

Atelier magnétosphères comparées
4-6 février 2015



10 ans d'exploration de la magnétosphère de Saturne par Cassini

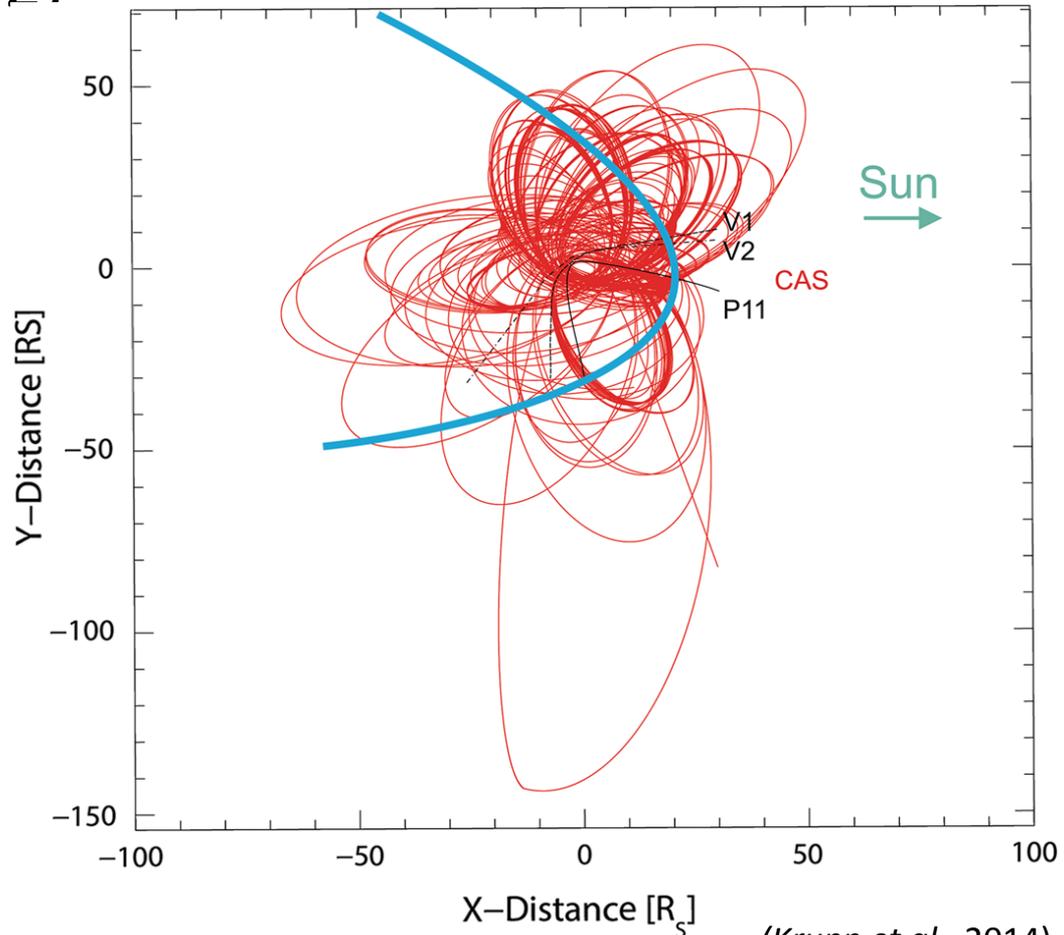
Patricia Schippers
LESIA, Observatoire de Paris

Epopée vers Saturne :

- Pioneer 10, 11 (1979)
- Voyager 1, 2 (1981, 1982)

➤ Cassini 2004-2017

- Lancement: 1997
- Orbite d'insertion: Juin 2004
- Mission nominale: 2004-2008
- Mission étendue:
 - « Equinoxe »: 2008-2010
 - « Solstice »: 2010-2017



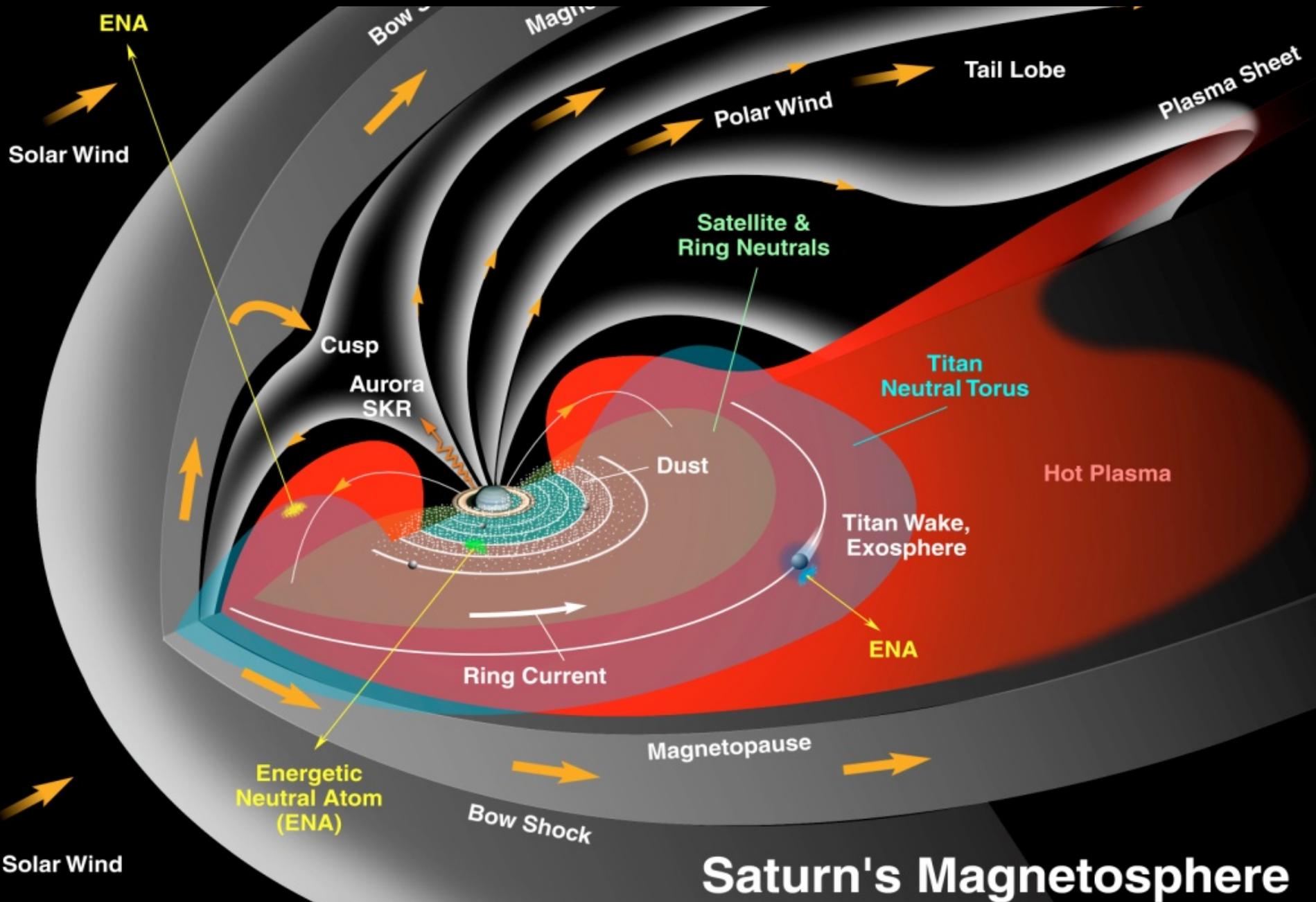
(Krupp et al., 2014)

Caractéristiques principales



	TERRE	JUPITER	SATURNE
Distance héliosphérique	1	5.2	9.5
Magnitude IMF	4	1	0.5
Rayon planétaire (en $R_T=6370$ km)	1	11	10
Obliquité (°)	23	3	27
Champ magnétique à la surface (micro T)	31	428	22
Inclinaison axe magnétique	10.5°	10°	< 1°
Magnétopause (en Rayons planétaires)	10	50	25
Période de rotation (en h)	23.9	9.8	10.7
Sources de plasma dominantes	Ionosphère + Vent solaire (1kg/s)	Interne (Io) (1000 kg/s)	Internes (variées) (300 kg/s)
Origine de la dynamique	Vent solaire	Rotation planétaire	Mixte

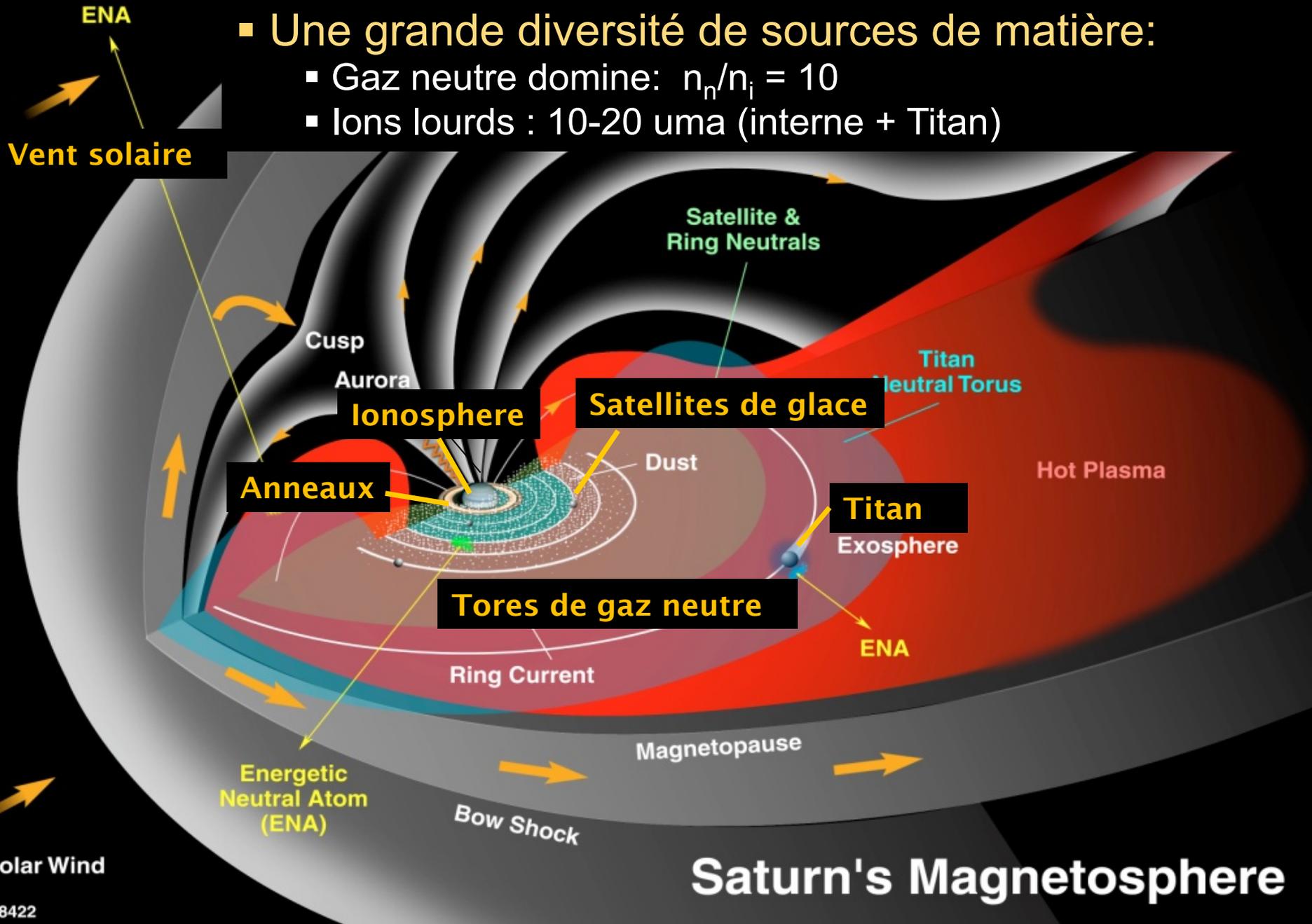
Magnétosphère de Saturne : Vision pré-Cassini



Saturn's Magnetosphere

Magnétosphère de Saturne : Vision pré-Cassini

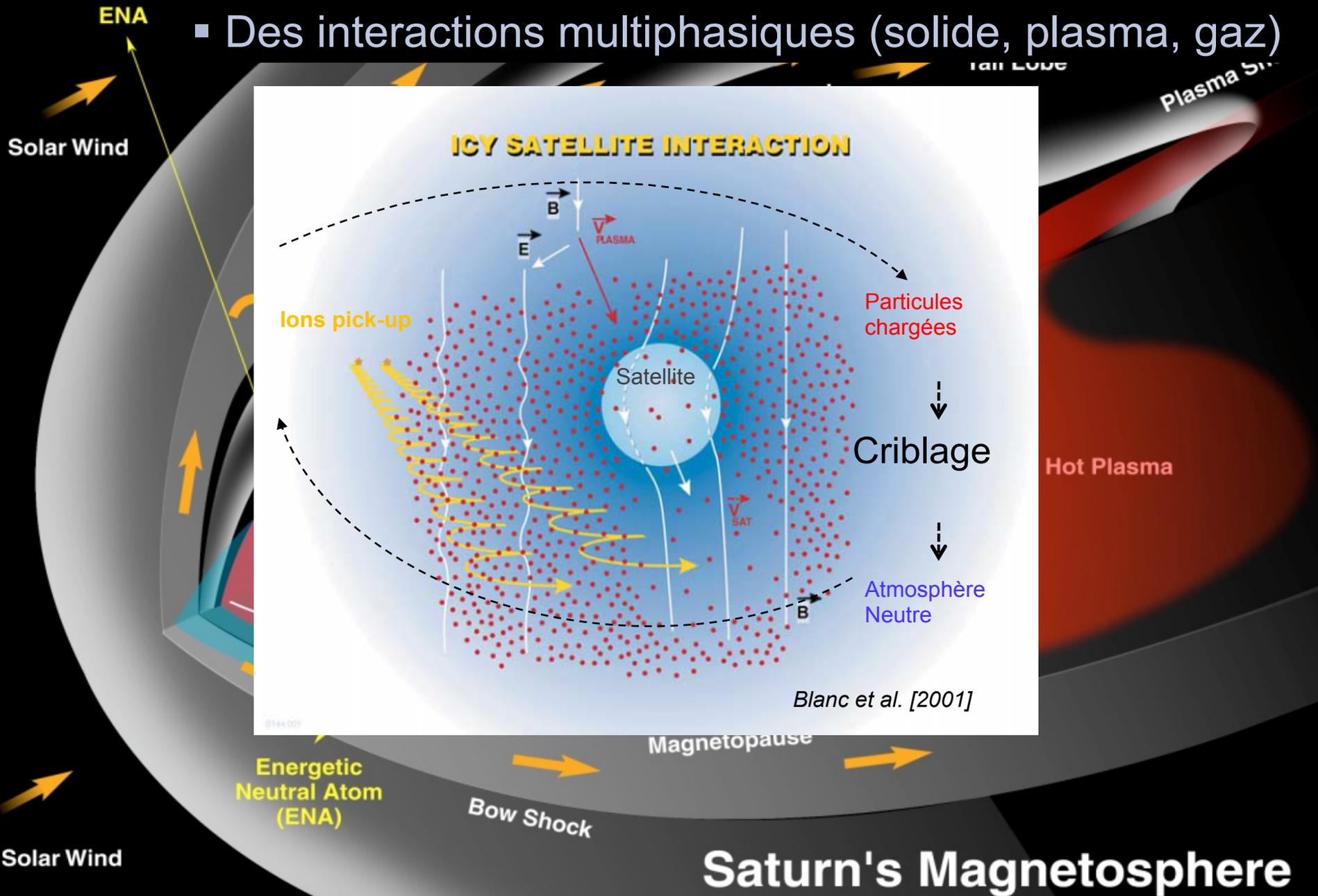
- Une grande diversité de sources de matière:
 - Gaz neutre domine: $n_n/n_i = 10$
 - Ions lourds : 10-20 uma (interne + Titan)



Saturn's Magnetosphere

Magnétosphère de Saturne : Vision pré-Cassini

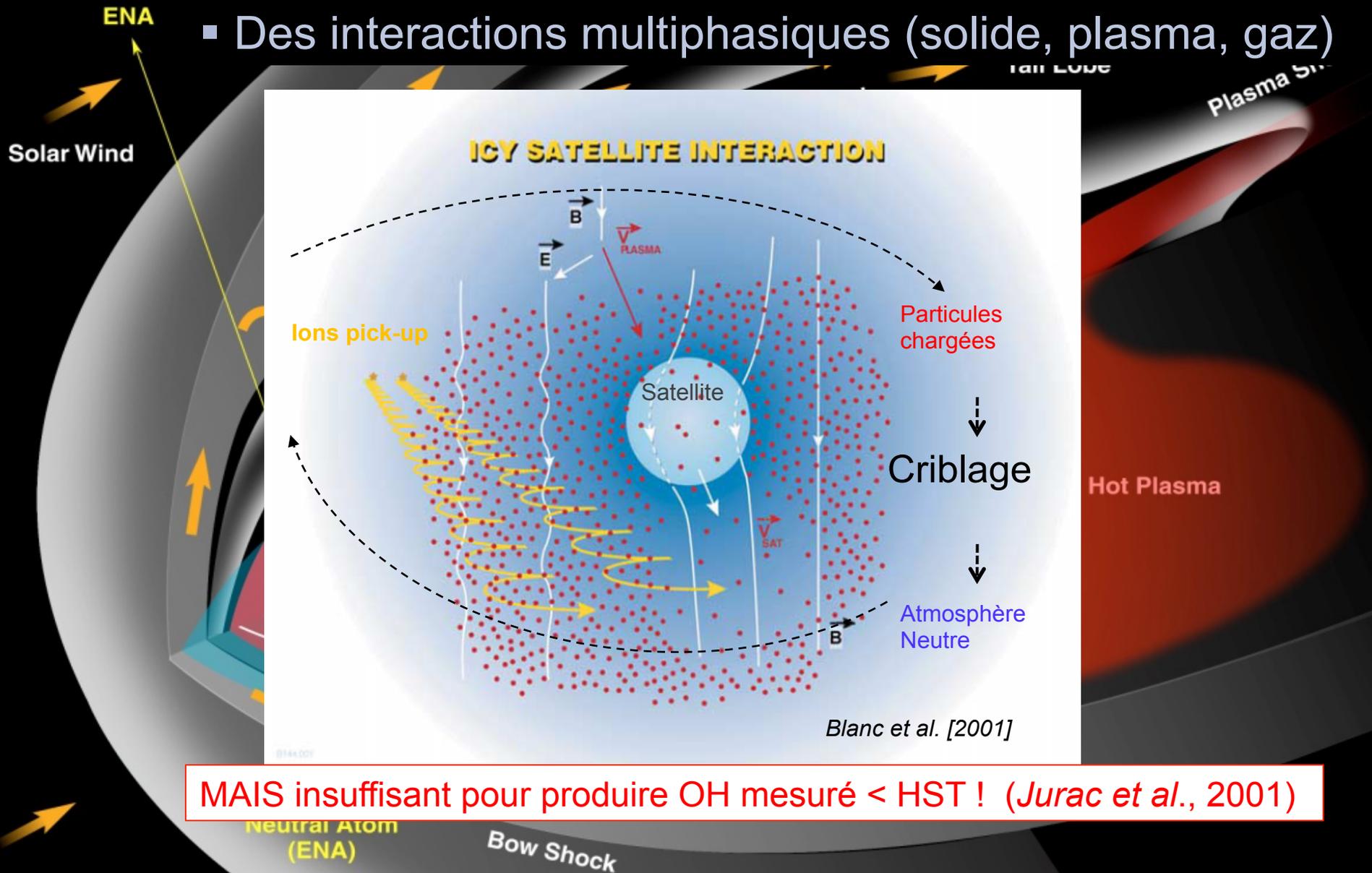
- Des interactions multiphasiques (solide, plasma, gaz)



Saturn's Magnetosphere

Magnétosphère de Saturne : Vision pré-Cassini

- Des interactions multiphasiques (solide, plasma, gaz)



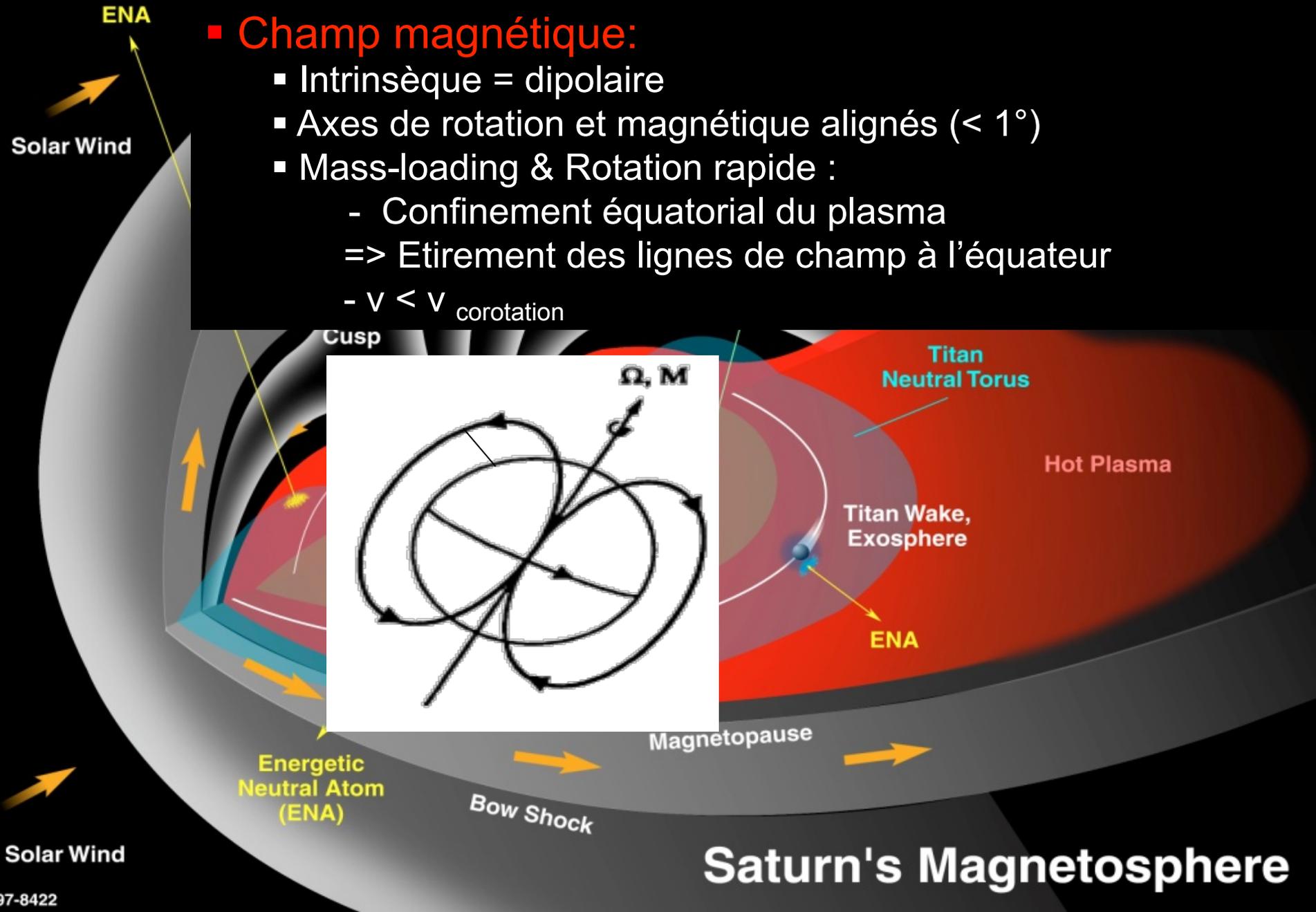
MAIS insuffisant pour produire OH mesuré < HST ! (*Jurac et al., 2001*)

Saturn's Magnetosphere

Magnétosphère de Saturne : Vision pré-Cassini

■ Champ magnétique:

- Intrinsèque = dipolaire
- Axes de rotation et magnétique alignés ($< 1^\circ$)
- Mass-loading & Rotation rapide :
 - Confinement équatorial du plasma
 - => Etirement des lignes de champ à l'équateur
 - $v < v_{\text{corotation}}$



Saturn's Magnetosphere

Exploration par Cassini : Quelques résultats marquants

I) Structure

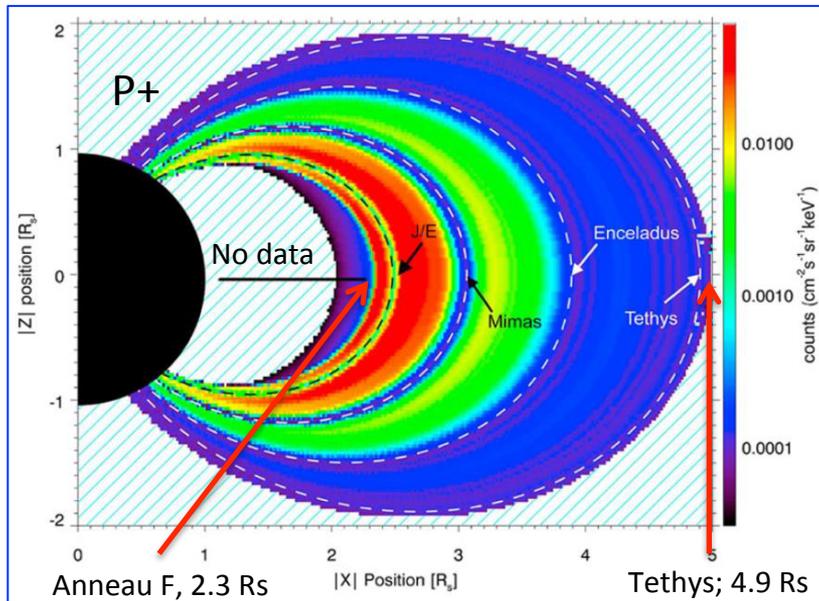
II) Transport et Dynamique magnétosphérique

I) Structure

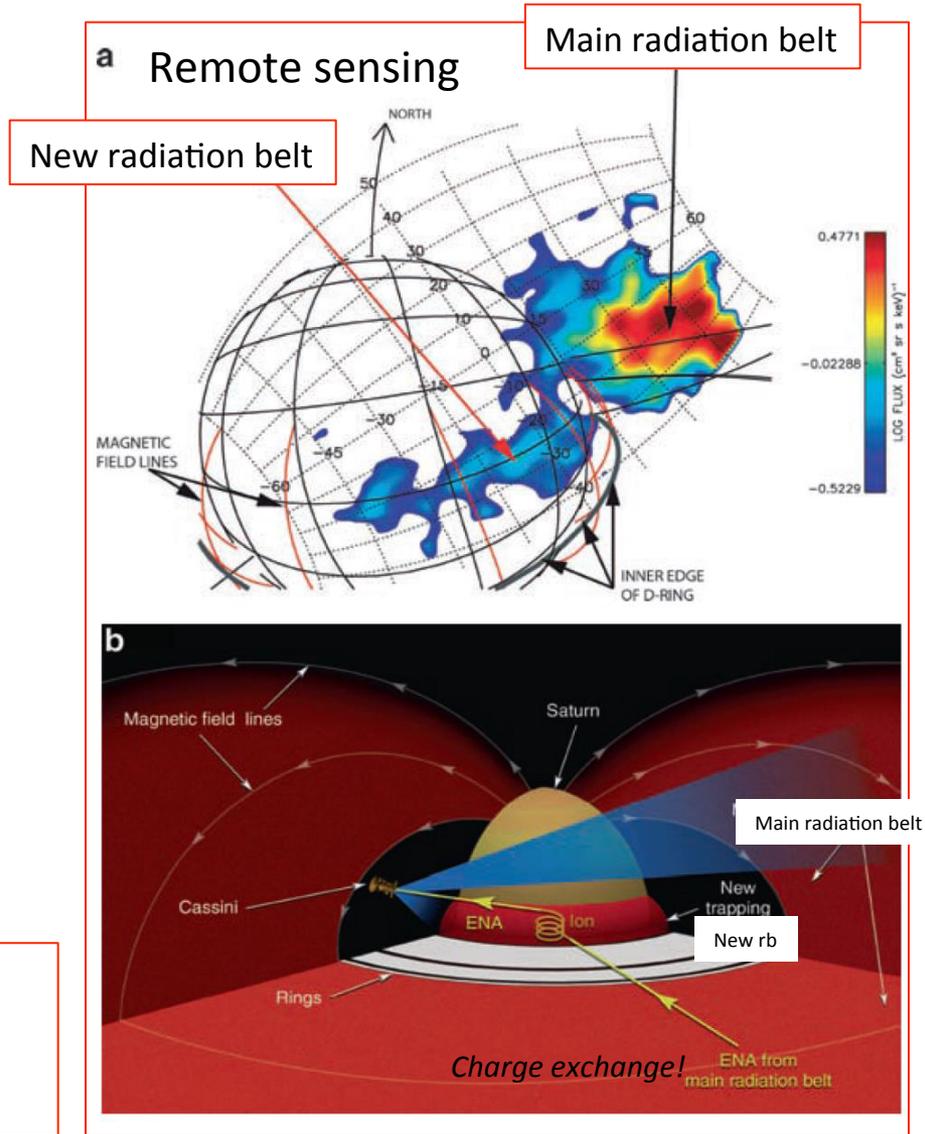
1. Ceinture de radiation
2. Tore d'Encelade
3. Magnétodisque
4. Région aurorale

1. Ceintures de radiation

- 4 Ceintures de radiations ioniques distinctes, $E > 100$ keV, CRAND, (Kolmann et al., 2011; Roussos et al. 2007)



- Identification d'une **nouvelle ceinture de radiation** à l'intérieur de l'anneau D (Krimigis et al., 2005) < Imagerie ENA

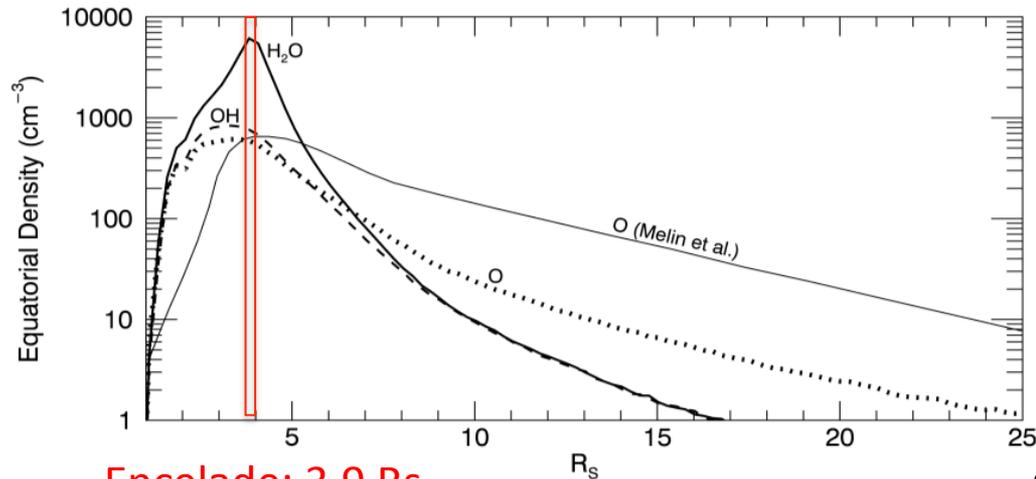


2. Encelade : tore de gaz neutre (a)

- Identification de **cryovolcanisme** (*Dougherty et al.*, 2006; *Porco et al.*, 2006)
- Source principale de **gaz neutre** (10^3 cm^{-3}): 90% H_2O , 3% O_2 , 4% N_2 , CO (>< Criblage surfaces)
- Source de poussières: **Anneau E**
- Production variable 30-1000 kg/s (*Smith et al.*, 2010)
- Diffusion radiale du tore : échange de charge, interactions neutres-neutres (*Johnson et al.*, 2006)



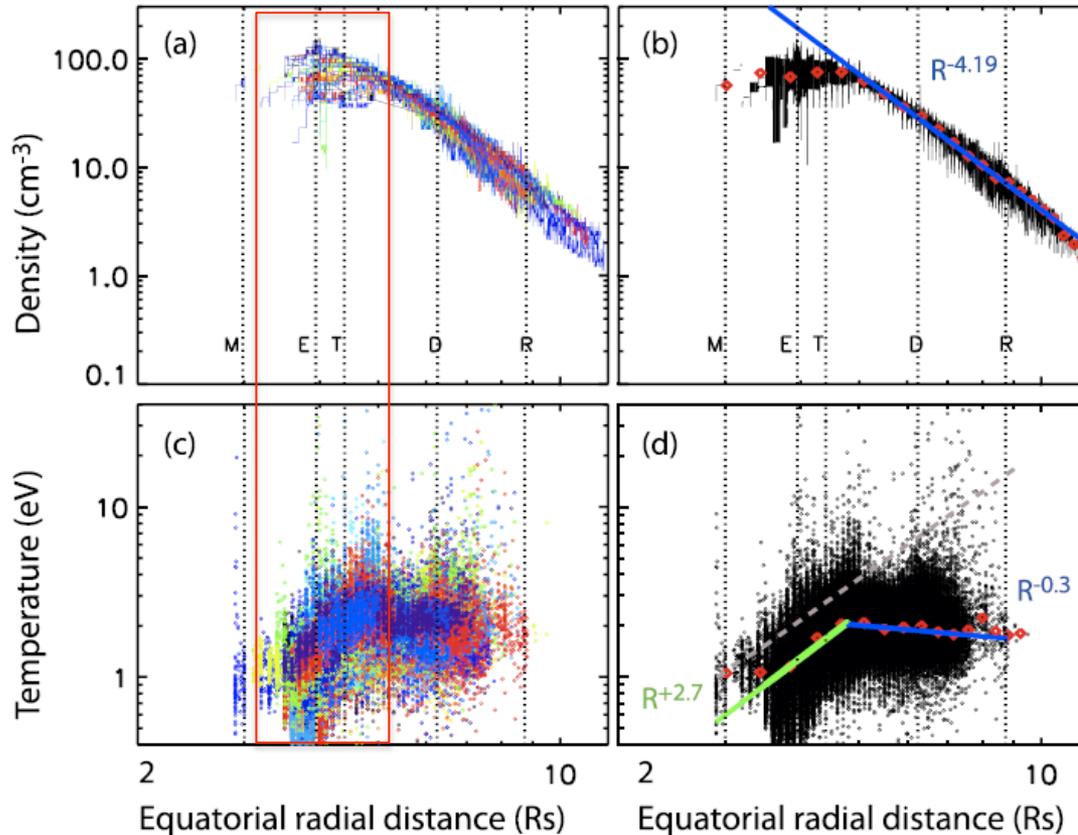
« Plumes » d'eau



Encelade: 3.9 Rs

Cassidy&Johnson (2010)

2. Encelade : Tore de plasma (b)



- Production de plasma dans le tore de gaz neutre d'Encelade par **photo-ionisation, impact électronique** (*Delamere et al., 2008; Schippers et al., 2009*).

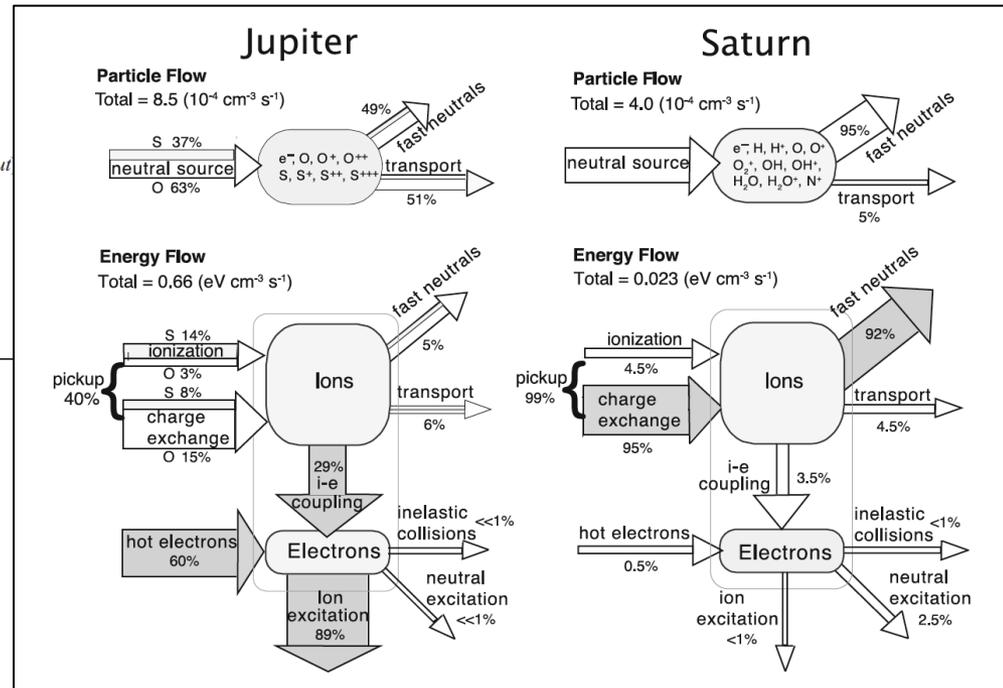
- Détermination de densité n_e , et température T_e Statistique sur 8 ans (*Schippers et al., 2013*):

- **Variabilité** importante de la densité observée autour d'Encelade => **Météorologie** !
- $T_e \simeq T_H + //$ corotation & **Thermalisation**

Tore d'Io vs Tore d'Encelade

	O-based "Saturn"	O-based "Jupiter"
<i>Nominal Input Parameters</i>		
Corotation velocity (km/s)	26.4	57.0
Neutral source ^b , \dot{S}_n ($10^{-4} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)	4.0	4.0
Neutral source O/S ratio	∞	∞
Neutral source (kg/s)	210	210
Transport time, τ (days)	45	45
Hot electron fraction, f_{eh} (%)	0.30	0.30
Hot electron temperature ^c , T_{eh} (eV)	1000	1000
<i>Results</i>		
n_e (cm^{-3})	70.5	516
n_o (cm^{-3})	880	60
n_o/n_e	12.0	0.12
T_e (eV)	1.3	6.8
T_{O^+} (eV)	37	150
Total power throughput ($10^{-4} \text{ eV cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)	0.023	0.12

	<i>Energy Sources (% Total Throughput)</i>
S ionization	-
S charge exchange	-
O ionization	4.5
O charge exchange ^d	95
Hot/cold electron thermal coupling	0.5
<i>Internal Thermal Coupling (% Total Throughput)</i>	
Ion-electron thermal coupling	3.5
<i>Energy Losses (% Total Throughput)</i>	
Fast neutrals	92
Transport	4.5
UV ion radiation	0.1
UV neutral radiation ^e	2.4
Electron impact ionization	$\ll 1$



Delamere et al., 2007

3. Magnétodisque

$< 6 R_s$

Champ B dipolaire,

Axisymétrique,
(Burton et al., 2009)

$6 < R < 15 R_s$

Courant annulaire

Courant inertiel + gradient de
pression (pic à $8 R_s$)

(Sergis et al., 2009,2011; Achilleos et
al., 2010)

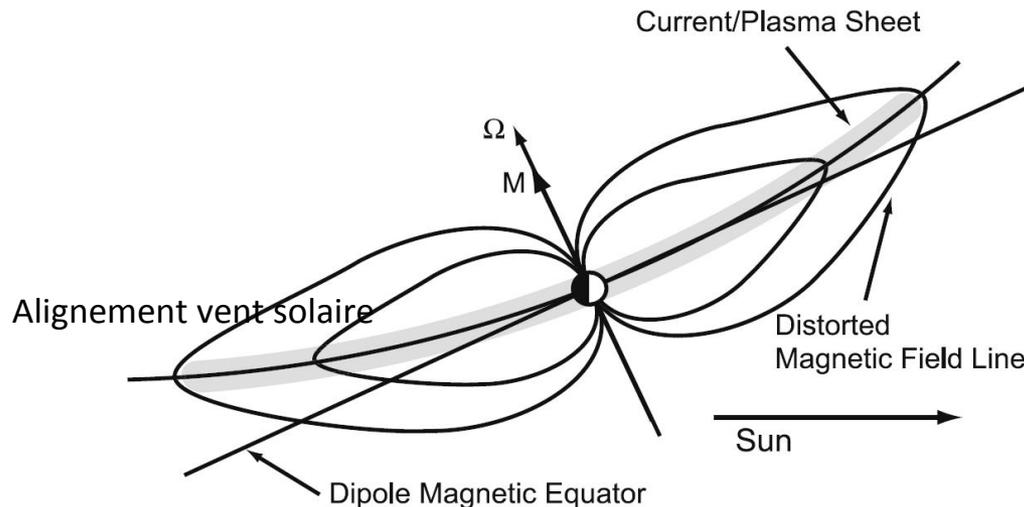
$R > 15 R_s$

Magnétodisque

- Effets centrifuges dominants
- déformé par pression dynamique
du vent solaire

⇒ « **Bowl-Shaped** »

(Arridge et al., 2009; Carbary et al., 2010)

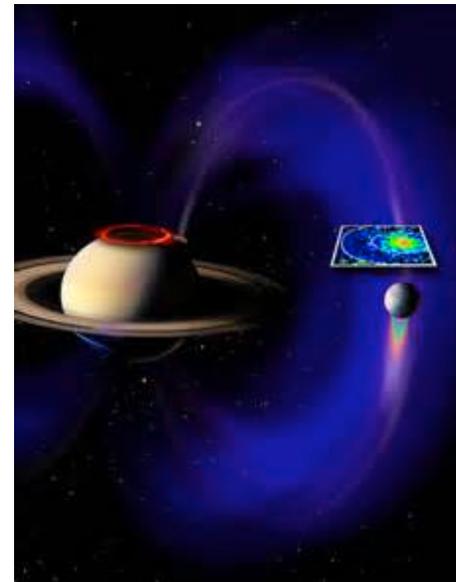
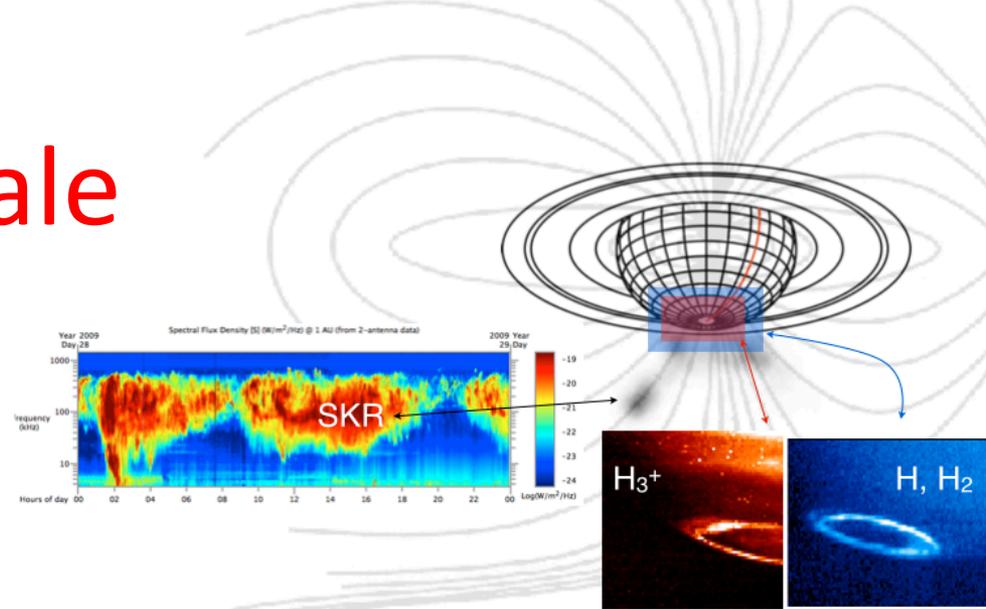


Entre Solstice d'été (2003)
(hémisphère Sud) et
équinoxe (2009)

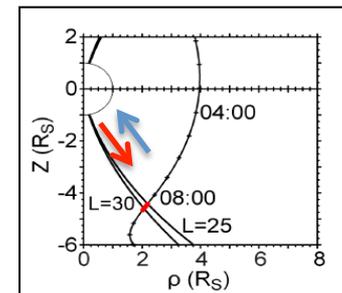
4. Région aurorale

- Aurores (radio, IR, UV) = signatures couplage ionosphère-magnétosphère
- Etudes morphologiques & puissance des émissions à différentes latitudes
- Dynamique magnétosphérique (accélérations, injections, cisaillement, reconnexion,...)
- 1^{ère} Identification du **pied d'Encelade** :
(Pryor et al., 2009)
 - signature couplage lune-magnétosphère
 - Signature intermittente: seulement 2 cas!=> >< Io

Cause à identifier...



4. Région aurorale & SKR



- SKR (Emission radio-kilométrique de Saturne) = Signature radio de l'activité aurorale générée par instabilité maser cyclotron (Zarka et al., 1998) // AKR terrestre

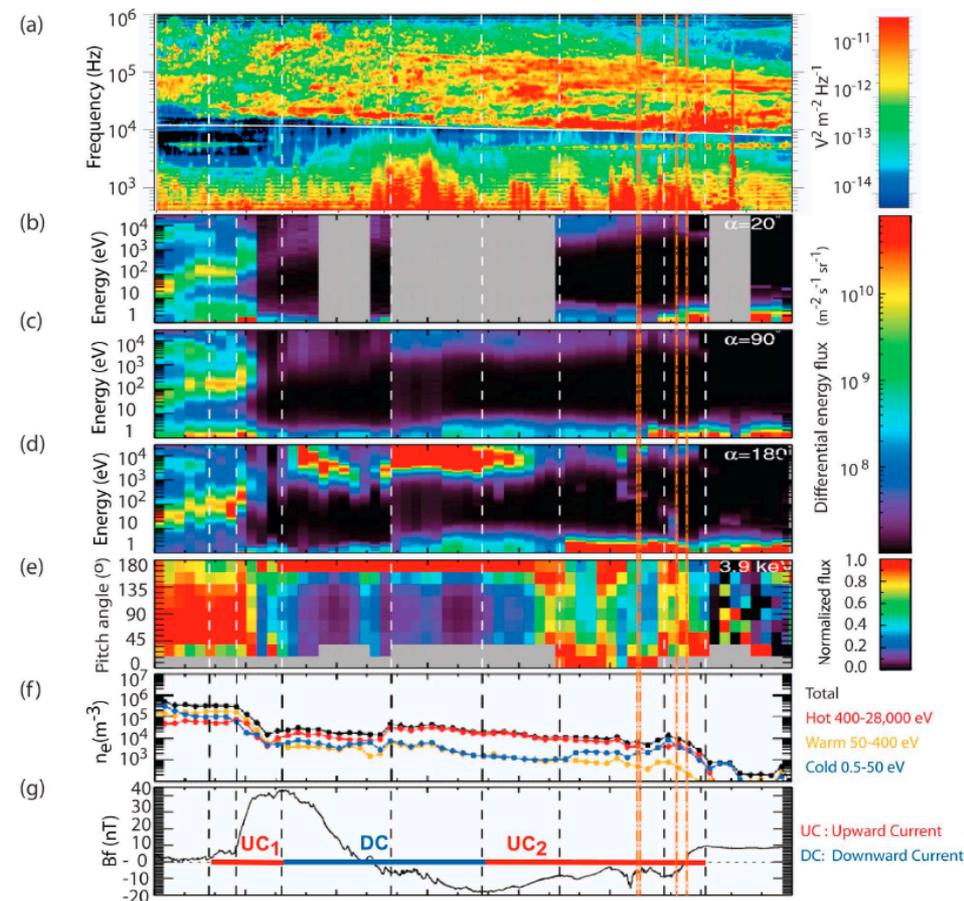
- **1^{ère} Traversée de la région source du SKR** (rev 89, $\theta > 65^\circ$ S ; Altitude < 5 Rs)
Identification de :

- **Courants alignés** intenses, Upward & Downward (Compression par v_{sw})
- **Plasma énergétique** $\Rightarrow \Delta V$
- $f_{el}(v_{//}, v_{\perp})$ non-thermiques, instables vs CMI

\Rightarrow Similarités nombreuses avec région source AKR !

Passage unique! \Rightarrow Orbites proximales

(Bunce et al., 2010, Lamy et al., 2010a,b; Schippers et al. 2011; Mutel et al., 2010,...)



Time (UTC)	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30
Lshell	7.0	8.5	10.8	13.8	18.2	24.1	32.3	42.9
R (Rs)	4.2	4.3	4.4	4.6	4.7	4.9	5.1	5.3
Latitude (°)	-39.0	-44.7	-49.9	-54.8	-59.2	-63.2	-66.6	-69.5
Local Time(h)	23.4	23.6	23.8	0.06	0.4	0.7	1.1	1.7
Longitude(°)	200.6	214.6	228.1	241.1	253.4	264.8	275.2	284.1

II. Transport et dynamique magnétosphérique

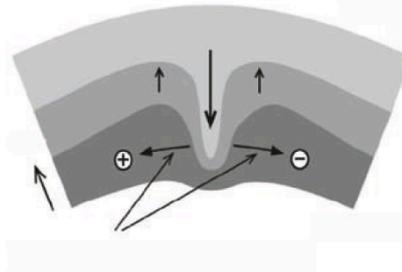
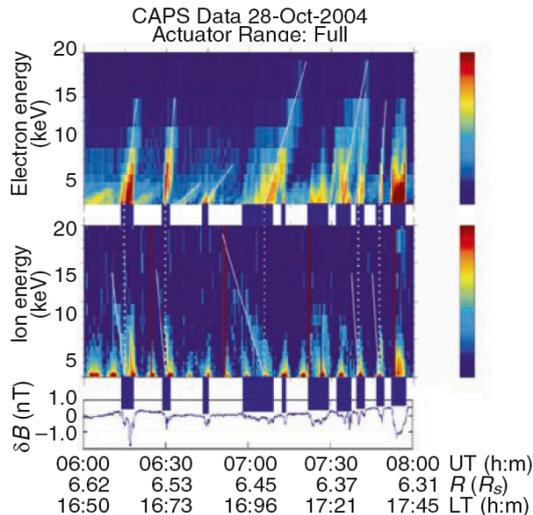
1. Transport par Instabilité d'interchange centrifuge
2. Champ électrique Jour -> Nuit
3. Reconnexion et dynamique globale
4. Modulation rotationnelle
5. Variations saisonnières

II) Transport et dynamique

1. Transport par Instabilité interchange (MS interne)

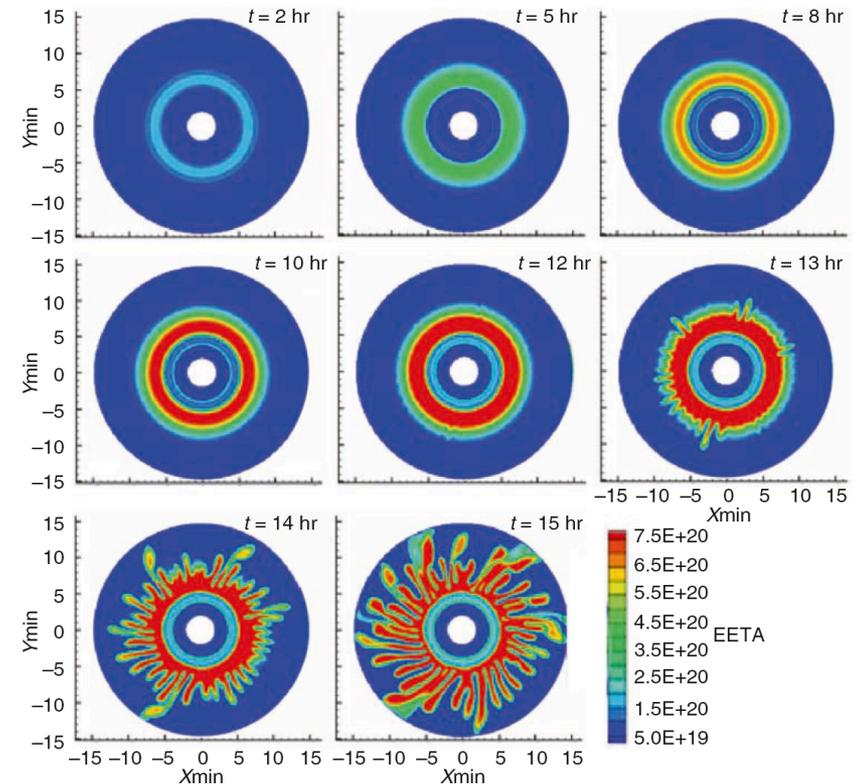
- Production de plasma/mass-loading
 - Rotation rapide
- ⇒ **Instabilité d'interchange centrifuge**
tubes de flux
= mécanisme principal **transport radial**

Evidence observationnelle à Saturne :
Injections de plasma chaud $5 < L < 10$



$D_i/I = 7\%$

Simulation "Rice convection model" à Saturne avec source de plasma active



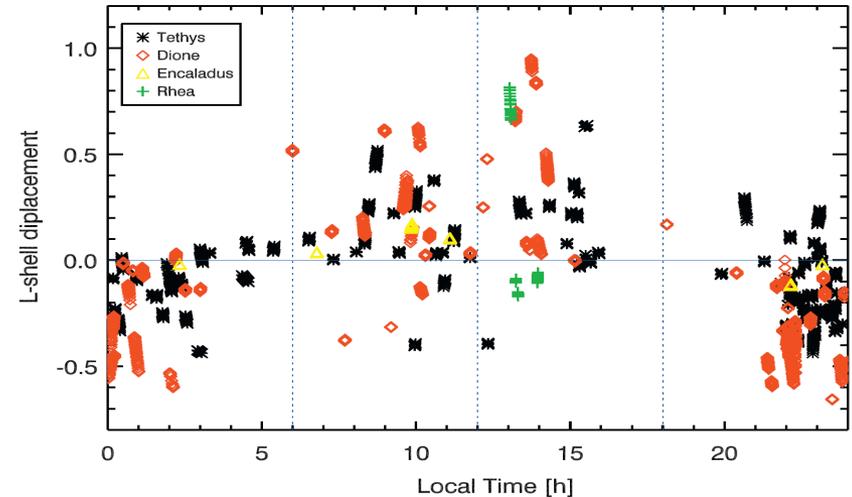
(Hill et al. 2008)

2. Identification d'un champ électrique de convection Jour -> nuit (MS interne)

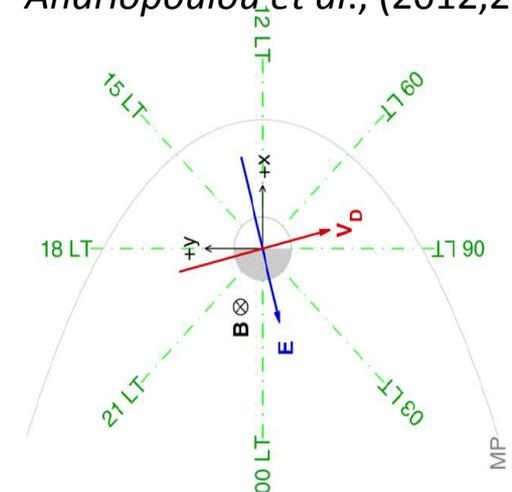
- Identification d'un **déplacement radial** ($< 1 R_s$) des micro-signatures d'absorption des lunes ($v_r \neq 0$) à l'intérieur/extérieur de leur orbite côté nuit/jour
- **Asymétrie jour/nuit**
 - Flux des ceintures de radiation
 - Température ions, électrons
 - V_r ions
 - Densité plasma

⇒ Existence d'un champ électrique de convection jour-> nuit (Andriopoulou et al., 2012)

- $\perp E_{\text{conv SW}}$ (Dusk->Dawn)
- $E \simeq 0.1 \text{ mV/m}$
- $4 R_s < R < 10 R_s$



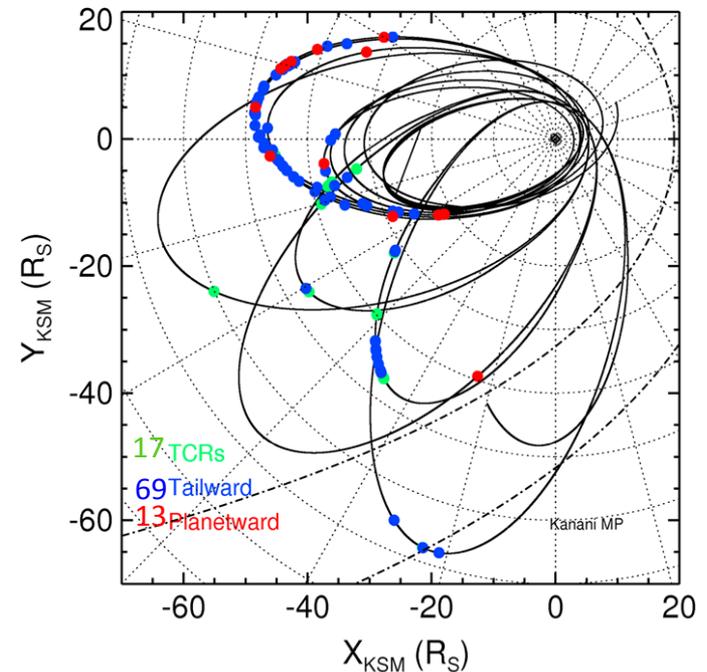
Andriopoulou et al., (2012,2014)



⇒ Origine du champ électrique ?

3. Reconnexion & Dynamique globale (MS externe)

- A la Magnétopause:
 - Quelques événements de reconnexion détectés (*Mc Andrews et al., 2008*)
- Dans la queue magnétique:
 - Dipolarisation (*Bunce et al., 2005; Russell et al., 2008*)
 - Détection de **plasmoides** (*Jackman et al., 2007,2014; Hill et al., 2008*) et de TCR (travelling compression region) (*Jackman et al., 2014*)
 - $R > 40 R_s$
 - $100 \text{ km/s} < V < 1000 \text{ km/s}$
 - Ligne séparatrice variable

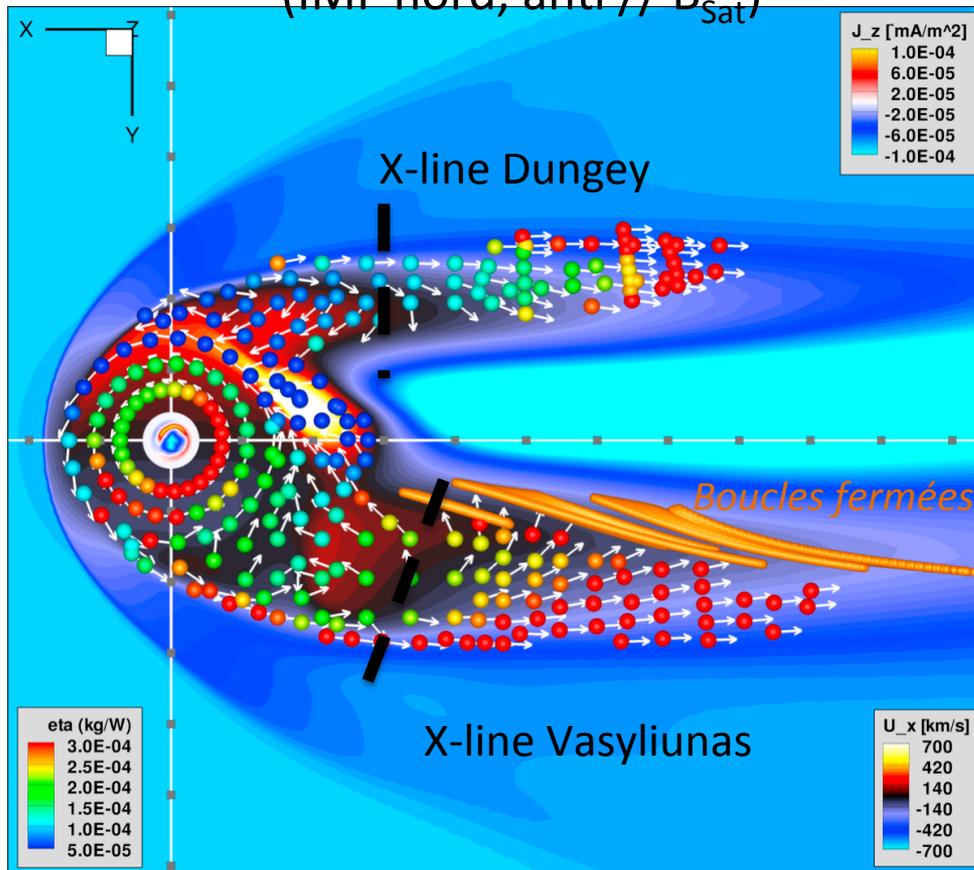


Jackman et al. (2014)

Cependant : $M_{\text{plasmoid}} \approx 10 \% M_{\text{produite}}$ (Encelade)
 => Processus alternatif d'évacuation de la masse ?

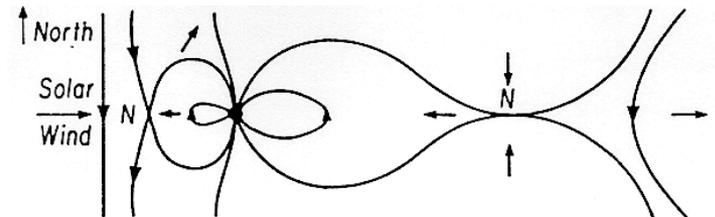
3. Reconnexion & Dynamique globale (MS externe)

Simulation convection globale à Saturne
(IMF nord, anti // B_{Sat})

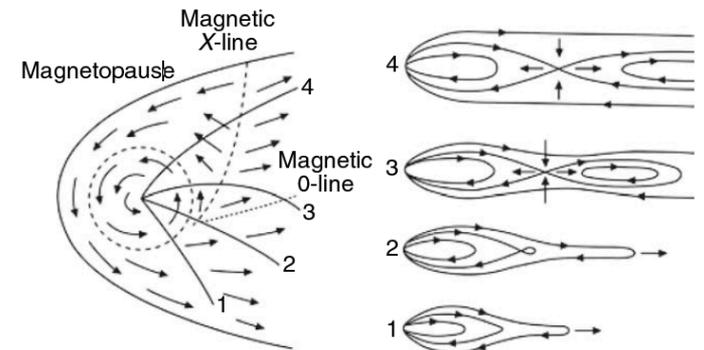


Jia et al., 2012

Cycle de Dungey (Convection solaire)



Cycle de Vasyliunas (Corotation planétaire)

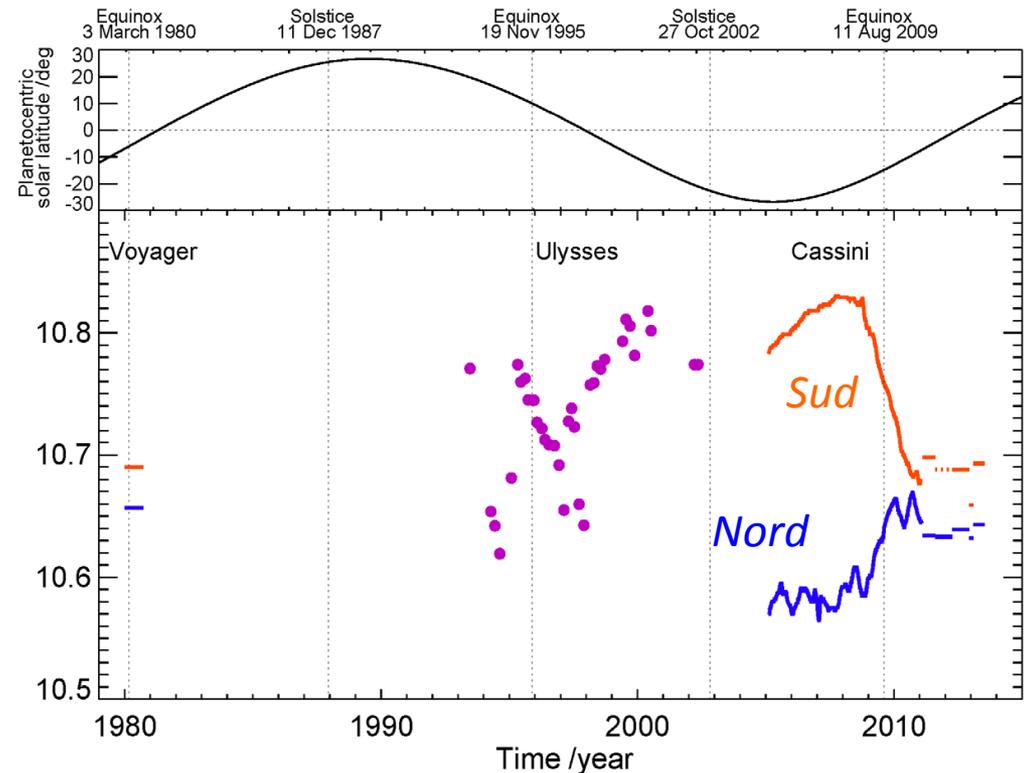


Vasyliunas et al., 1983

4. Modulation rotationnelle

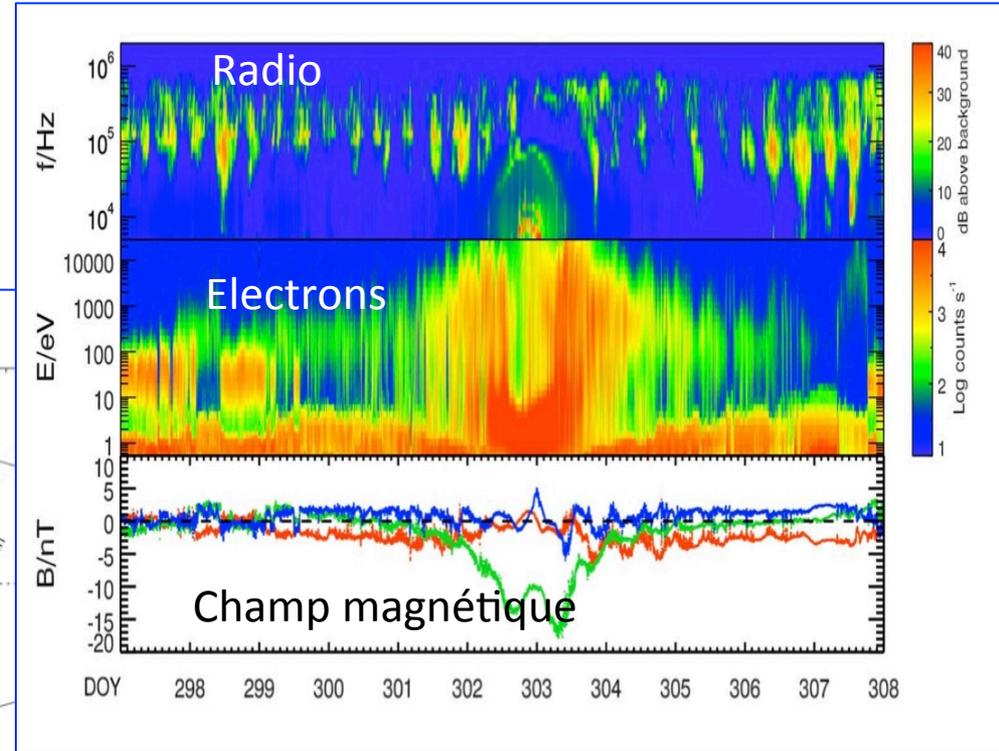
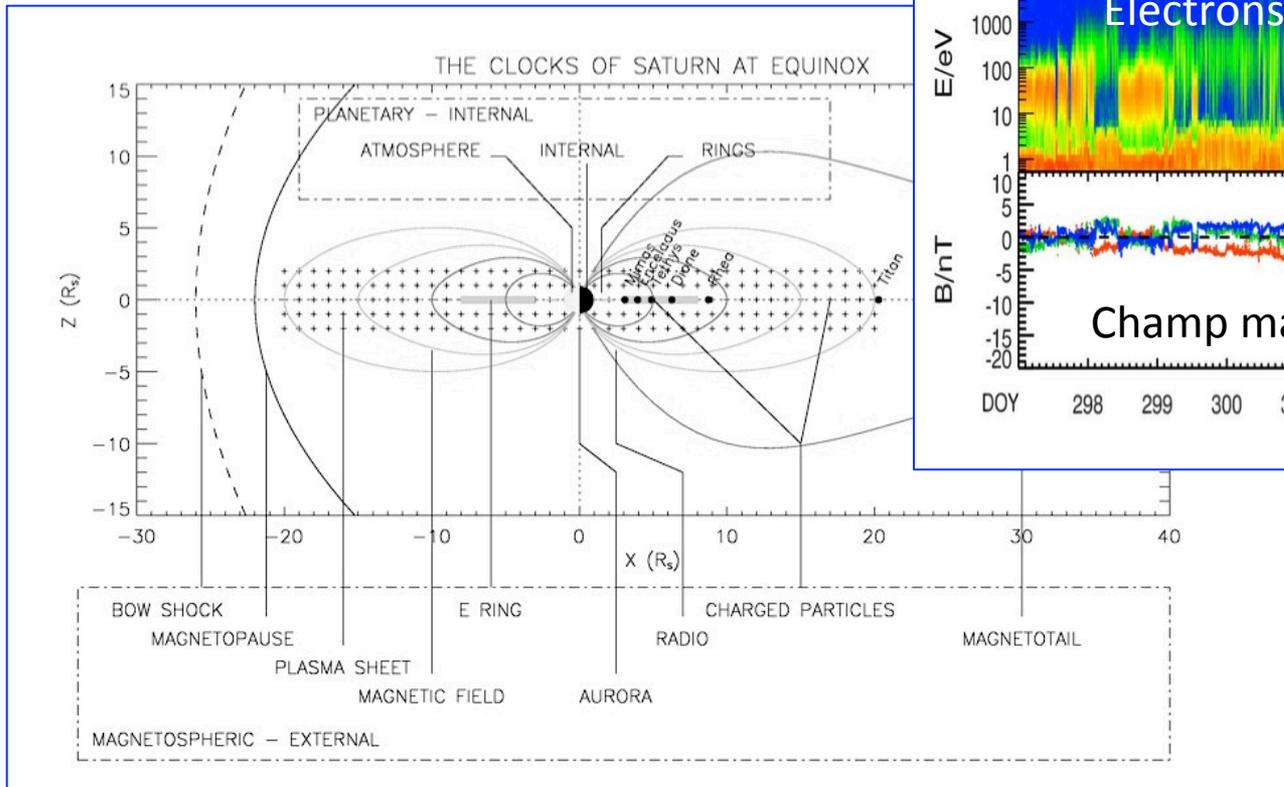
Magnétosphère axisymétrique **mais** :

- **Périodicité SKR de 10.7 h** (*Voyager*)
(= Période de rotation de Saturne?)
- Mais dérive à long terme (1%)
observée (*Ulysses*)
(*Galopeau&Lecacheux, 2000*)
- Existence d'une **double période**
(*Cassini*), Nord & Sud (*Gurnett et al., 2010*)



4. Modulation rotationnelle

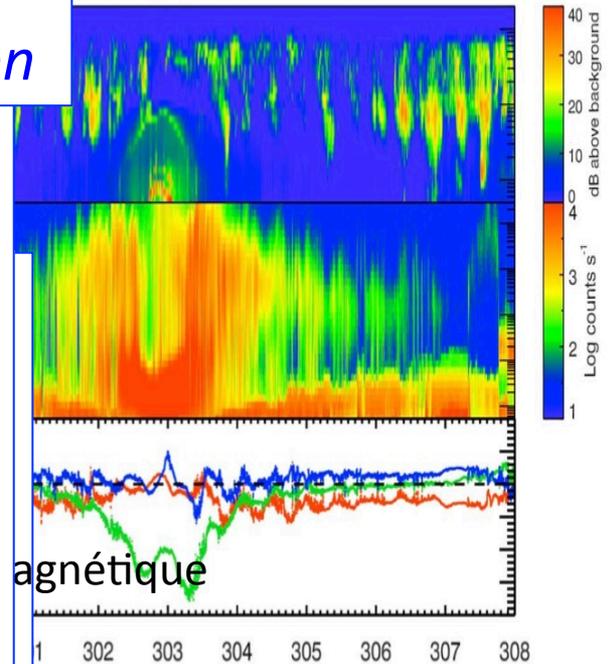
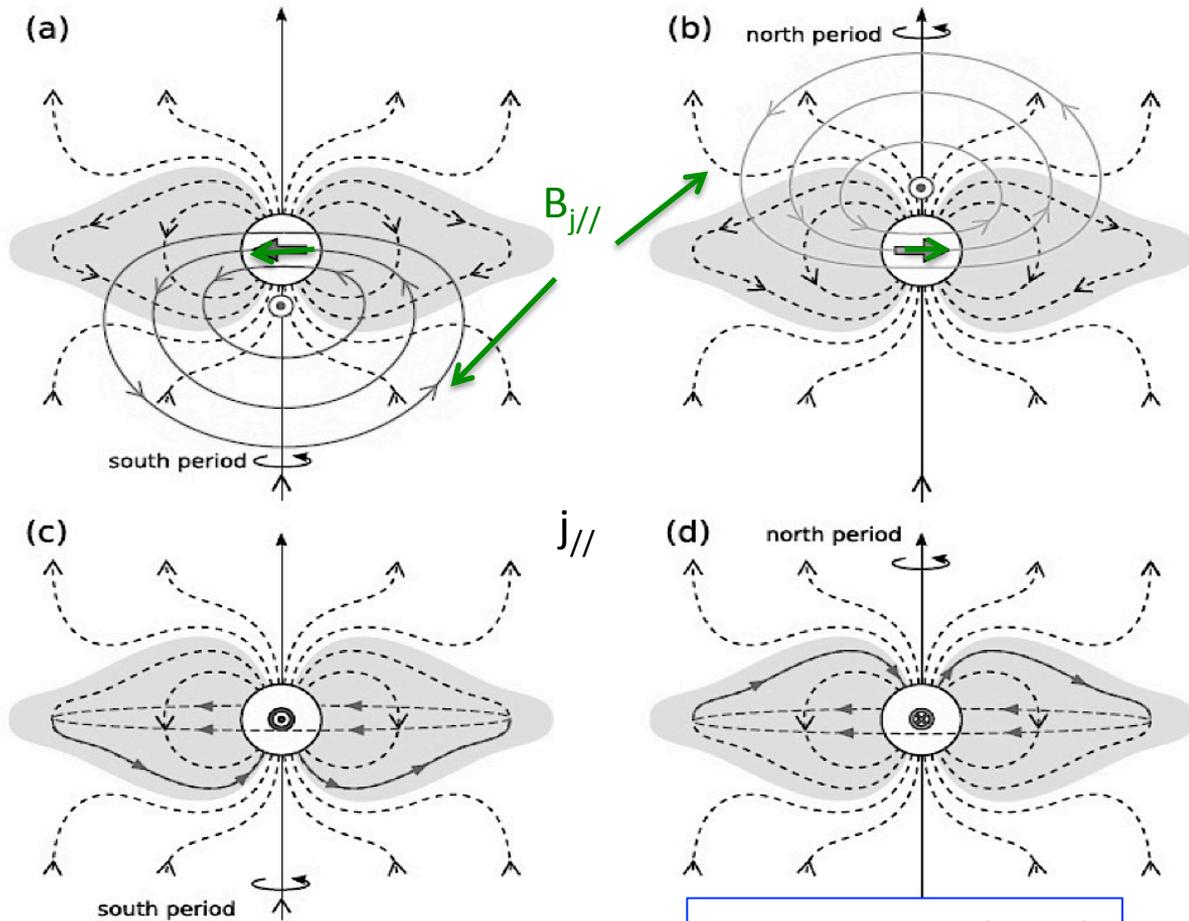
- Oscillations périodiques planétaires //SKR (PPO) **omniprésentes** dans la magnétosphère



4. Modulation rotationnelle

Périodicité SKR & PPO

< Systèmes de courants alignés N&S en rotation



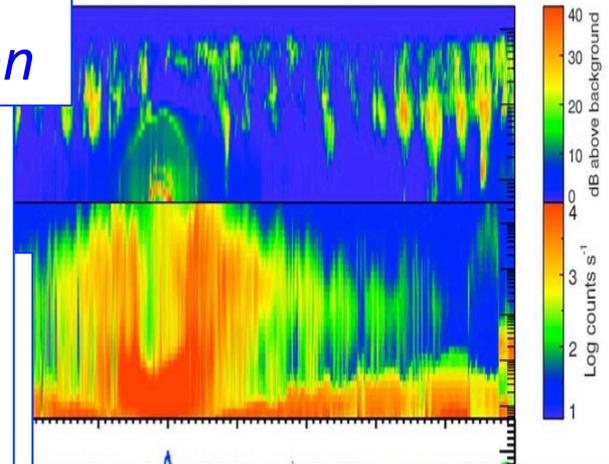
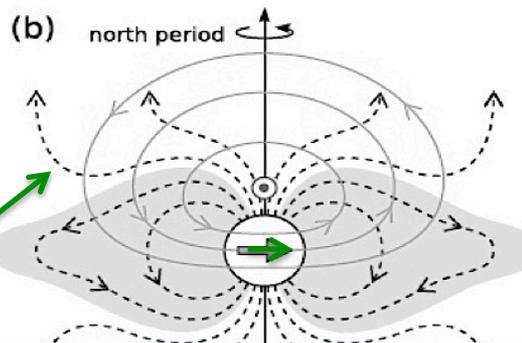
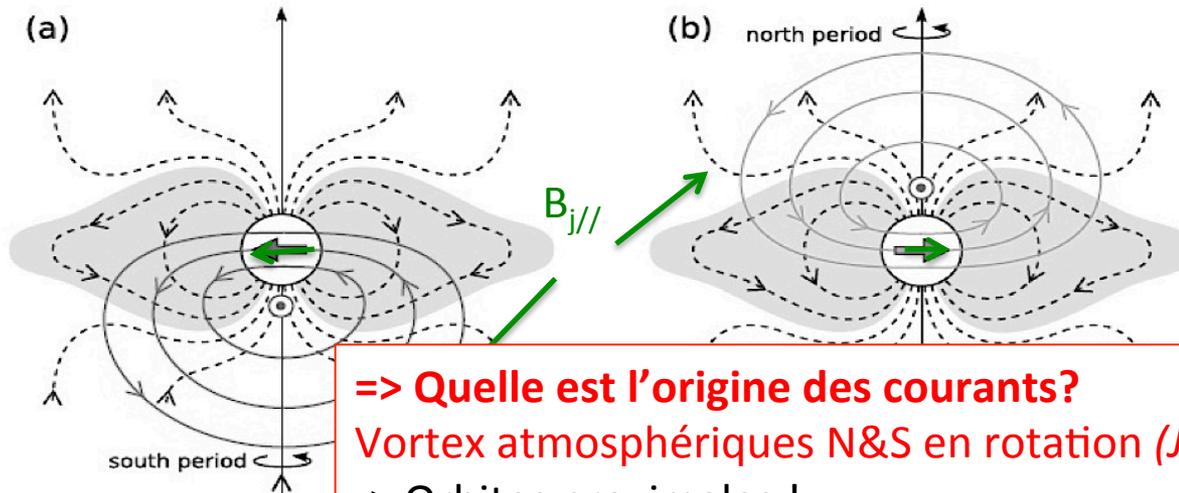
Andrews et al., (2010)

Saturn's book 2015

4. Modulation rotationnelle

Périodicité SKR & PPO

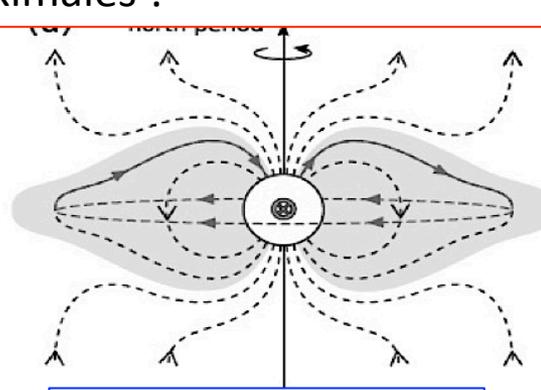
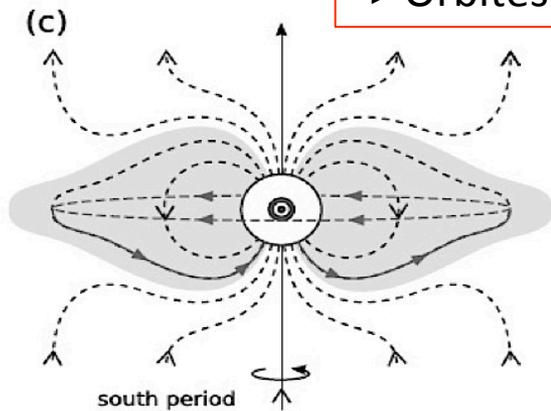
< Systèmes de courants alignés N&S en rotation



=> Quelle est l'origine des courants?

Vortex atmosphériques N&S en rotation (Jia&Kivelson et al., 2012) ?

-> Orbites proximales !



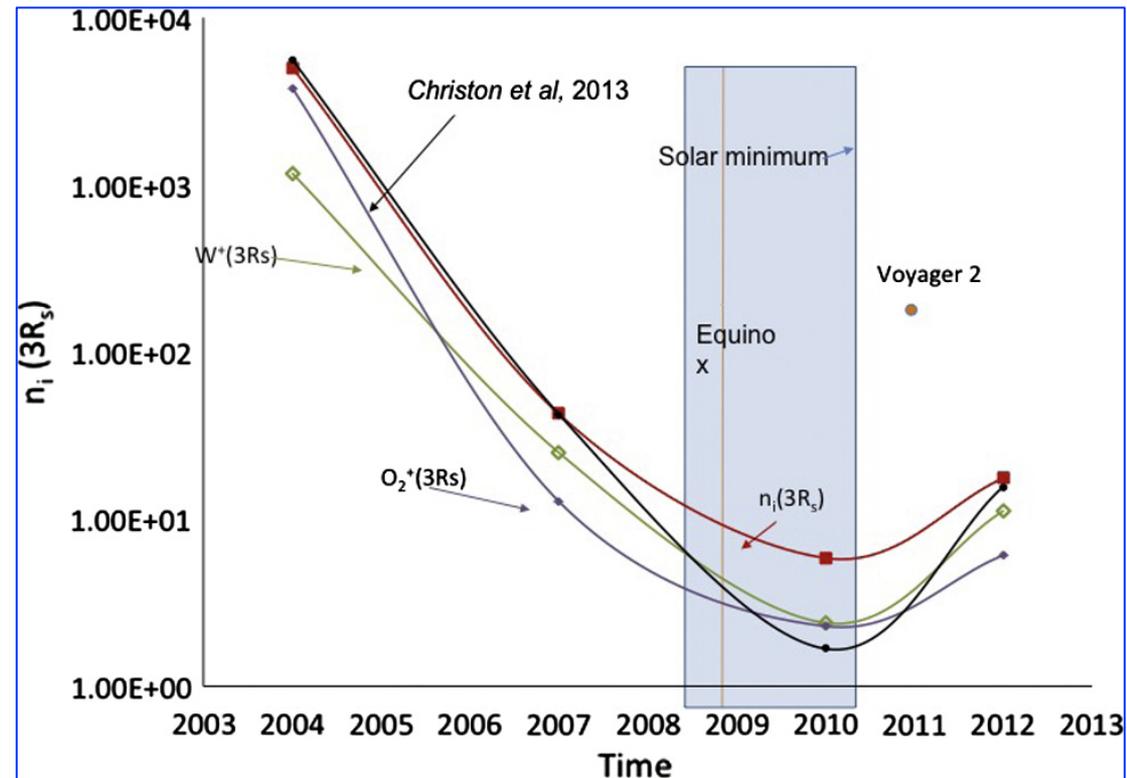
Andrews et al., (2010)

Saturn's book 2015

5. Variations saisonnières



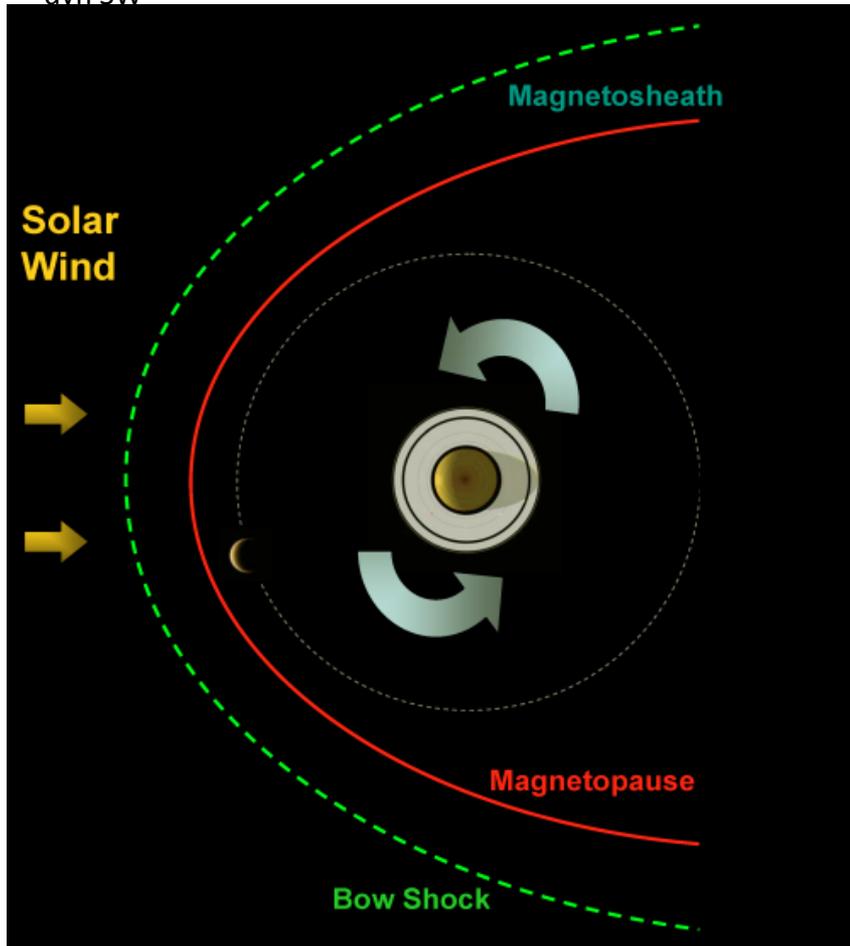
- Obliquité de Saturne = 27°
- Variabilité saisonnière de la **densité ionique** n_{W^+} entre les anneaux et Encelade (*Elrod et al., 2014*). Source ions= ionosphère des anneaux produite par photolyse des anneaux $\langle \{T_{ring}, i_{hv}, Flux_{UV}\}$
- Variabilité saisonnière de la **configuration du magnétodisque** (*Arridge et al., 2008; Sergis et al., 2011*)



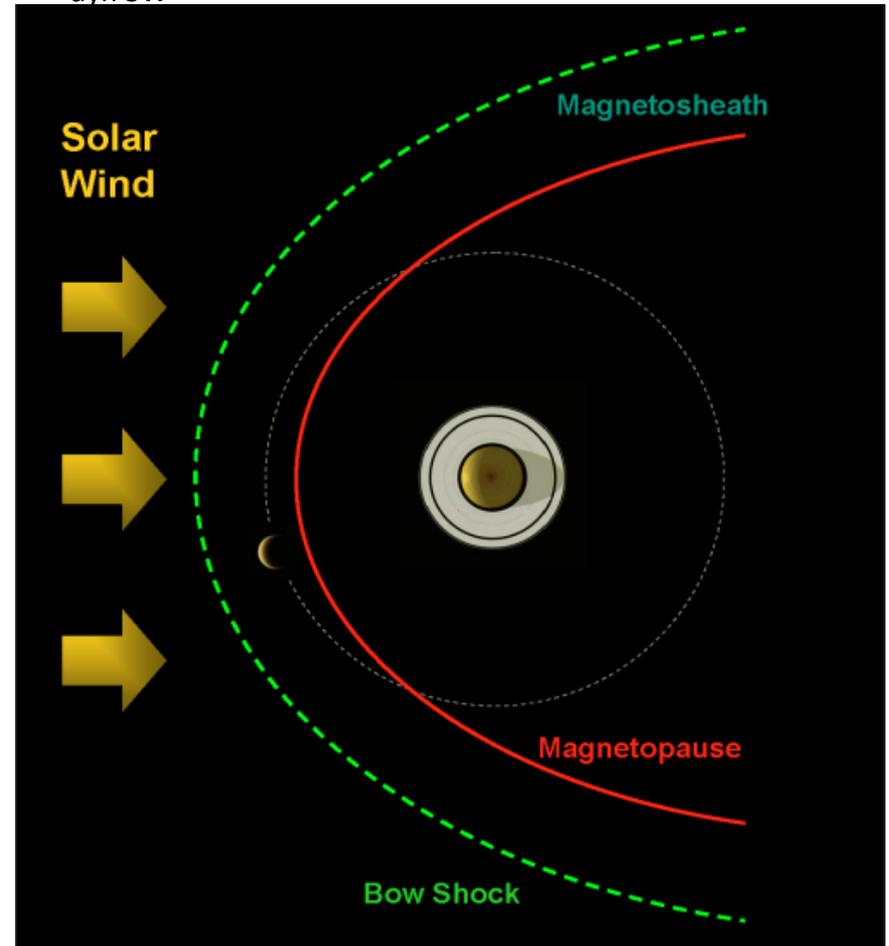
10 ans = 1/3 année kronienne

Titan dans le vent solaire

$P_{\text{dyn SW}}$ nominale



$P_{\text{dyn SW}}$ élevée



Bertucci et al., Science ,2008

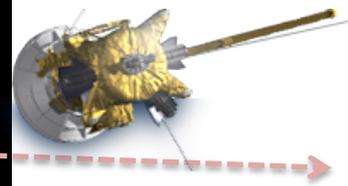
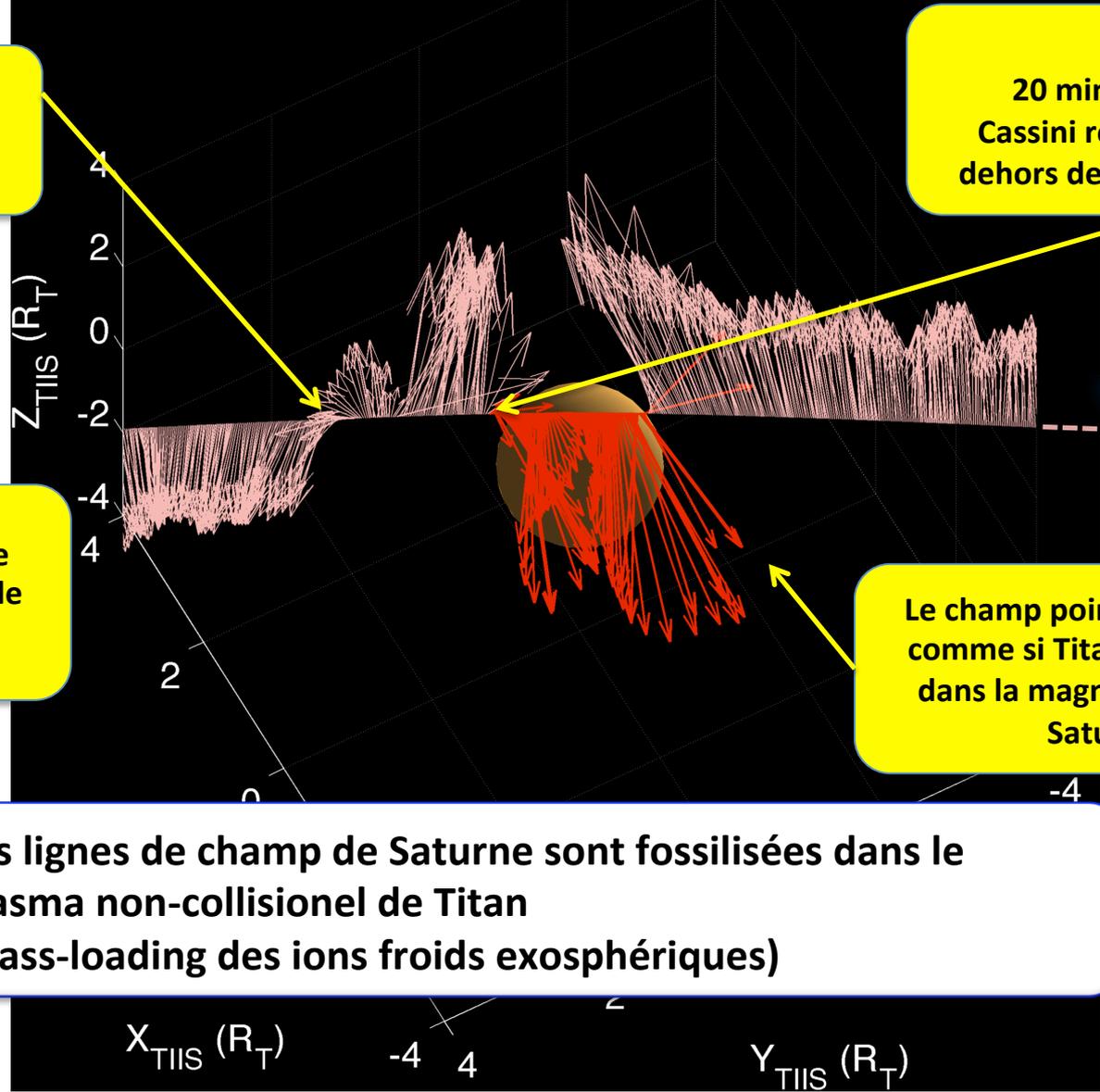
Titan dans le vent solaire

Cas 1) Observations de MAG Survol T32 (Bertucci et al., Science, 2008)

1
Cassini sort de la magnetosphère de Saturne

L' IMF pointe vers le haut. Il est attendu de même pour Titan.

2
20 minutes plus tard:
Cassini rencontre Titan en dehors de la magnetosphère

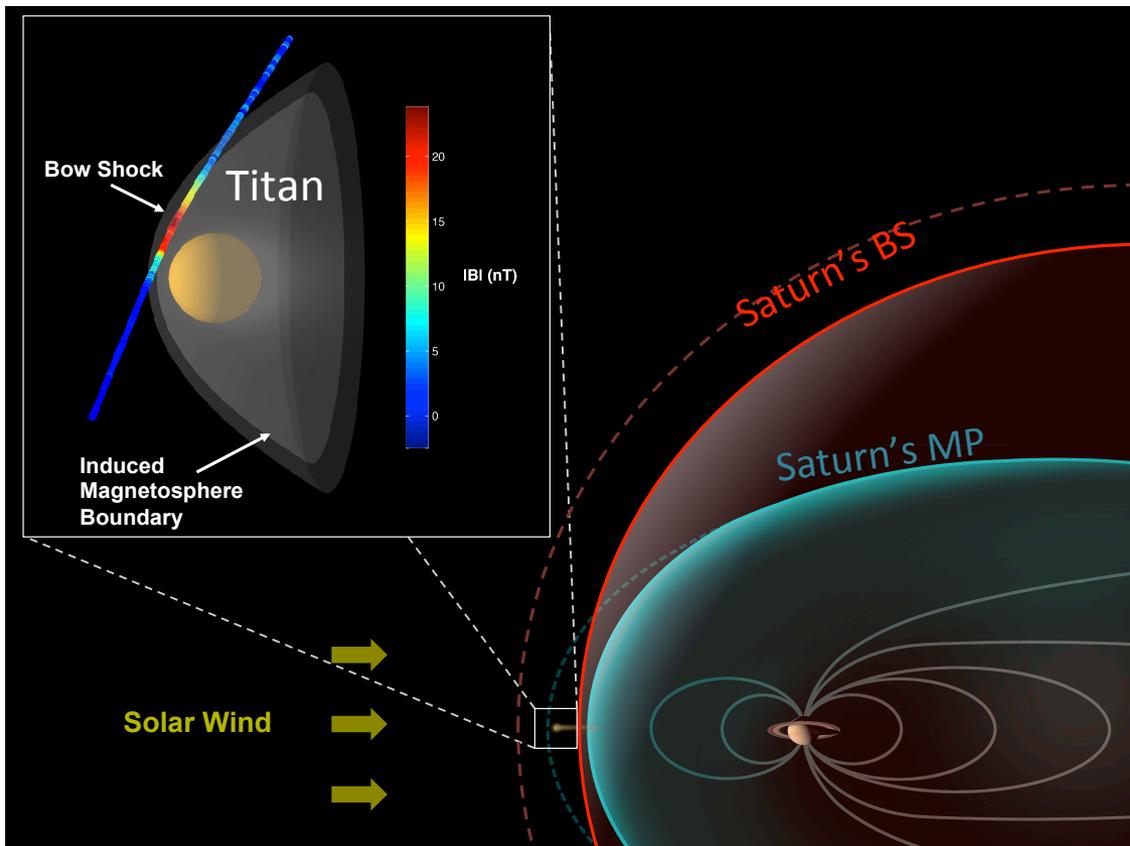


Cassini's trajectory

Le champ pointe vers le bas, comme si Titan était encore dans la magnetosphère de Saturne.

⇒ Les lignes de champ de Saturne sont fossilisées dans le plasma non-collisionnel de Titan
(mass-loading des ions froids exosphériques)

Cas 2) Observations de MAG Survol T96 (Bertucci et al., GRL, 2015)



- Compression extrême de la magnétosphère
- Titan dans le vent solaire supersonique
- Interaction similaire à Mars, Venus, comètes
- Magnétosphère induite formée par le champ IMF autour de l'ionosphère

(Bertucci et al., GRL, 2015)

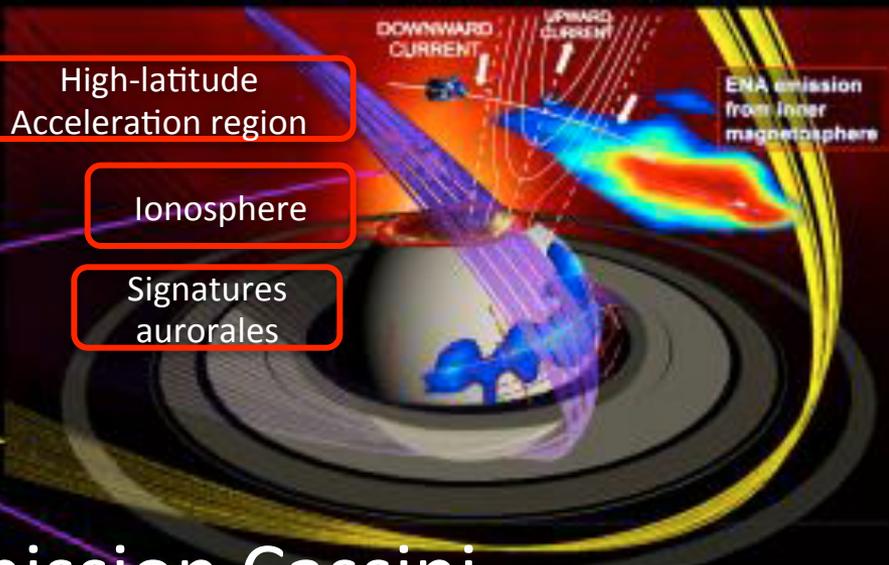
F-Ring Orbits



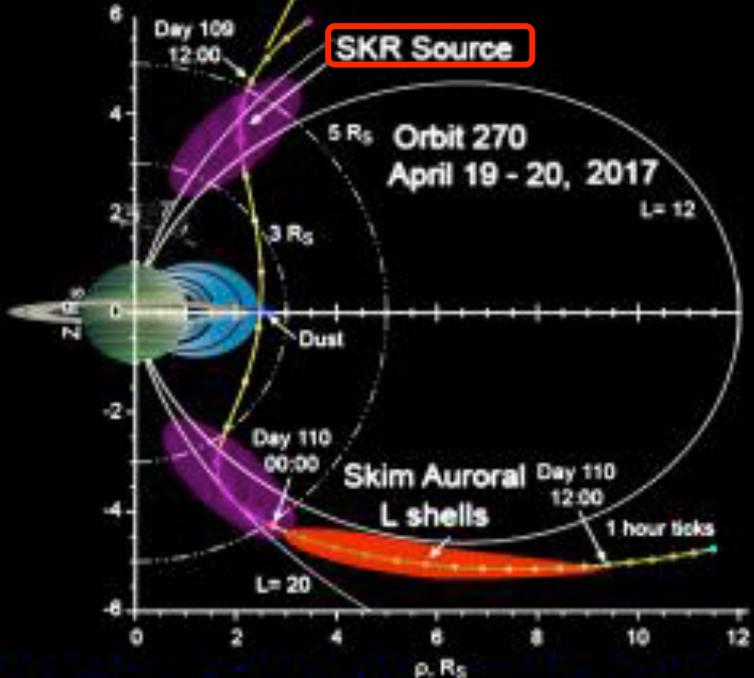
High-latitude Acceleration region

Ionosphere

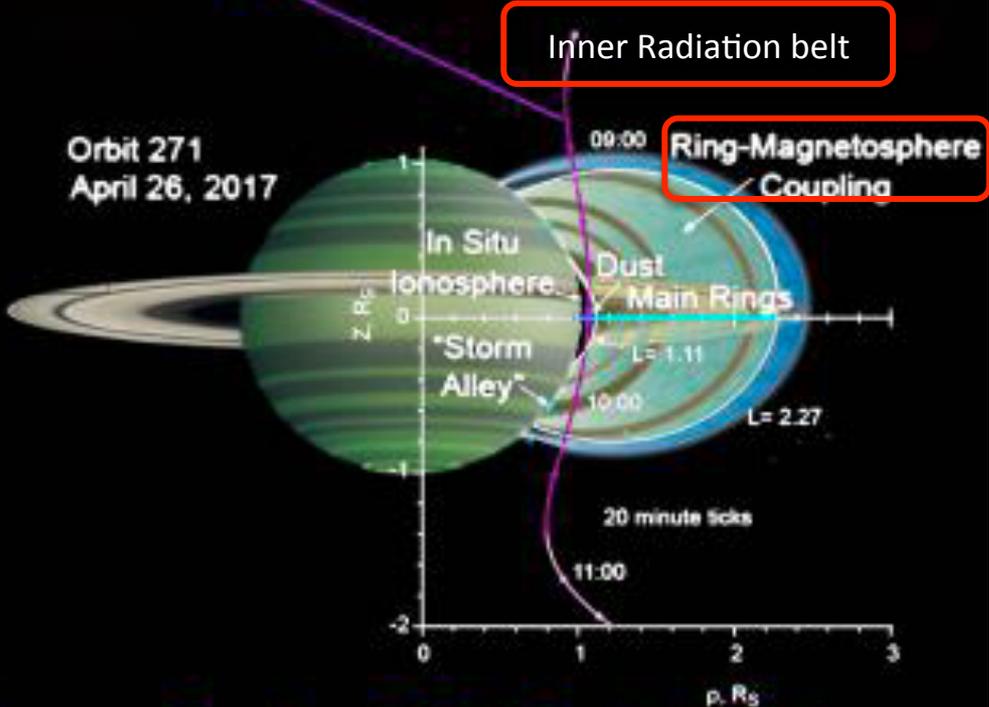
Signatures aurales



Phase finale de la mission Cassini



F-Ring Orbit Periapsis Science



Proximal Orbit Periapsis Science

The end