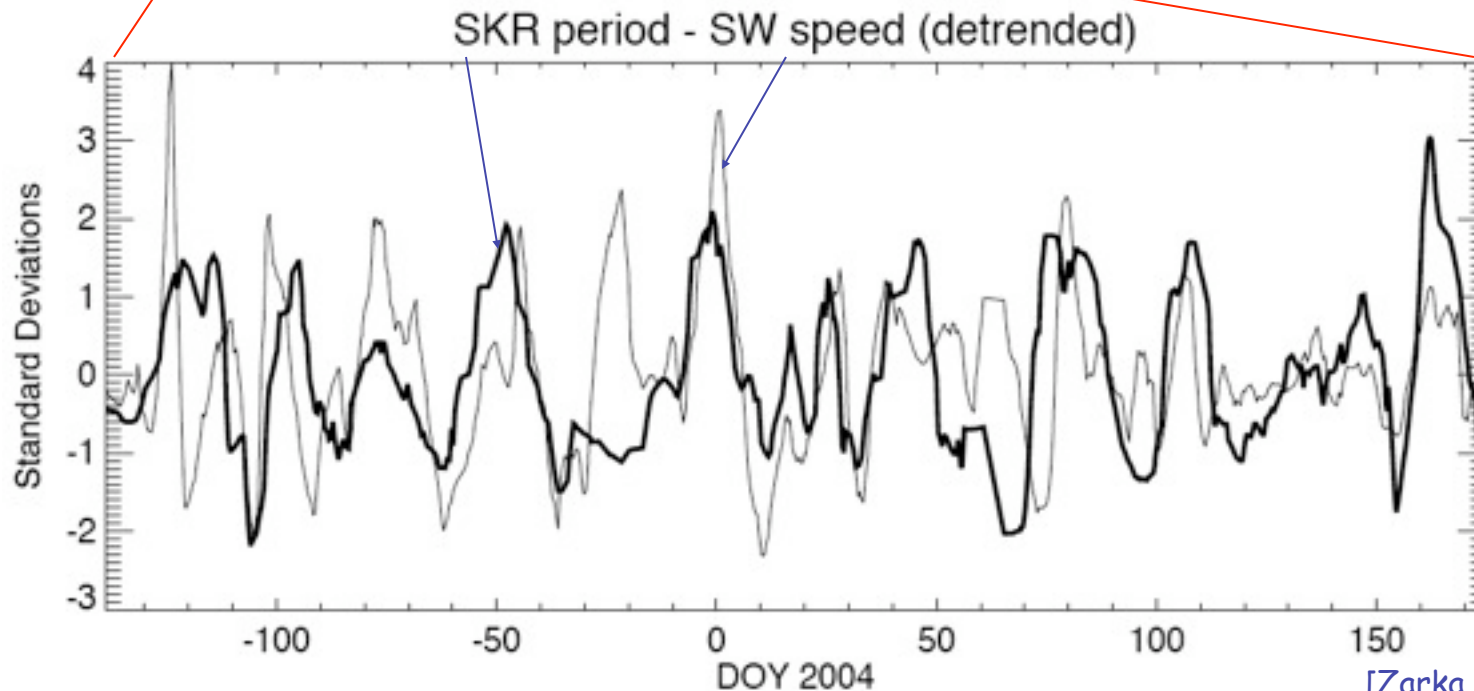
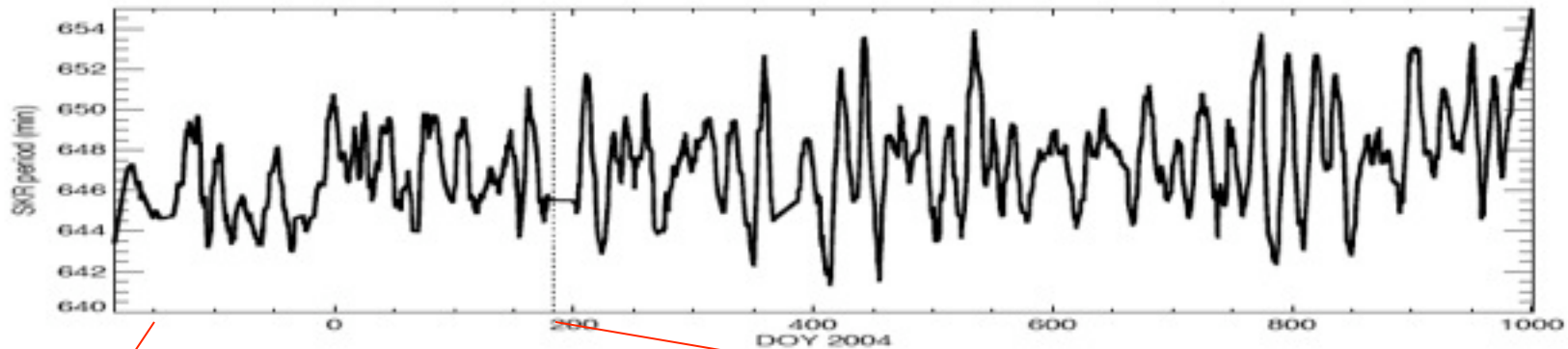
← Latitude

&

← Distance
de Cassini

Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- corrélation (P_{SKR}, V_{VS}) pre-SOI : $C=+0.4$, confiance=100%

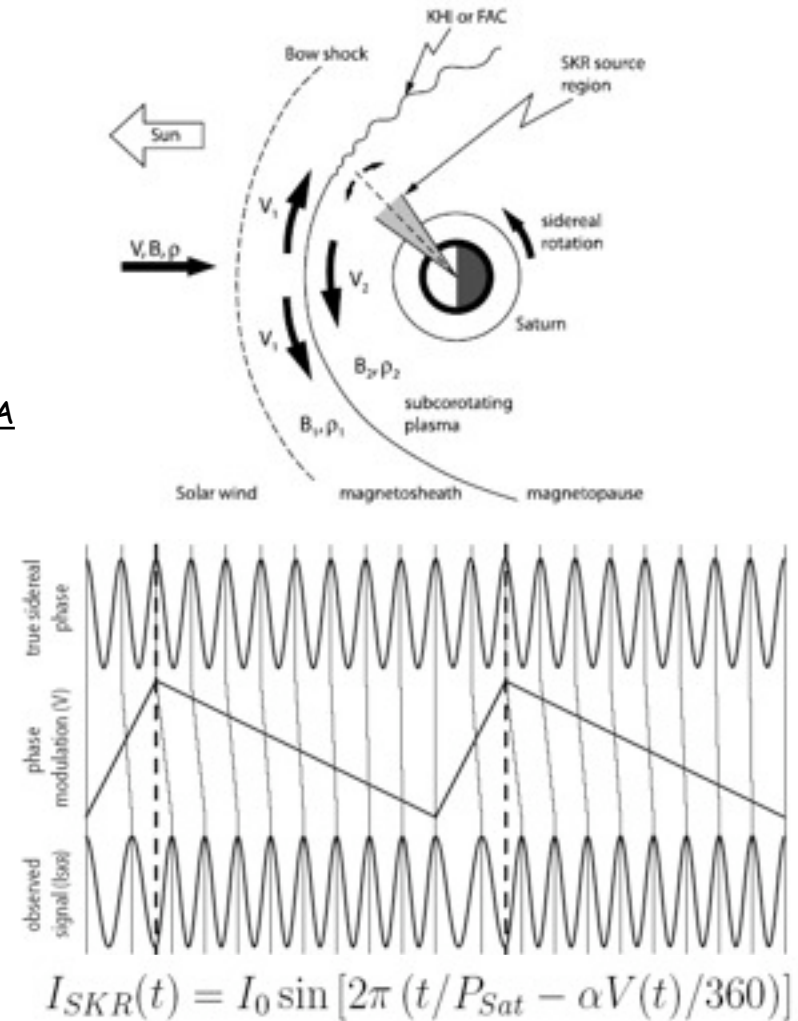
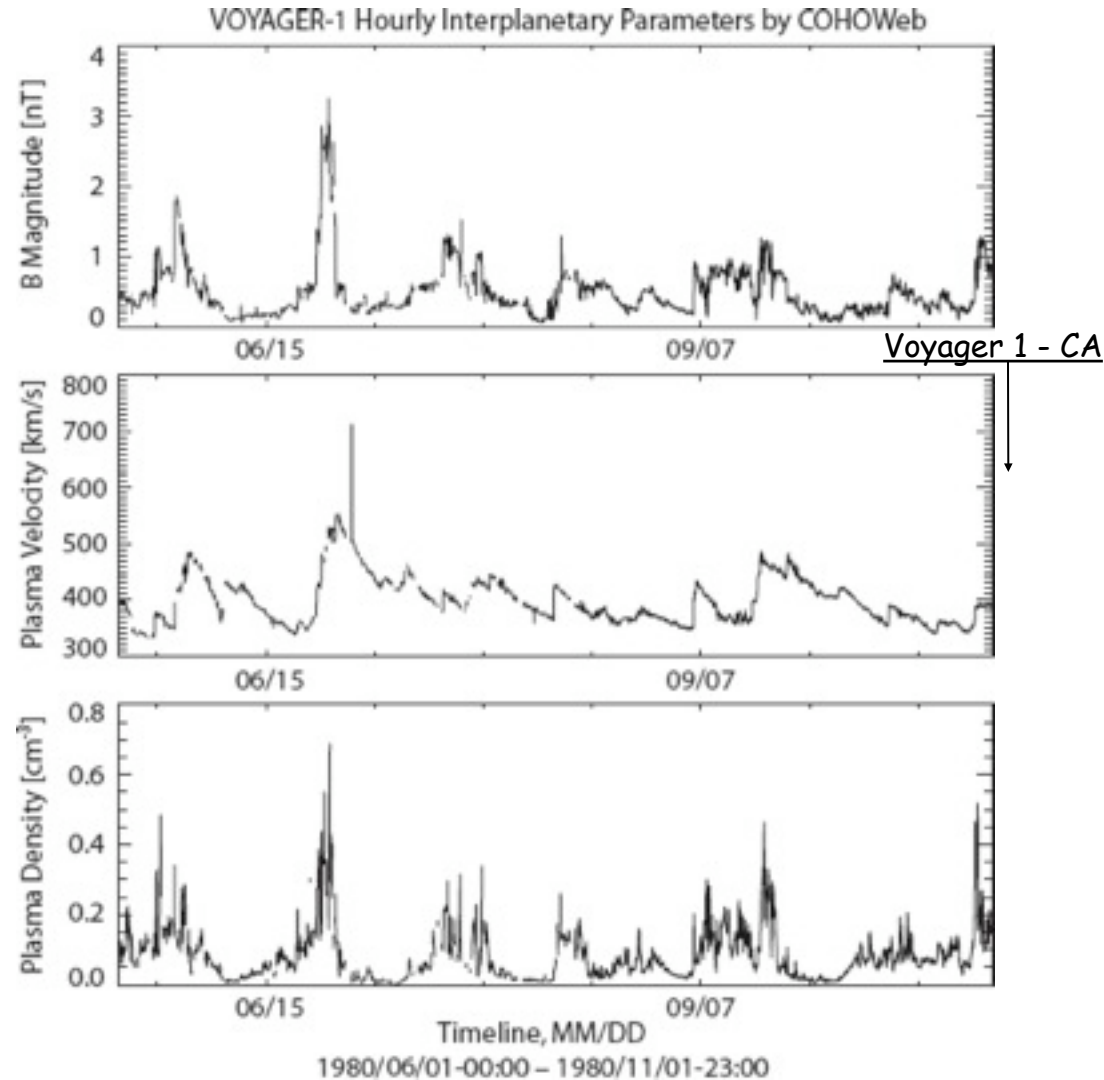


Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- mise en évidence de variations $\sim 1\%$ de P_{SKR} à l'échelle de 20-30 jours
- importance de V_{VS}
- mécanisme de l'influence du Vent Solaire ?
- accès à la période de rotation « vraie » de Saturne ?

Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

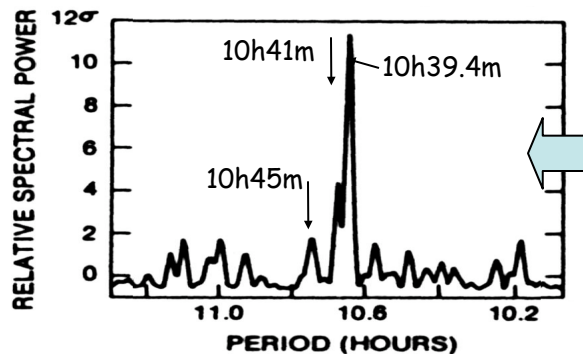
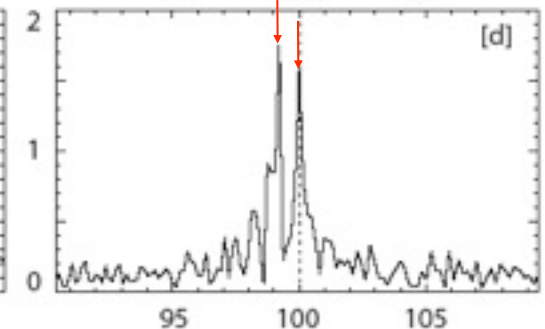
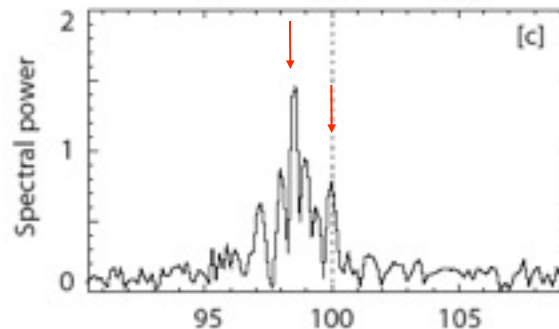
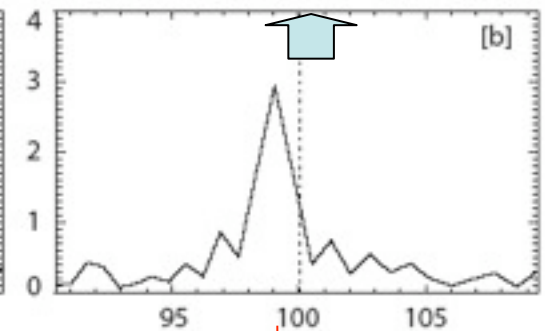
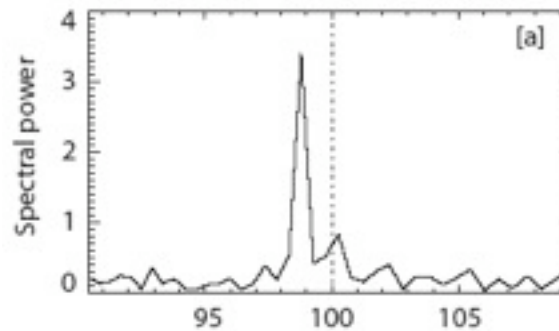
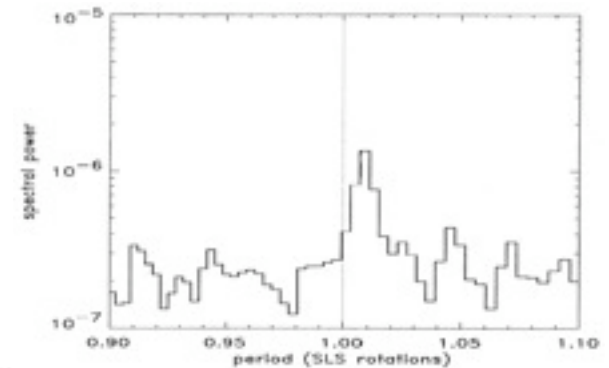
- représentation de V_{VS} @ Saturne comme « dent de scie bruitée » modulant la position de la source du SKR



Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

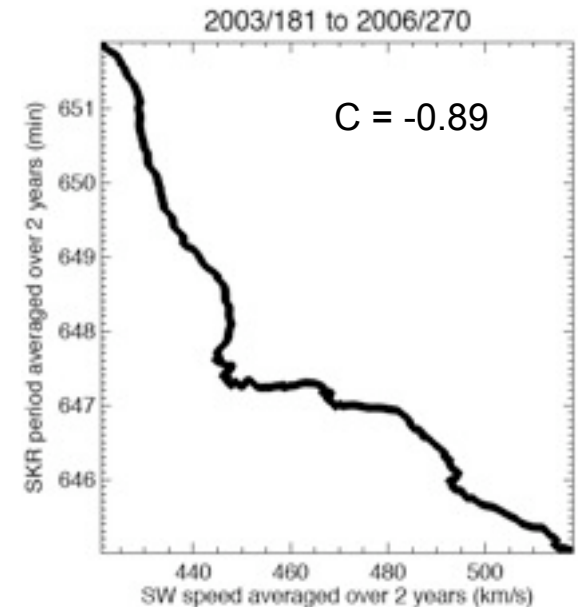
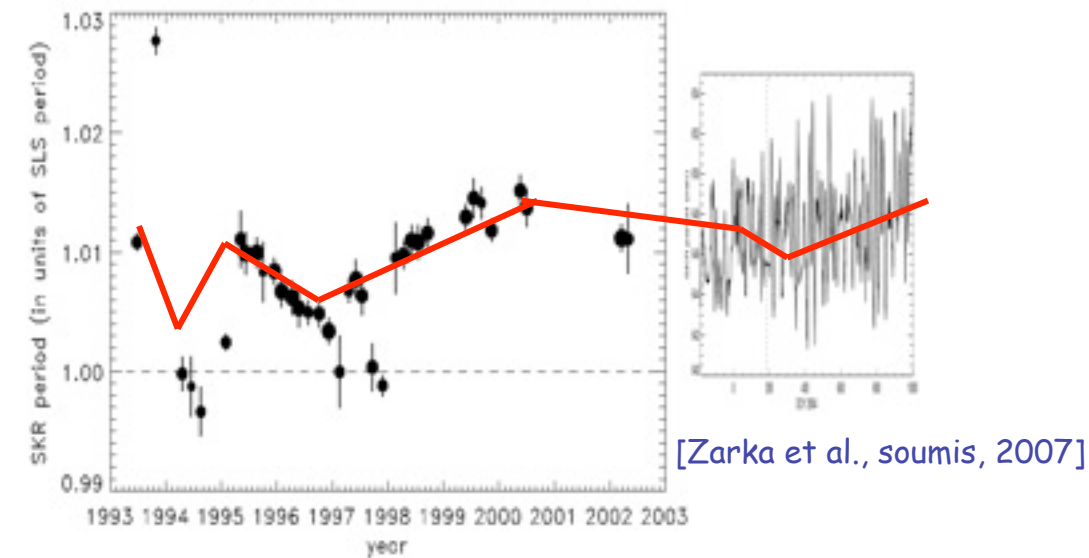
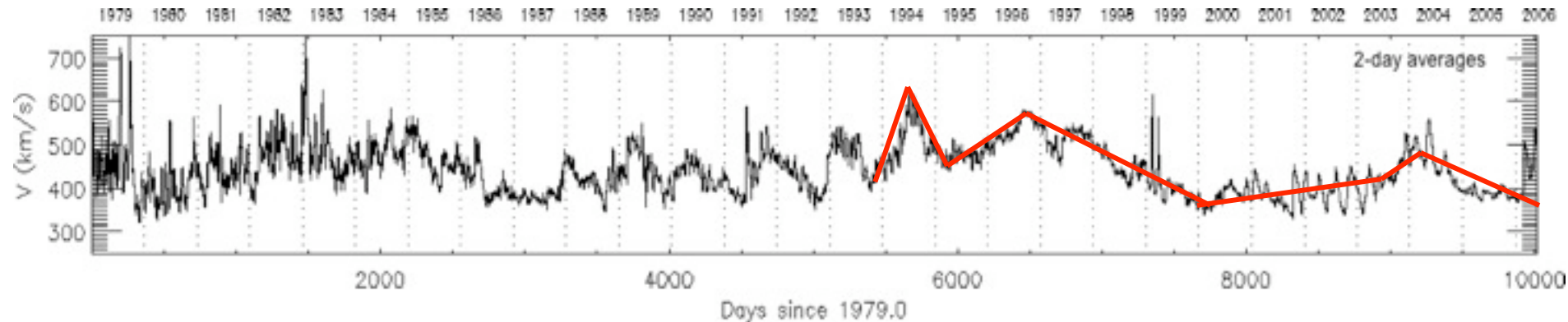
- étude paramétrique fonction de ΔT_{mesure} , P_{VS} , α , $(S/B)^{-1}$

	T_{int}	T	α	R	$P_{\text{SKR}}/P_{\text{Sat}}$
[a]	90	26	0.5	0.2	0.987
[b]	60	26	0.4	0.2	0.993
[c]	270	26	0.6	0.2	0.985
[d]	270	26	0.6	0.2	0.991



Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

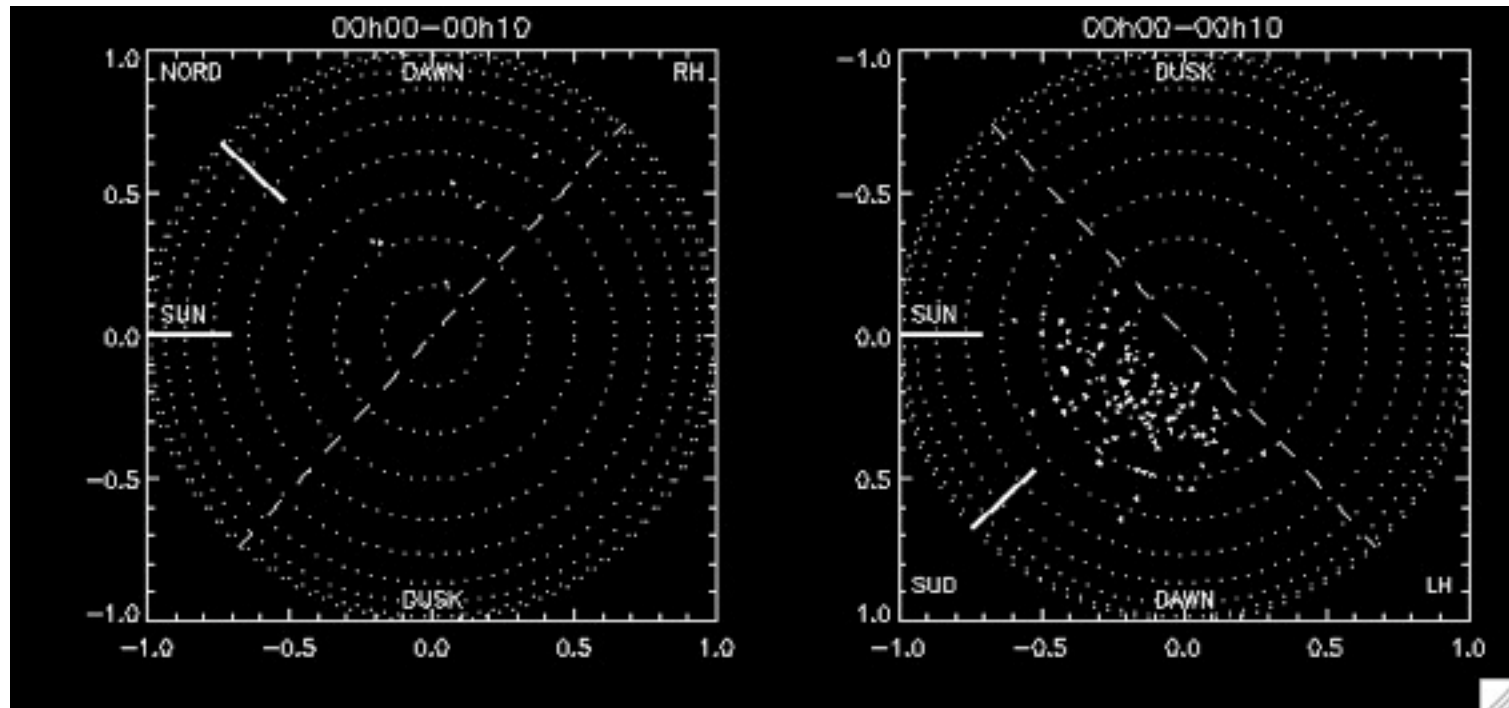
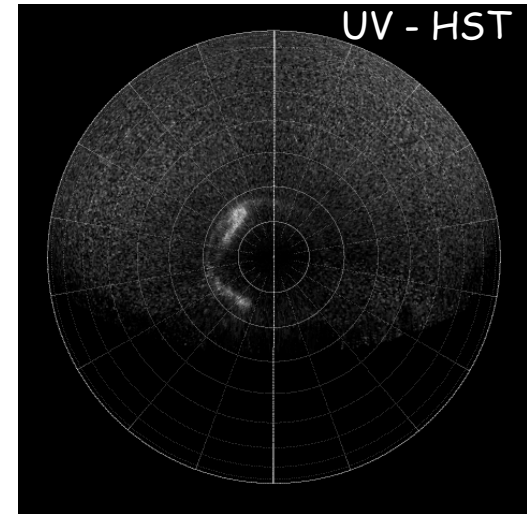
- variations à long terme ?



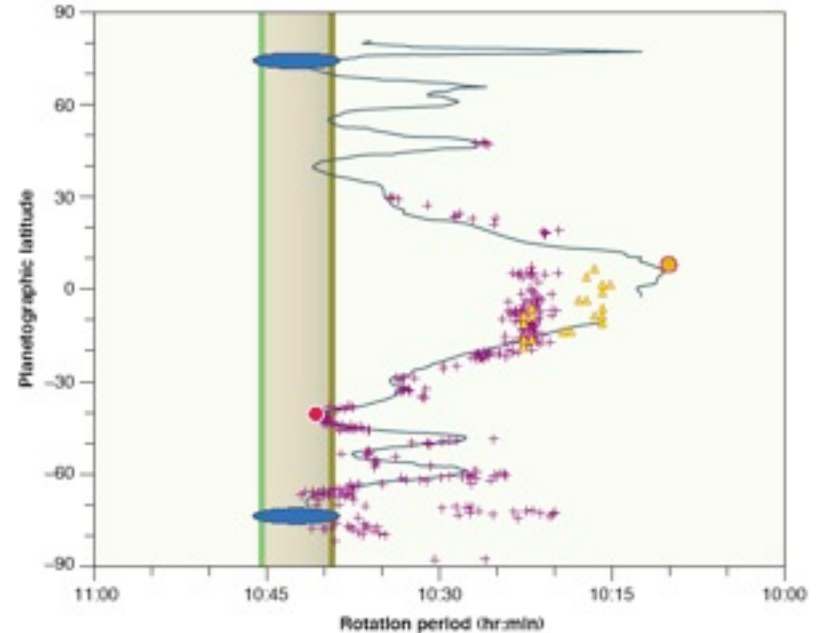
- Champs magnétiques de Jupiter et Saturne
- Émissions radio et rotation de Jupiter
- Émissions radio de Saturne
- Première énigme : la modulation rotationnelle de la magnétosphère de Saturne
- Deuxième énigme : la période radio variable de Saturne
- Questions ouvertes

Questions ouvertes

- Période de rotation « vraie » de Saturne ?
⇒ imagerie radio instantanée
des sources du SKR



Questions ouvertes



[Sanchez-Lavega, 2005]

- $P_{\text{Sat}} \approx P_{\text{SKR-cassini}}$

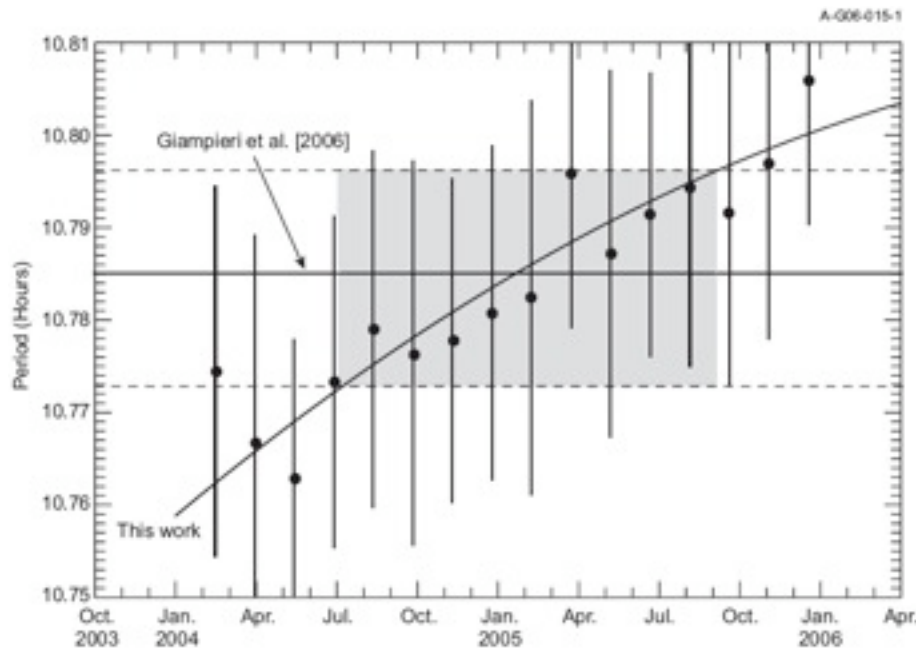
⇒ atmosphère en super-rotation (vers l'Est)

- structure interne
- fusion des données magnétiques P11, V1, V2, Cassini ?

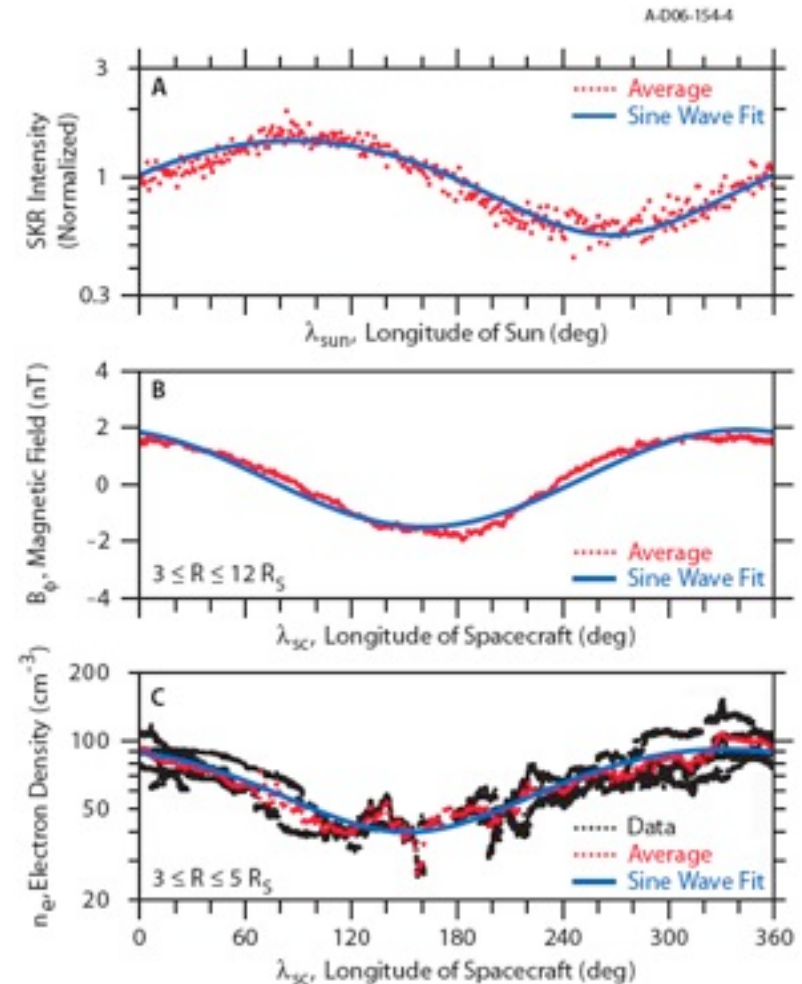
⇒ nouveau modèle de champ magnétique interne ?

Questions ouvertes

- Variations similaires du champ magnétique (B_ϕ) et de la densité de plasma $\Rightarrow$ source interne ?



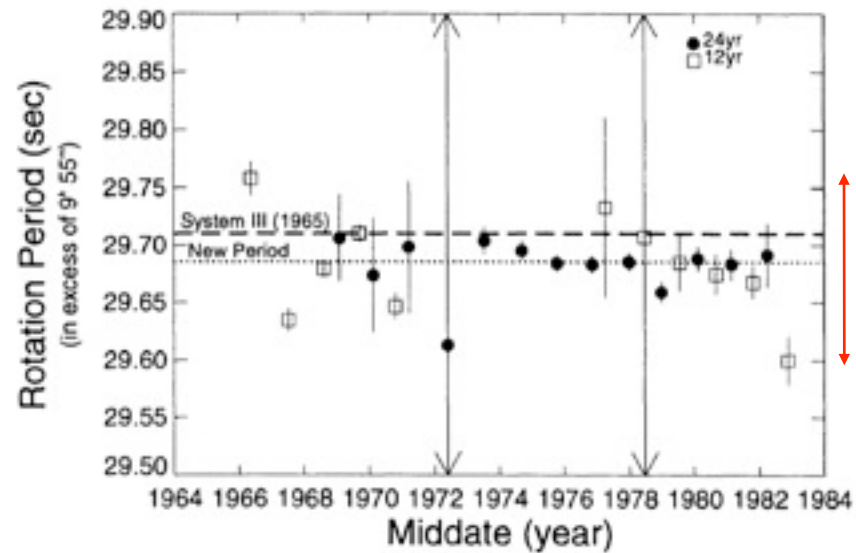
[Kurth et al., 2006]



[Gurnett et al., submitted, 2006]

Jupiter : rotation

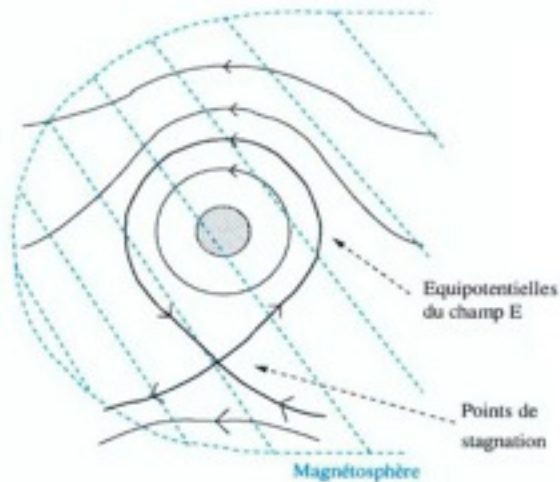
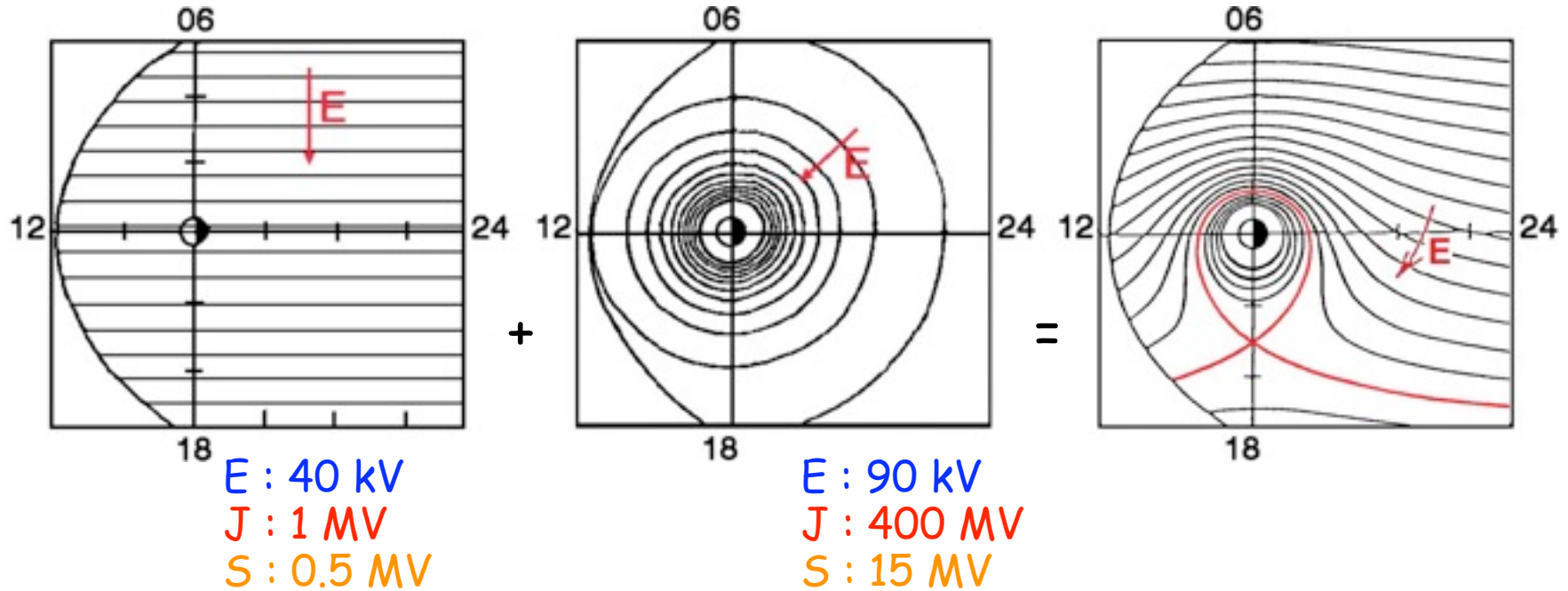
$$P_{\text{DAM}} = 9\text{h } 55\text{m } 29.685\text{s}$$



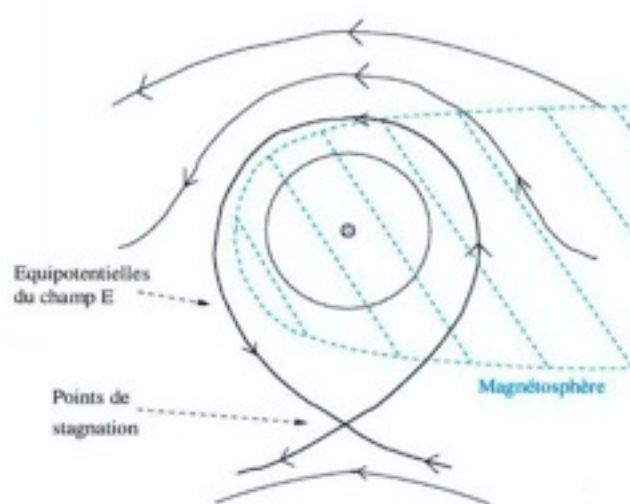
$\pm 0.08\text{s} \sim 10^{-6}$

- P_{Jup} from 24 years data set of « Io-DAM » (independent of SW)
- Torus density $\sim \times 2$ between Voyager (1979) and Galileo (1995-97)
 $\Rightarrow$ source longitude change $\theta_A = 2\pi t_A / P_{\text{Jup}} \sim 10^\circ - 20^\circ$
 $\Rightarrow$ error on $P_{\text{Jup}} = (\theta_A / 360^\circ) \times (P_{\text{Jup}} / 24 \text{ years}) \sim 10^{-6}$ as observed !

Dynamique magnétosphérique



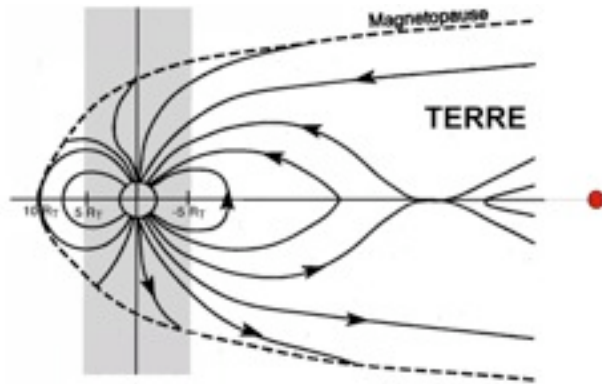
Terre



Jupiter

Dynamique magnétosphérique

Saturne : circulation « intermédiaire » / Terre, Jupiter ?



Dungey-cycle
tail X-line

Magnetopause

Dawn

Dungey-cycle
return flow

Vasyliunas-
cycle tail X-line

Sub-corotating flow

Vasyliunas-cycle

Dusk

Dungey-cycle
magnetopause X-line

Sun

[Cowley et al., 2005]

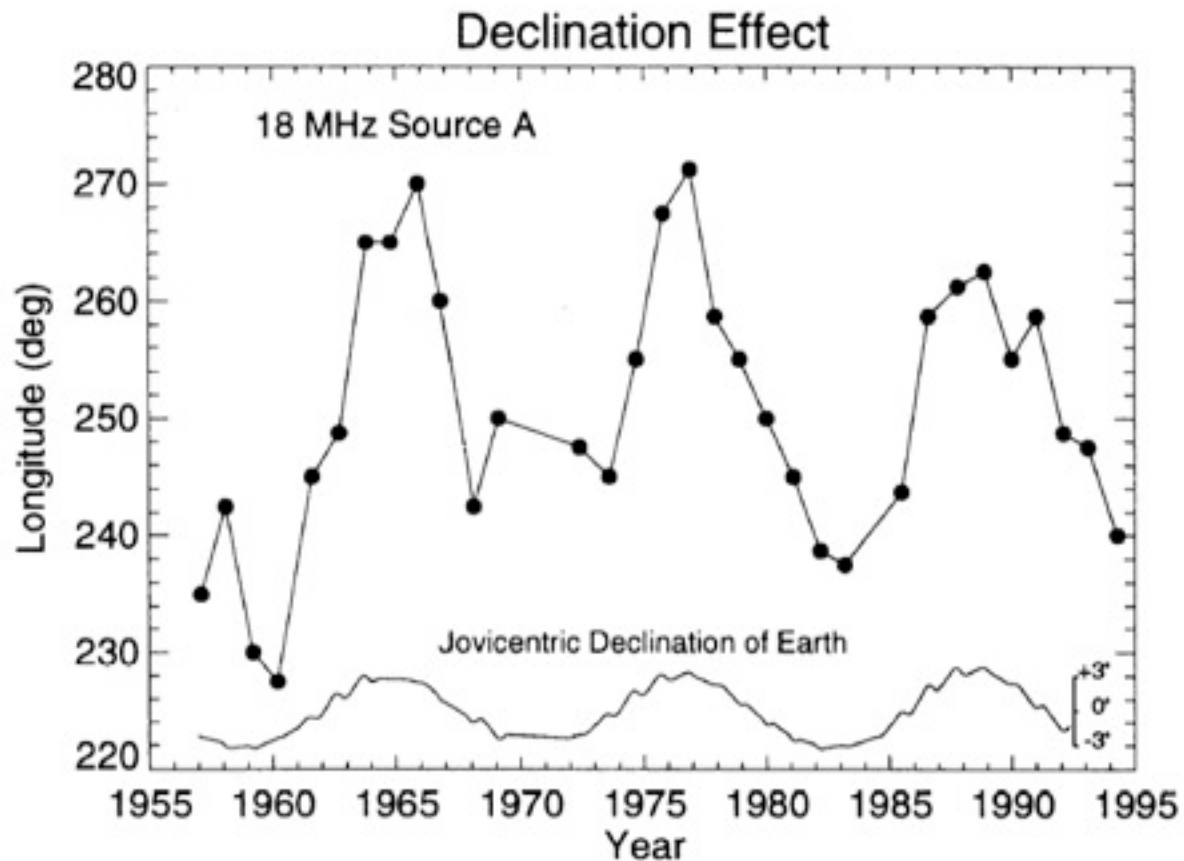
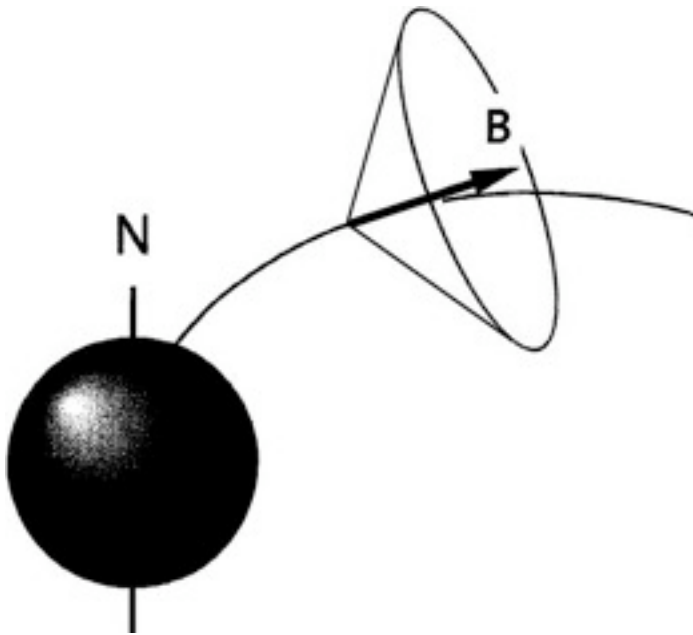
[Courtesy R. Prangé]

JUPITER

SATURNE

Deuxième énigme : période radio variable de Saturne

- lien entre mouvement latitudinal réel et mouvement longitudinal apparent de la radiosource (@ Jupiter)



[Higgins, 1997]