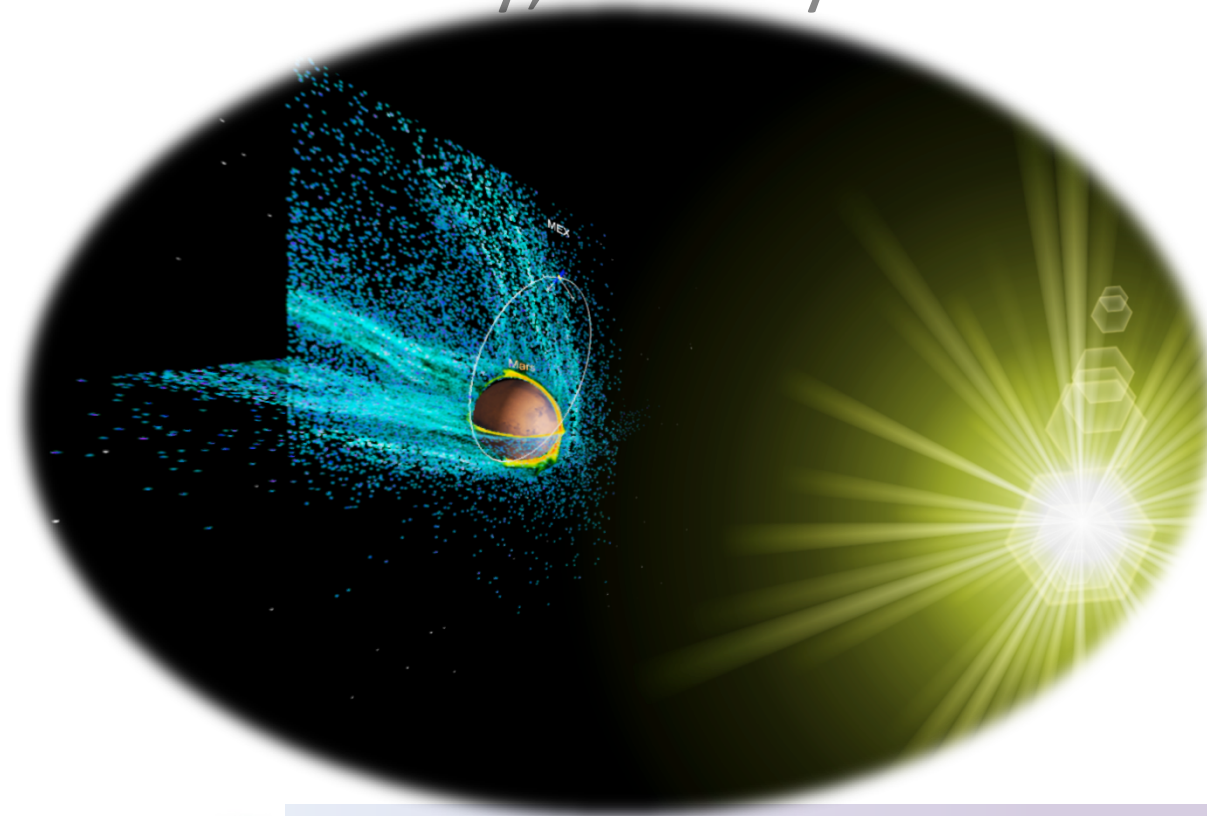
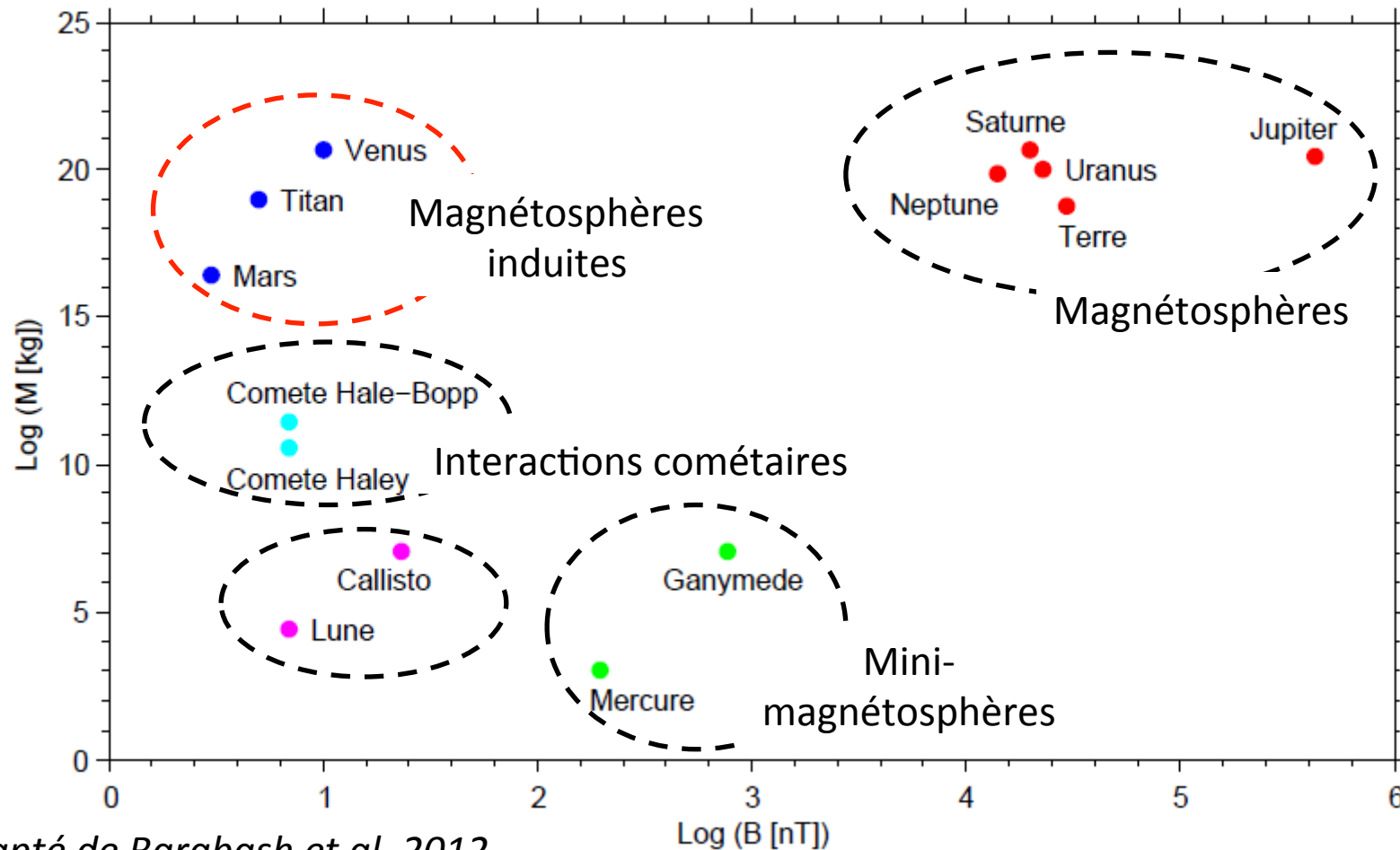


Réponse de l'environnement martien à des variations temporelles du vent solaire

R. Modolo, F. Leblanc, L. Leclercq, S. Hess, JY
Chaufray, S. Curry et al



Les classes d'interaction vent solaire – objets dans le système solaire

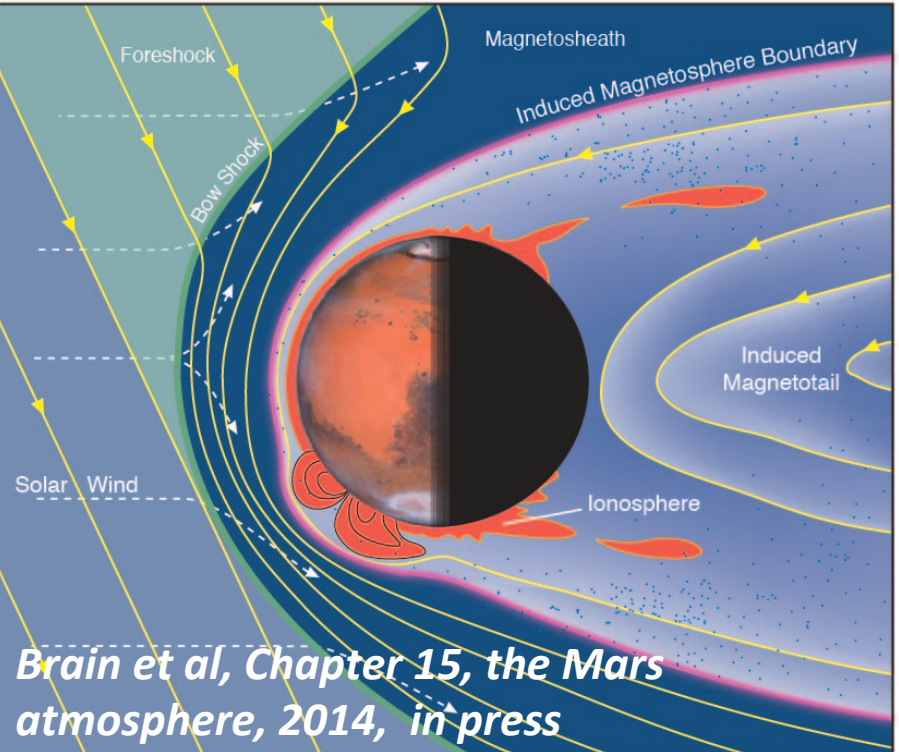


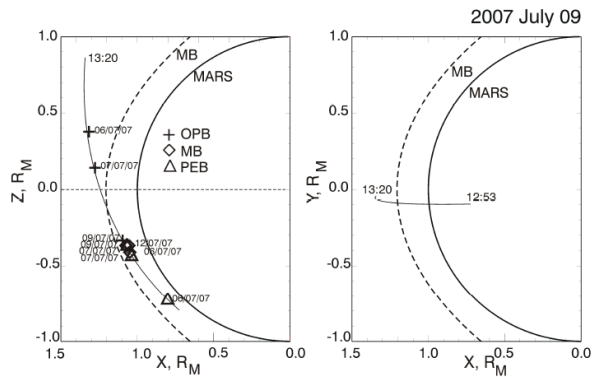
Adapté de Barabash et al, 2012

Les observations *in situ* à Mars

Mission	Dates	Résultats clefs
Mariner 4,6,7,9	1965-1972	•Détection du choc et de la magnétogaine •Premiers profils de densité ionosphérique
Mars 2,3,5	1971-1974	•Observations du choc, de la gaine et de la magnétosphère interne
Viking 1,2	1976	•Profils ionosphériques <i>in situ</i> (densité, composition, température)
Phobos 2	1989	• observation du sillage martien •Échappement des ions
Mars Global Surveyor	1997-2006	•Découverte des sources crustales •Échantillonnage de l'ionosphère jusqu'au pic ionosphérique
Mars Odyssey & Mars Reconnaissance orbiter	2001 – aujourd'hui	•Profils de densité ionosphérique
Mars Express	2004 – aujourd'hui	•Découverte des aurores •Détection de l'ionopause •Confirmation de l'équilibre de pression
Rosetta	2007	•Traversée du choc dans le sillage lointain
Maven	2014 – aujourd'hui	•Résultats à venir !!

Représentation schématique de l'interaction

Magnétosphères induites (Mars,...)	Région / Frontière	Caractéristiques
Atmosphère + Ionisation $\Rightarrow$ Ionosphère (obstacle conducteur) IMF+ionosphère $\Rightarrow$ génère des courants induits $\Rightarrow$ affecte le mouvement des particules du vent solaire  <i>Brain et al, Chapter 15, the Mars atmosphere, 2014, in press</i>	Pré-choc	Région magnétiquement connecté au choc(ondes, particules réfléchies,...)
	Choc	$\sim 1,6R_m$ au point subsolaire, $\sim 2,6 R_m$ au terminateur
	magnétogaine	Entre le choc et l'IMB, peuplé d'ions vent solaire chauffés
	Frontière de la magnétosphère induite (IMB)	$\sim 1,3R_m$ au point subsolaire, $\sim 2,1 R_m$ au terminateur Région séparant le plasma vent solaire du plasma planétaire
	Magnétosphère induite	Peuplé d'ions planétaire et dominé par la pression magnétique
	Ionopause	$\sim 450\text{km}$ altitude (jour), pression du plasma thermique devient dominant
	Ionosphère	Région de plasma planétaire de faible énergie
	Couche de courant (queue)	Couche de plasma peuplé d'ion planétaires, à l'interface entre les deux lobes magnétiques

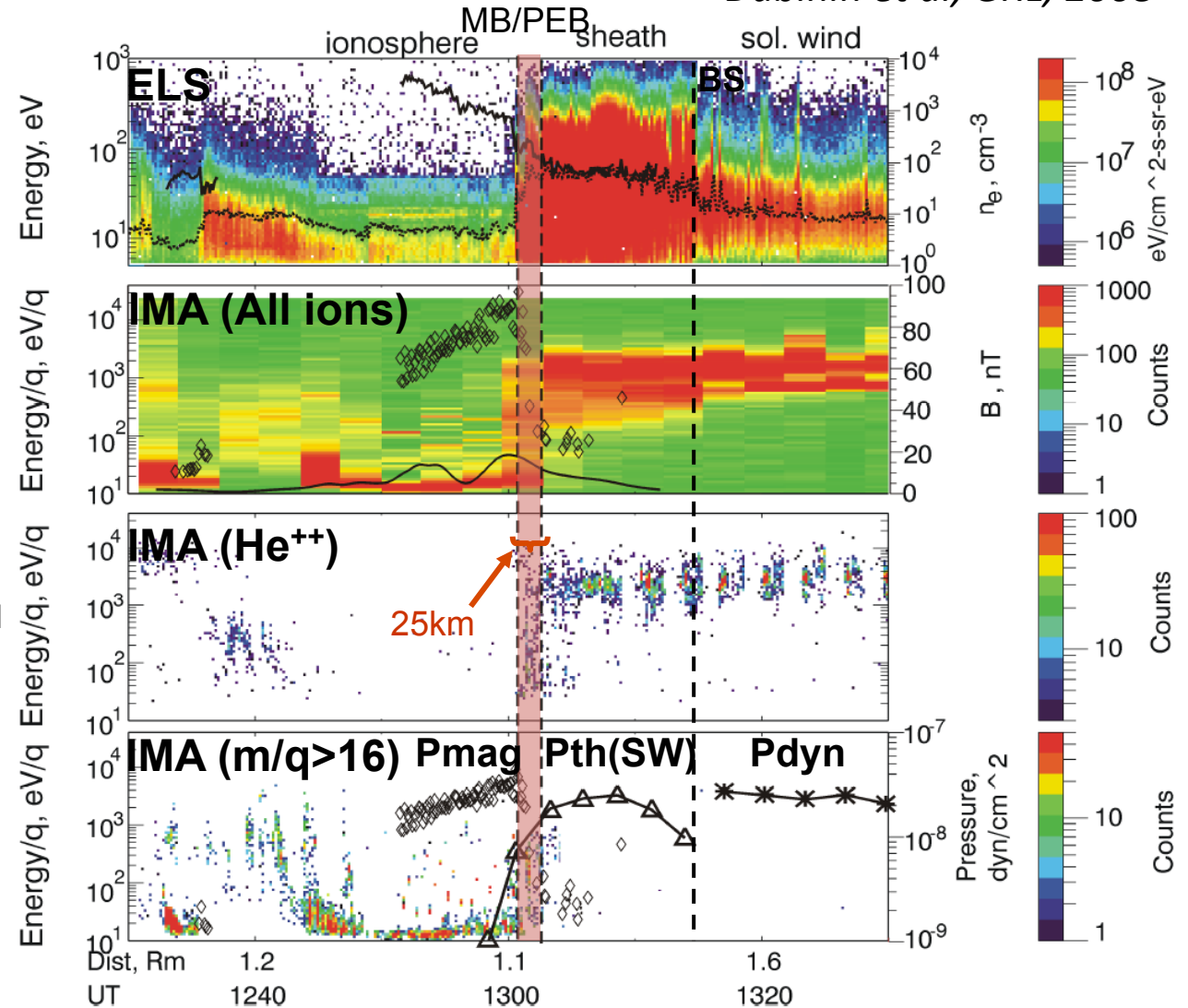


Du vent solaire à l'ionosphère martienne

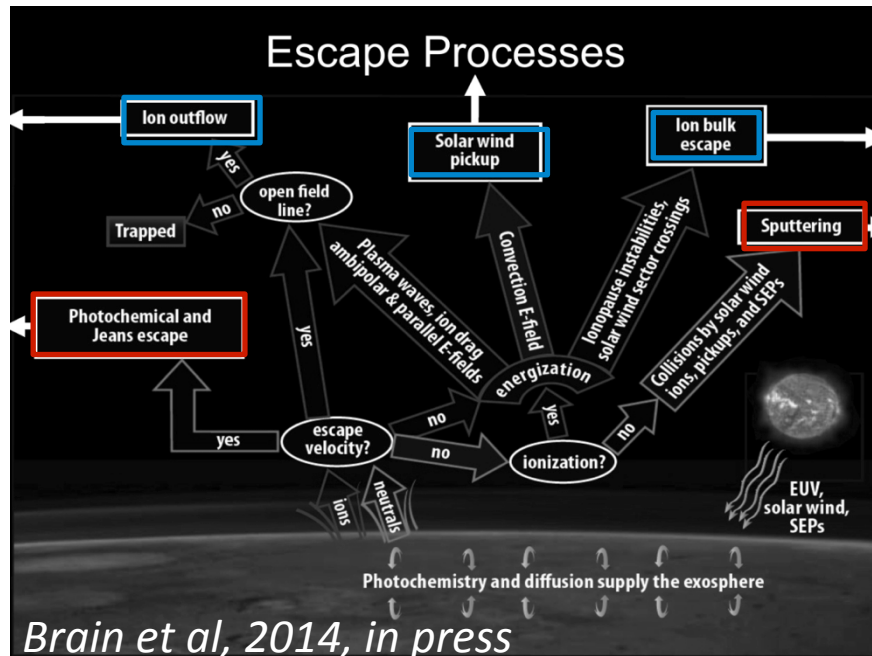
Dubinin et al, GRL, 2008

□ Changement abrupte à l'IMB, saut de B (> 70 nT), mélange de plasma planétaire et vent solaire

□ Equilibre de pression au passage des différentes frontières



Érosion de l'atmosphère martienne



Quatre processus ont influencé **l'érosion atmosphérique** :

- échappement hydrodynamique
- érosion par bombardement
- adsorption par la surface ou sous-surface
- échappement dans l'espace** $\Rightarrow$ *supposé* être le processus permanent dominant sur les 3.8 GY.

Réservoir pour l'échappement (neutre et ionisé):

Thermosphère (100-200 km) : CO_2 , CO , O , N_2

Exosphère (> 200km): O

Ionosphère (130-300 km): O_2^+ , O^+

Echappement neutre : perte globale de quelques 10^{26} particules /s.

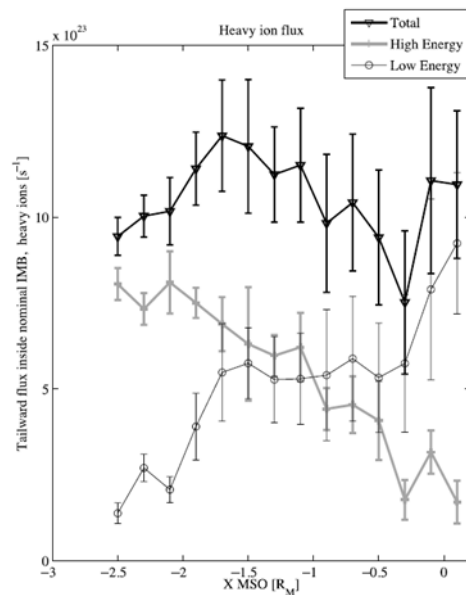
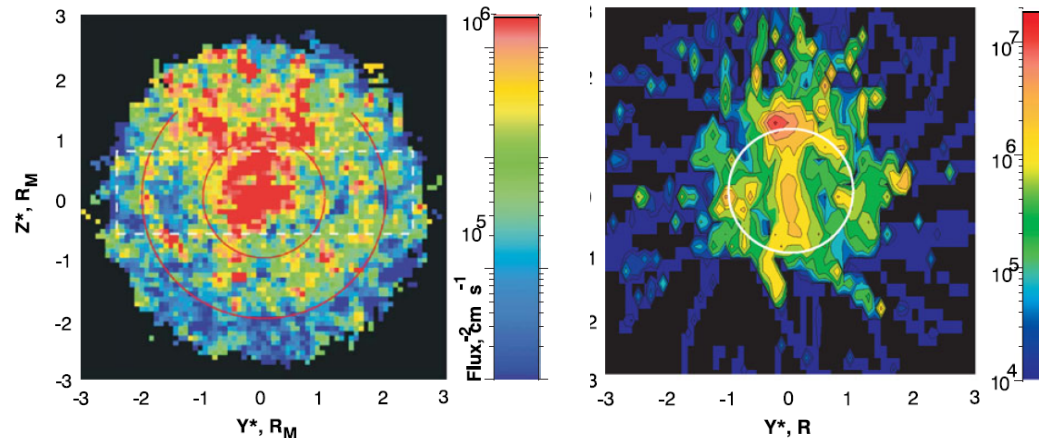
Essentiellement H par échappement de Jeans et O par échappement photochimique

Echappement ionique : échappement des pick-up, « ion outflow » (plasma de basse énergie), évasion en « vrac » (détachement de portion d'ionosphère)

Mars-Express : $\sim 2 \times 10^{24}$ ions/s essentiellement dominé par du O^+ (Nilson et al, 2011)

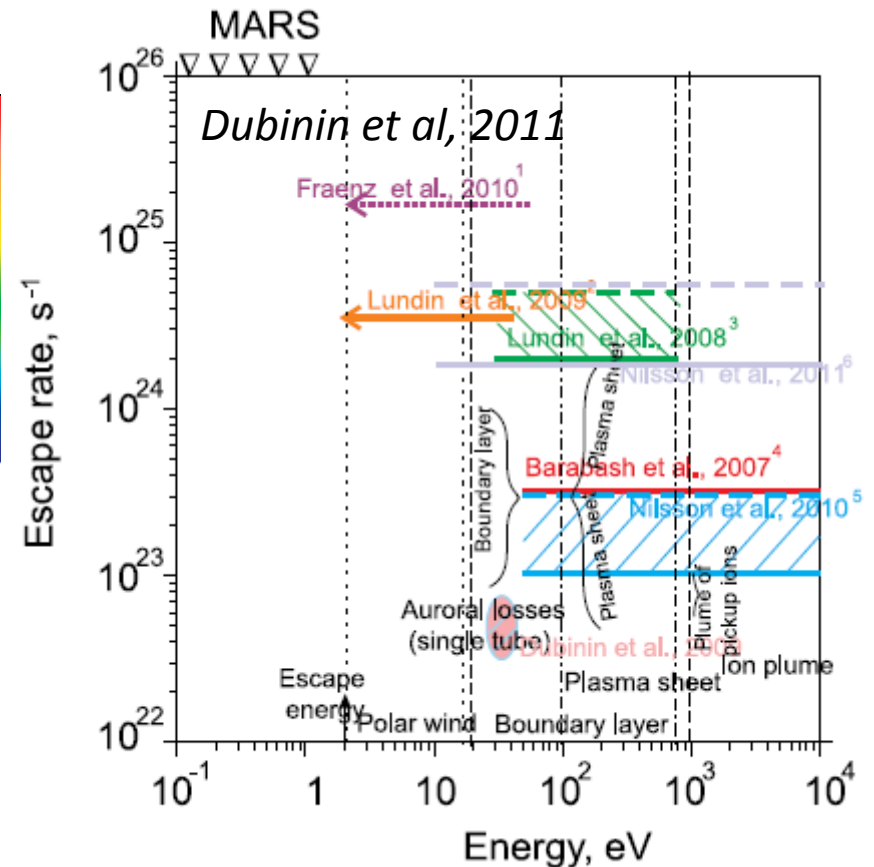
Echappement ionique

- Echappement O⁺ : $10^{23} - 10^{25}$ ions/s, évidence d'asymétrie



Barabash et al, 2007; Fedorov et al, 2008, 2011

Nilsson et al, 2011



Mars-Express : $\sim 2 \times 10^{24}$ ions/s
essentiellement dominé par du O⁺ (Nilsson et al, 2011)

Variations temporelles des paramètres affectant l'interaction

Les conditions externes varient constamment => **ré-ajustement continue** du système martien.

Drivers	caractéristiques
<u>IMF</u>	- orientation du champ interplanétaire => $E \downarrow SW = -V \downarrow SW \times B \downarrow IMF$ influence les ions pickups, le pré-choc - $\ B \downarrow IMF\$ agit sur la vitesse d'Alfvén, le nombre de Mach (qui influence la forme du choc), le β - La variabilité temporelle de l'IMF affecte les courants ionosphériques
<u>Vent solaire</u>	- Densité et vitesse du VS affecte la pression dynamique qui agit sur l'équilibre de pression (et sur le champ électrique de convection) - La vitesse et la température modifie la vitesse du son qui influence le nombre de Mach magnéto-sonique (et donc le choc)
<u>Flux EUV</u>	- Première source d'ionisation dans l'ionosphère - Affecte légèrement l'altitude de l'IMB et du choc
<u>Rotation de la planète</u>	Les sources crustales sont très localisées => rotation de la planète expose différentes « régions crustales » au VS

L'approche hybride

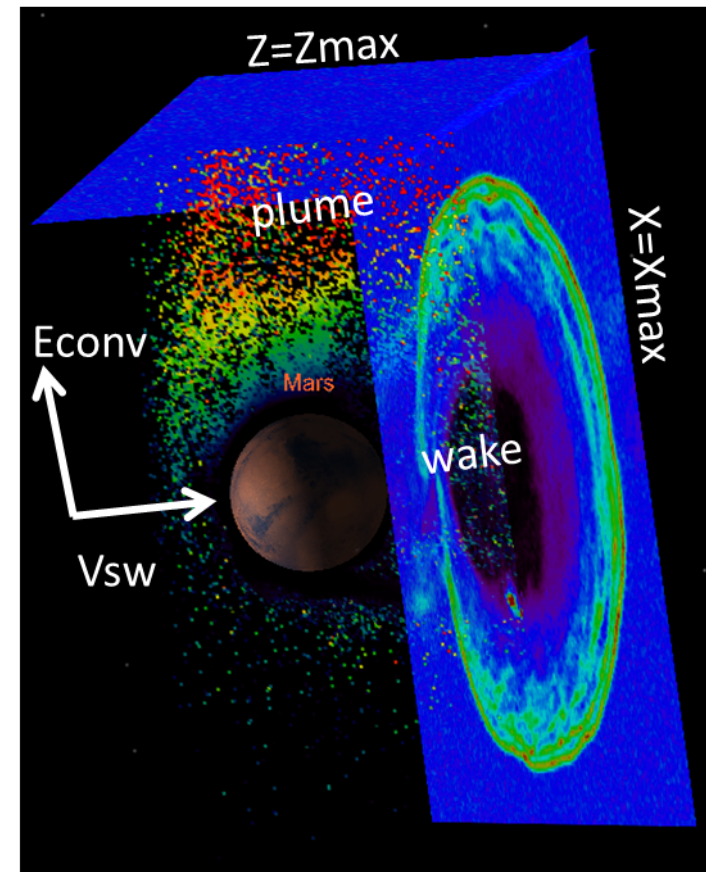
○ Rayon de giration des ions $\approx$ rayon de l'obstacle

$\Rightarrow$ aspect cinétique important $\Rightarrow$ modélisation fluide insuffisante

○ Formalisme hybride

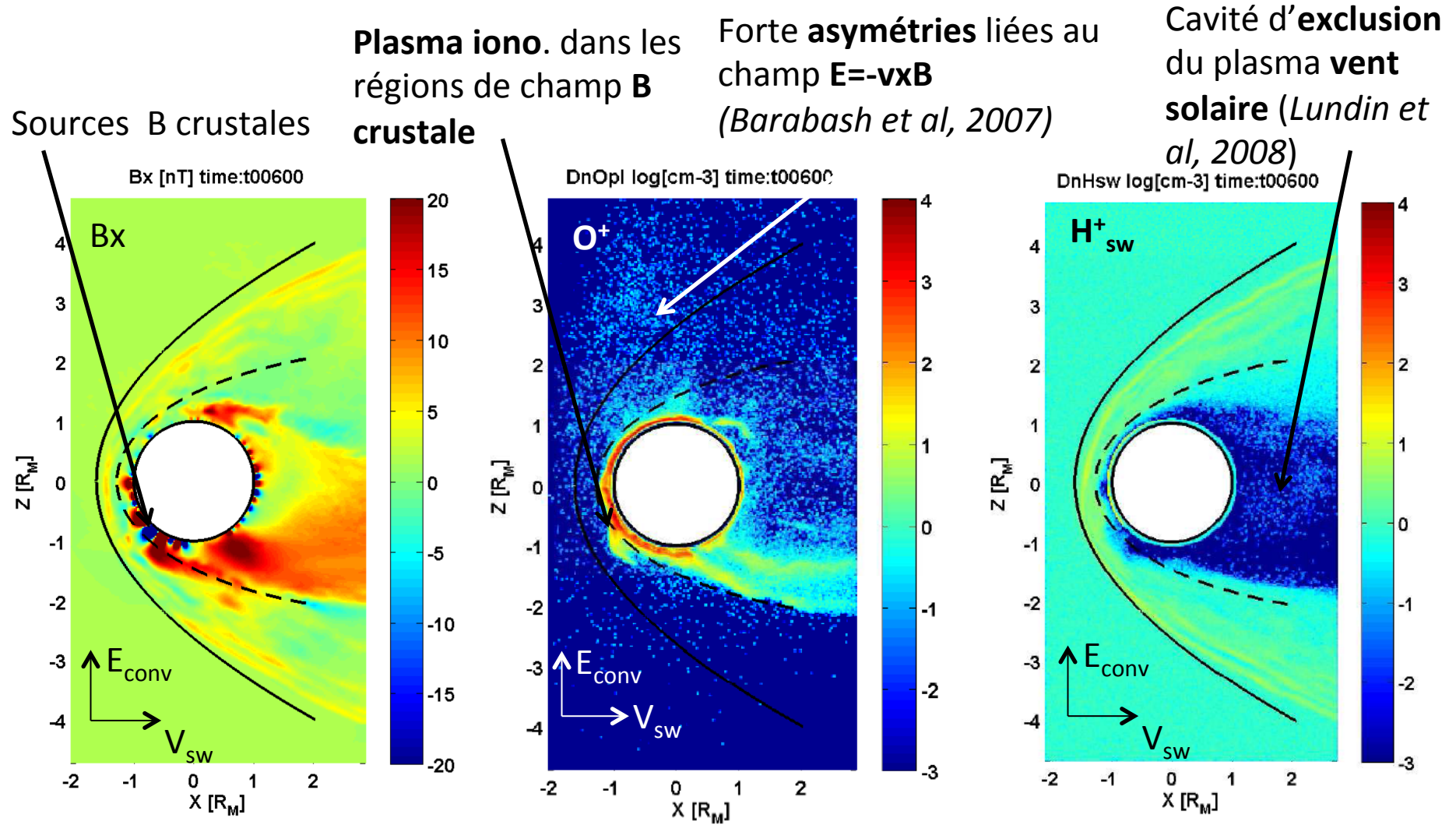
- Les ions sont caractérisés par des macro-particules (descr. cinétique)
 - chaque macro-particule a une charge, une masse et une identité chimique
- Les électrons sont traités par un fluide sans inertie

○ Evolution temporelle du champ

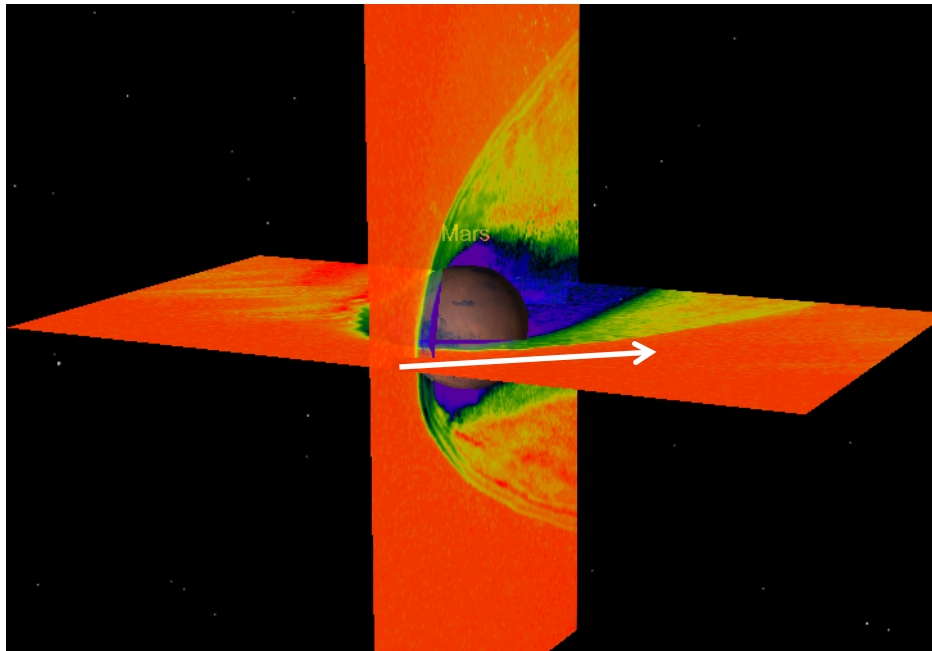


L'environnement plasma Martien (simulation)

Développement d'un **modèle global d'environnements planétaires** (*Modolo et al, 2005, 2008, 2012, 2015 in preparation; Hess et al, 2015, in prep.*)



Rotation de l'IMF

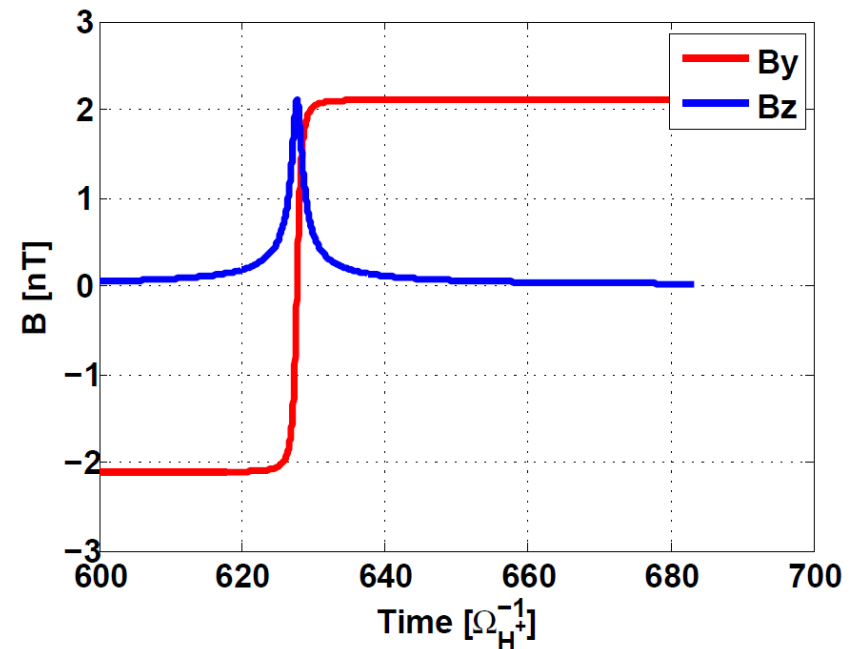


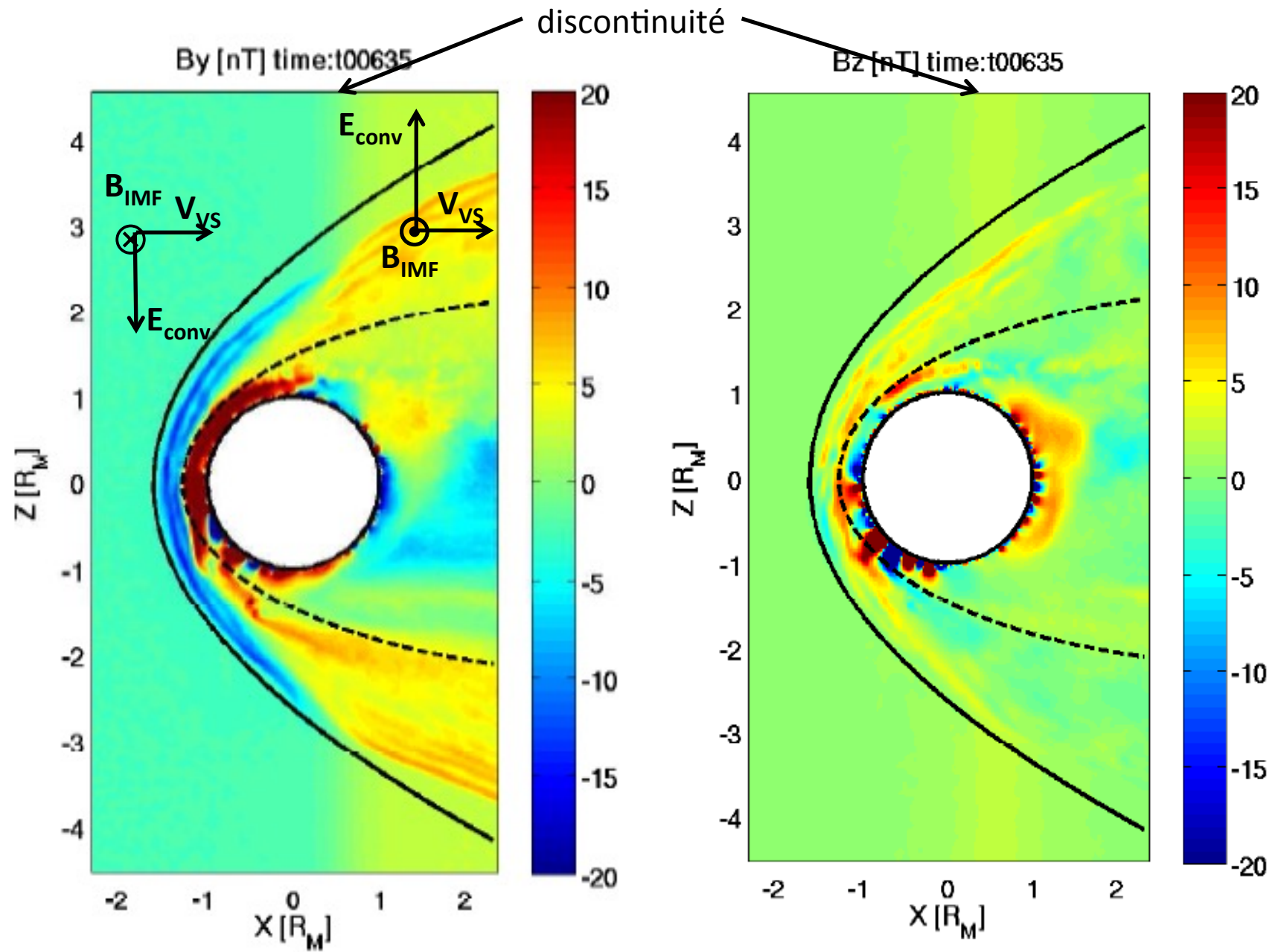
Objectif : étudier la **réponse de la magnétosphère martienne** lorsqu'une **discontinuité rotationnelle** balaye l'environnement de la planète :

Rotation autour de l'axe X_{mso} des composantes B_y et B_z

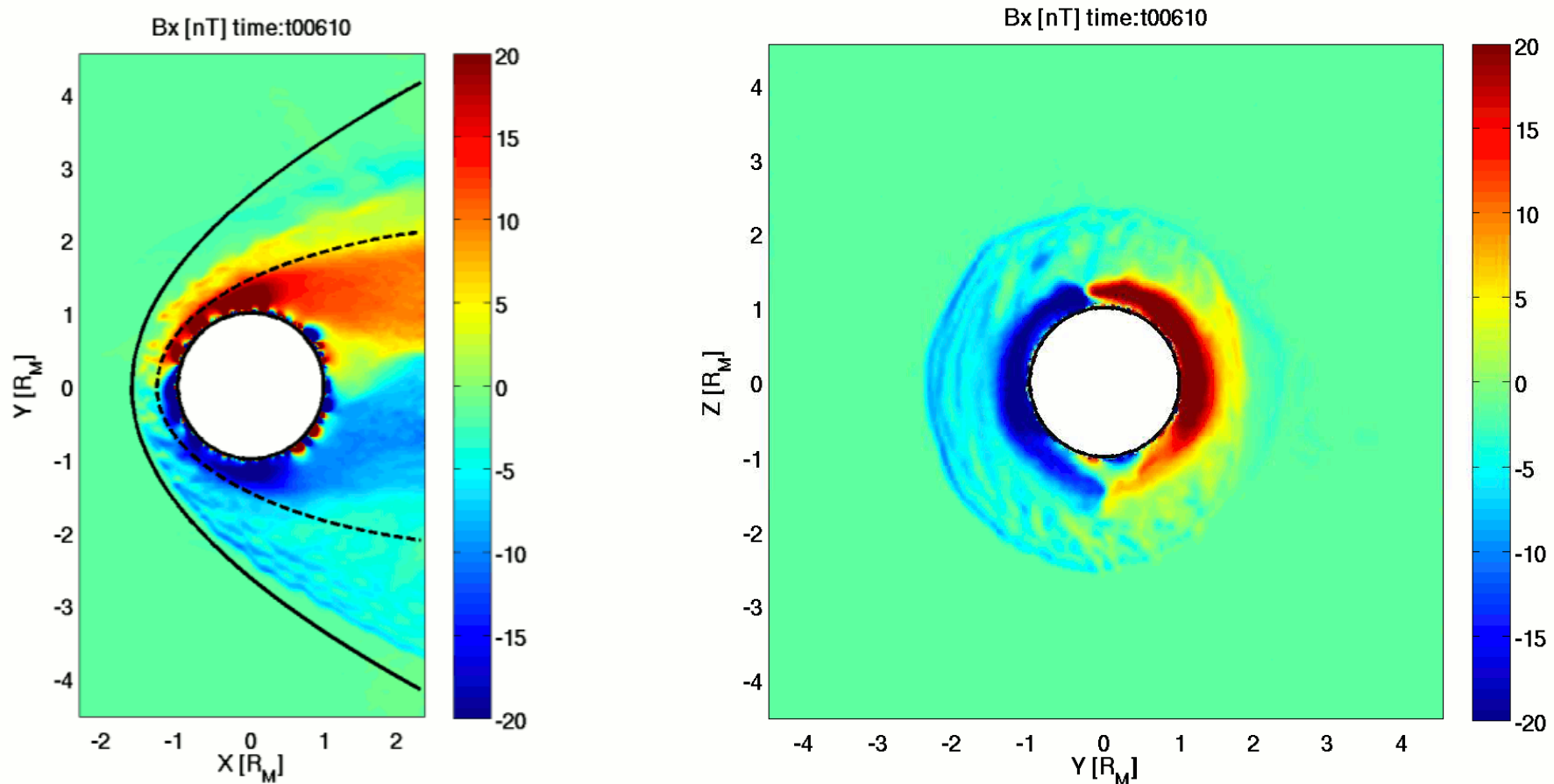
(180°) sur $\sim 5 \Omega_H \pm 1 = 15$ s convecté par le vent solaire

Variations continues de l'IMF en quelques s-min.



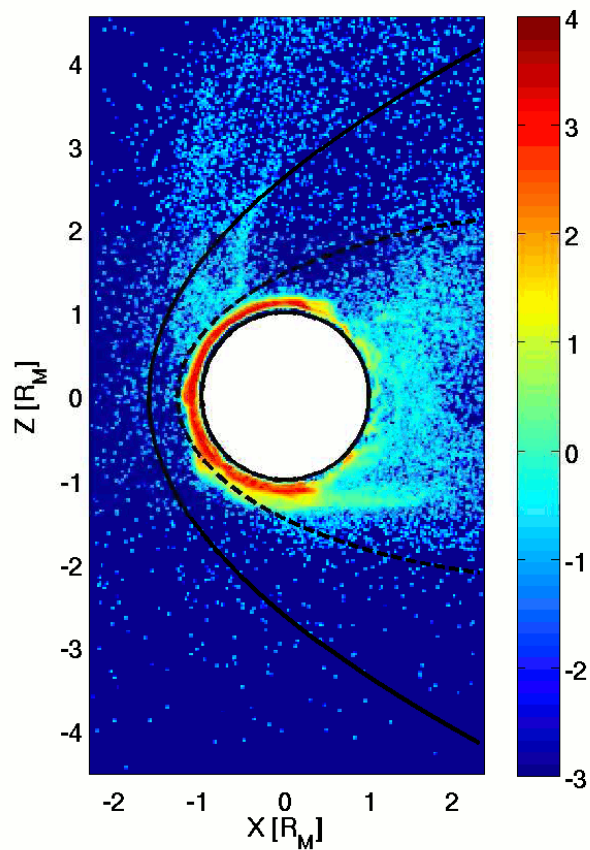


Ré-organisation rapide de la magnétosphère

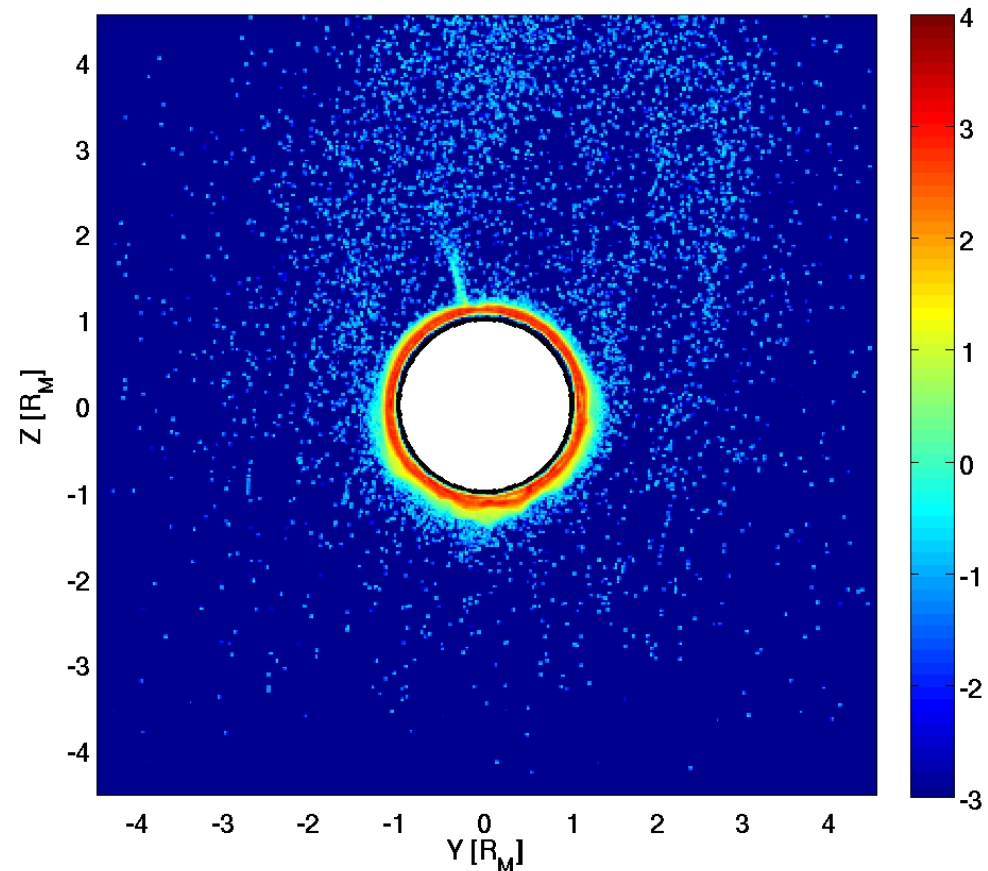


- *Réponse du choc* : adaptation quasi-instantanée
- *Réponse de l'IMB* : quelques dizaines de s (évacuation des anciennes lignes de champ et empilement suivant la nouvelle configuration)
- *Réponse des lobes magnétiques* : un centaine de secondes pour réajustement des lobes suivant la nouvelle configuration de l'IMF

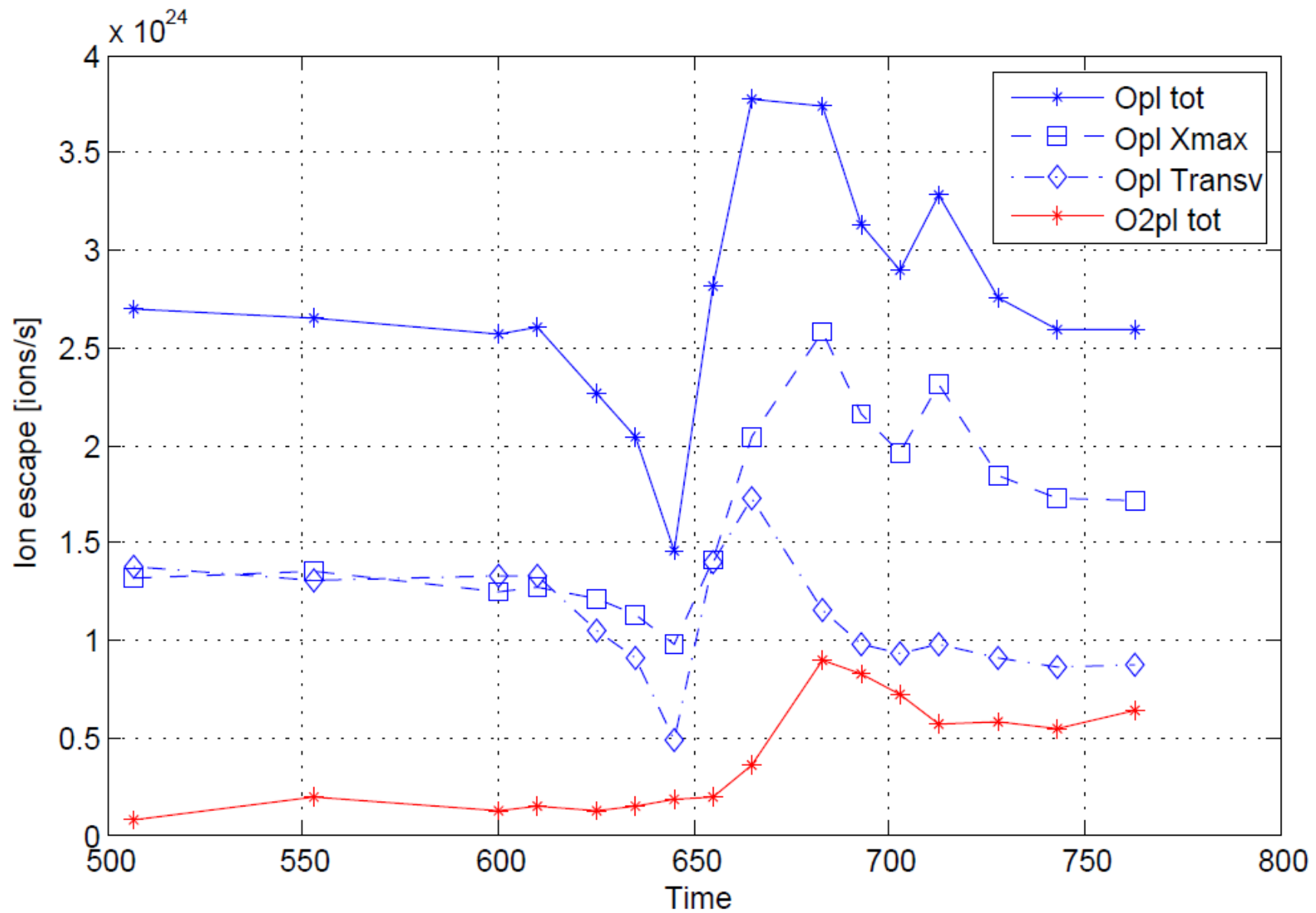
DnOpl_{1,4,3,4,00610.nc} log[cm-3] time:t00610



DnOpl_{1,4,3,4,00610.nc} log[cm-3] time:t00610

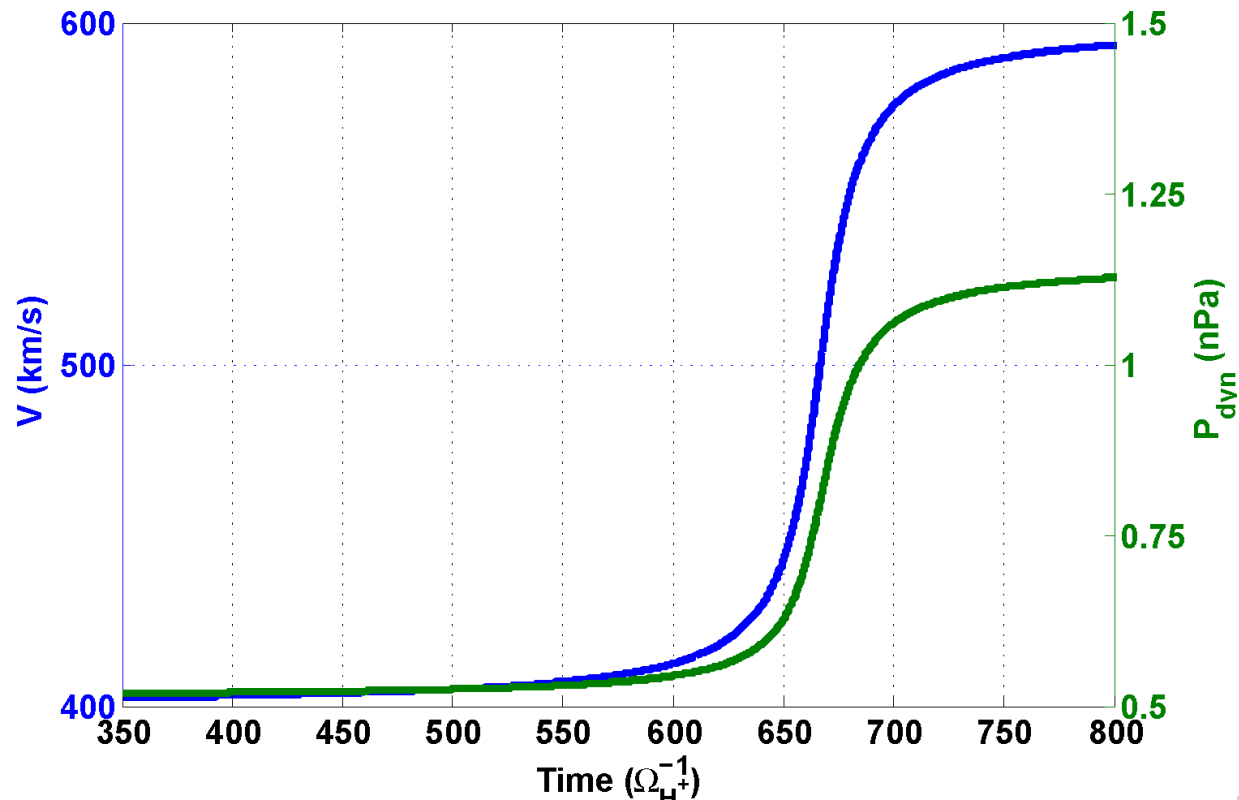


- Ajustement du plasma planétaire à la nouvelle configuration (plume) : 1-2 min
- Possibilité de reconnexion près des sources crustales et évacuation en vrac du plasma ionosphérique

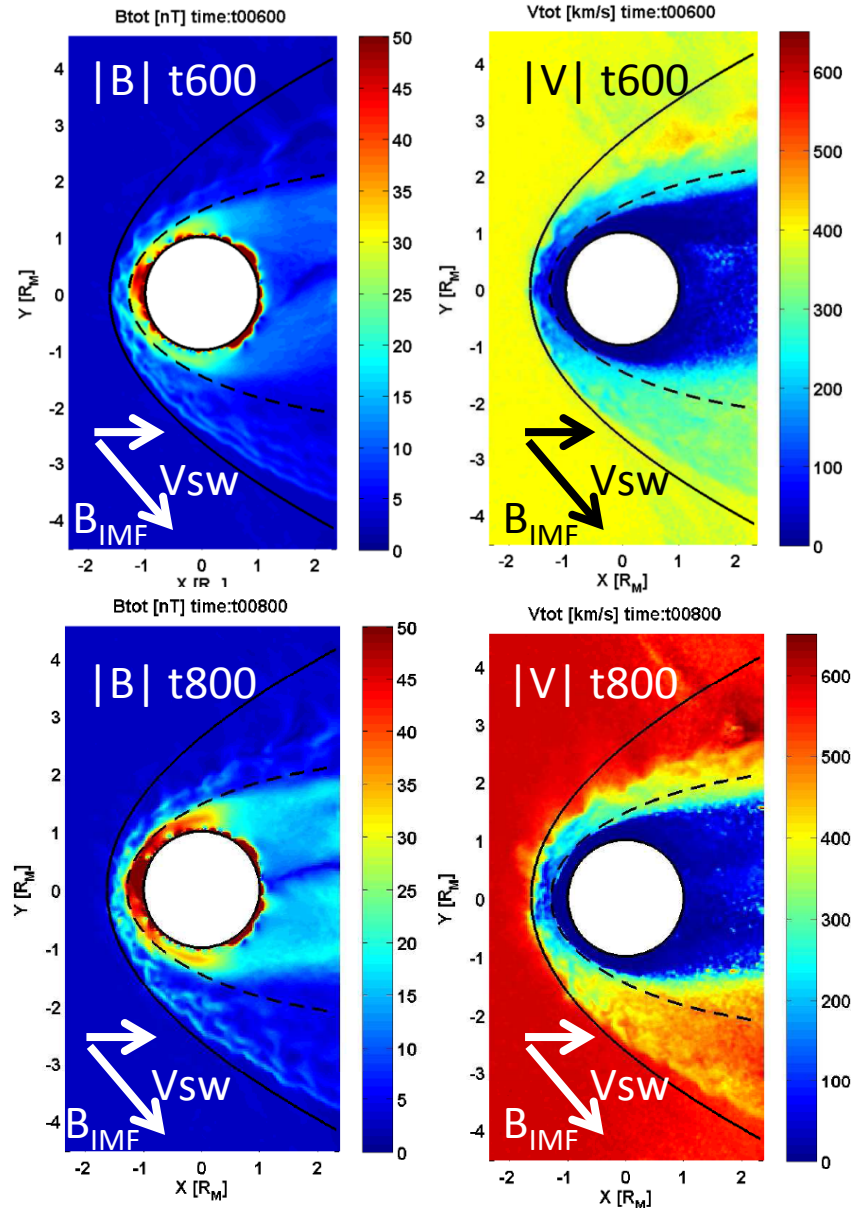


Variation de la pression dynamique du VS

- Augmentation lente de la vitesse du vent solaire de 400km/s à 600km/s en 100 $(\Omega \downarrow H + \uparrow) \uparrow - 1$ (ie environ 300 s)
- Augmentation de la pression dynamique du vent solaire d'un facteur en 5-7 temps de transit du vent solaire dans la boîte



Augmentation de vitesse du VS



Global features:

- ☐ Magnetic pile-up builds up. Stronger drapping observed.
- ☐ Positions of **Bow Shock** and **Induced Magnetosphere Boundary** are **not affected** in the **XY plane**.
- ☐ Subsolar Bow Shock position at 1.58 R_m. Subsolar Induced Magnetosphere Boundary at 1.25 R_m
- ☐ Important asymmetry in E_{conv} direction. The **Bow Shock extends outward in the -E_{conv}** direction

Réponse de l'équilibre de pression

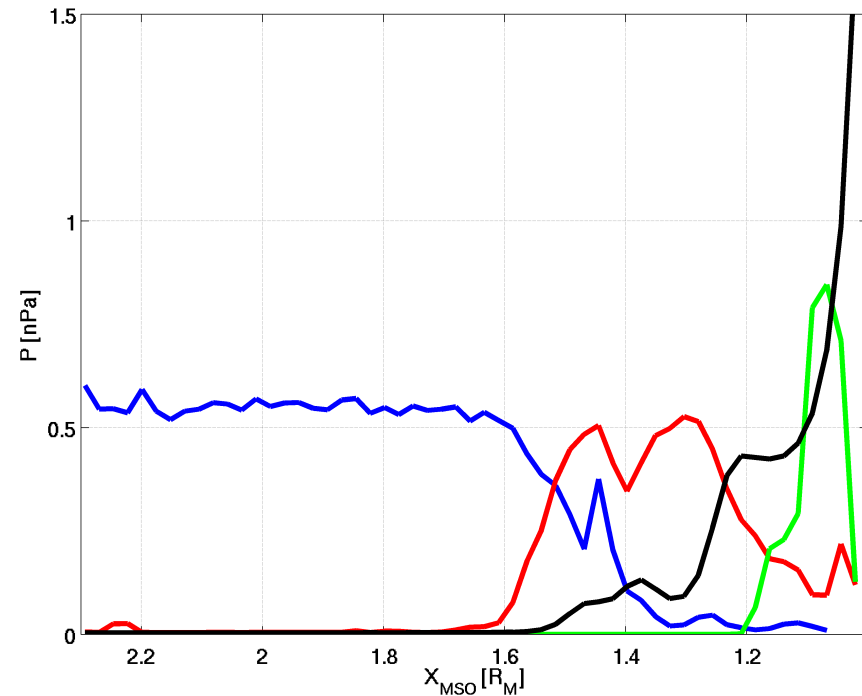
- Équilibre de pression de long de l'axe Mars-Soleil

Pression dynamique du VS

Pression thermique VS

Pression magnétique

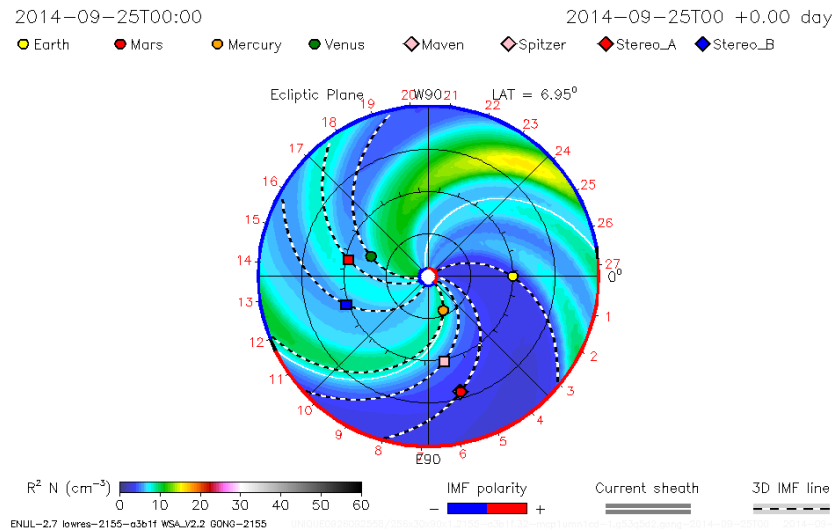
Pression thermique ionosphérique



- **Equilibre P_{dyn} – P_{th} très rapide (instantanée)**
- **Augmentation lente du champ magnétique** pour équilibrer la pression dynamique du vent solaire
- Ionosphère magnétisée ?

Variabilités temporelles

- Réponse à différents drivers :
 - Flux de photons solaire (*Modolo et al, 2006;2006*)
 - Orientation et amplitude du champ magnétique incident (*Modolo et al, 2012*), à approfondir
 - Conditions du plasma incident (n, v, T)



- Description de l'interaction d'une CME avec les environnements planétaires (Mars)
- Conjonction MeX/MAVEN vont mieux contraindre les processus relevant des échelles temporelles

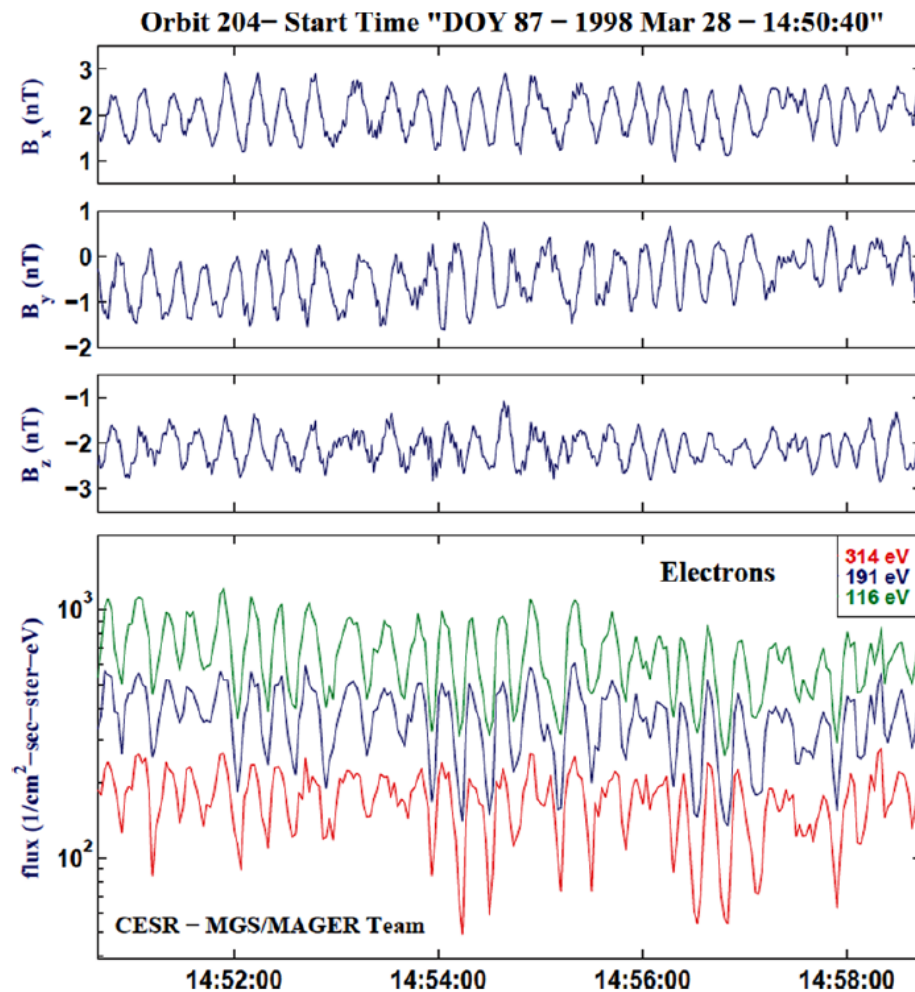
Conclusions préliminaires

- Variations temporelles (B et V) implémenté avec succès dans le code hybride
- Les positions du choc et de l'IMB sont faiblement affectés par ces variations
- Temps de réponse « typique » de l'environnement martien à des variations d'IMF : de qq seconds à 1-2 mins
- Lors d'une augmentation de la pression dynamique du VS, l'équilibre de pression nécessite qq minutes pour s'établir
- À confirmer avec des simulations plus longues

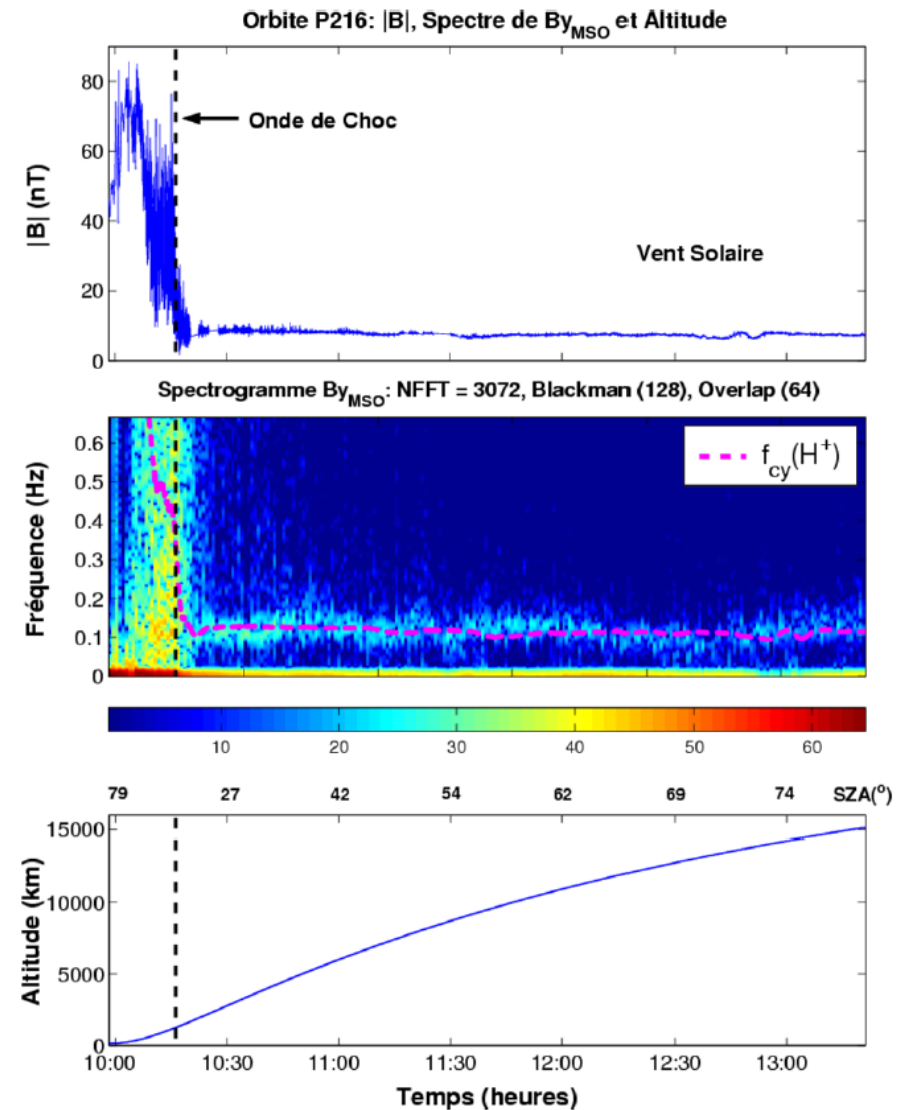
Conclusion

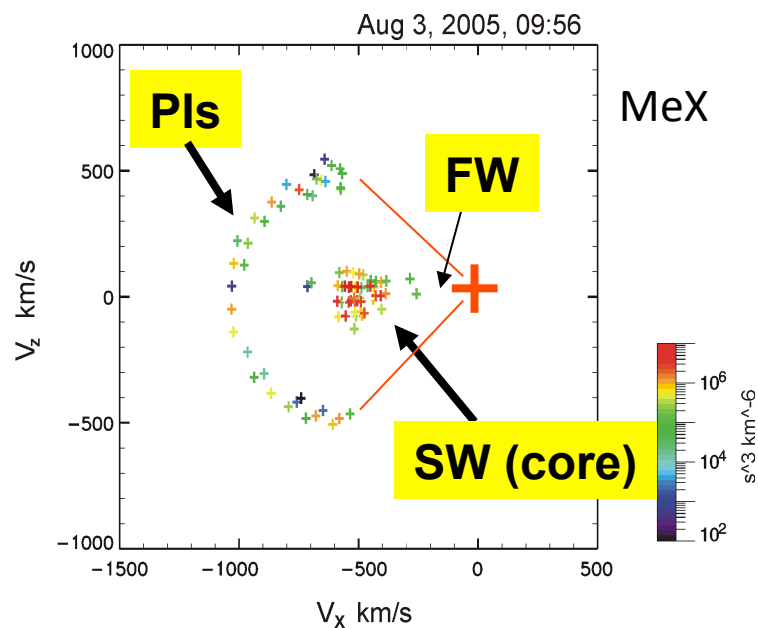
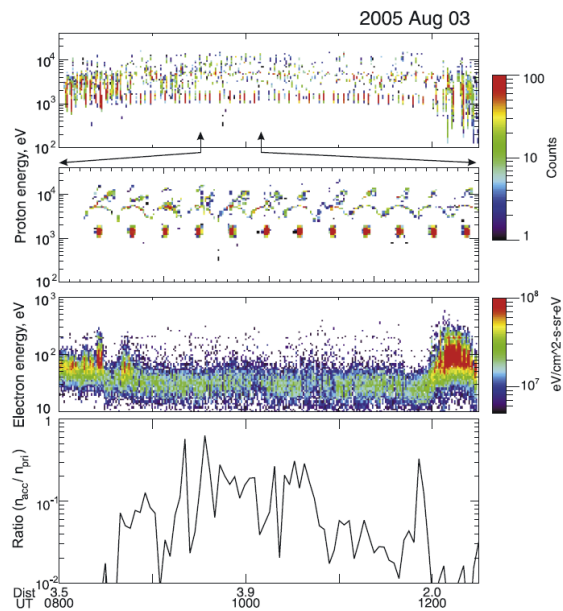
- **Interactions vent solaire / objets** dépendent de la présence ou non d'**atmosphère et de champ magnétique intrinsèque**
- Nombreuses **similitudes** entre **magnétosphères induites et intrinsèques**
- Observations *in situ* ont permis **une caractérisation des environnements plasmas** des différents objets:
 - Mars : sources crustales, aurores, érosion atmosphérique, population ionosphérique, reconnexion magnétique...
 - Mercure: champ intrinsèque modélisable par un dipôle excentré, criblage de la surface, ...
- Encore de nombreuses questions pour les **missions futures**
 - Mars Atmosphere and Volatile EvolutionN (**MAVEN** lancement en 2013), mission NASA
 - **Bepi Colombo** (lancement 2016), mission ESA

Proton cyclotron waves



MGS data showing PCWs





Dubinin et al, 2006

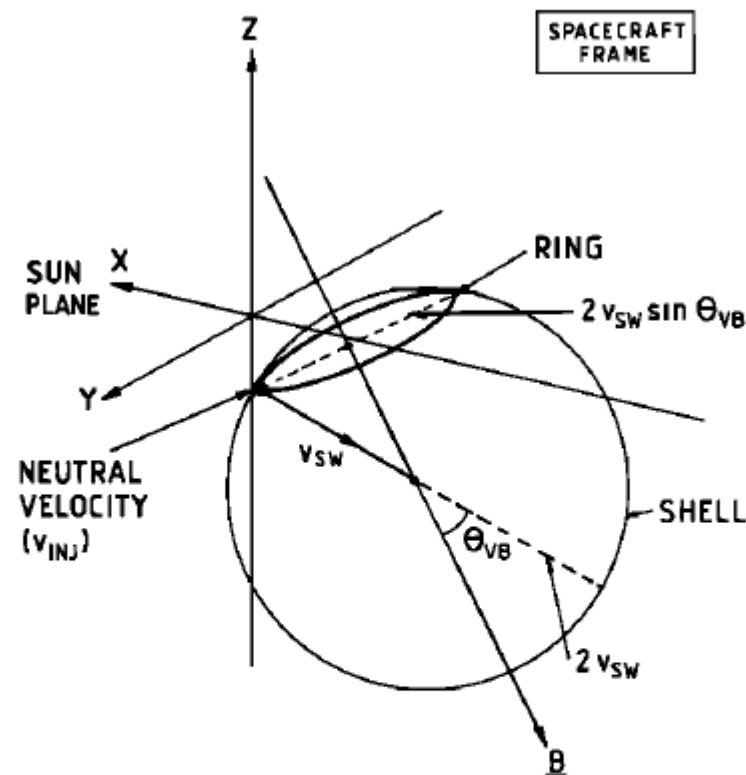


Fig. 1. Ion pickup velocity space geometry in the spacecraft frame, for an arbitrary orientation of the magnetic field $\mathbf{B}$. Neutral particles are injected at the point indicated by the star ($\mathbf{v}_{inj} \simeq (0, 0.15, -68.4) \text{ km s}^{-1}$ in this frame), and their initial trajectory is in a ring around $\mathbf{B}$. Later they scatter onto a shell centered on the solar wind speed to a first approximation.

Coates et al, 1996