

Simulation MHD d'une magnétosphère planétaire : l'exemple de Mercure

Filippo Pantellini (LESIA)

Contributeurs: Léa Griton, Jacobo Varela



Meudon 5/2/2015

Plan

- Courte description du code MHD
- Comparaison MHD – hybride dans le cas de Mercure
- Paramètres clés dans une simulation MHD de l'interaction vent solaire – magnétosphère planétaire.
- Comparaison simulations MHD – données (cas de Messenger à Mercure)

Conditions aux limites

Bord extérieur

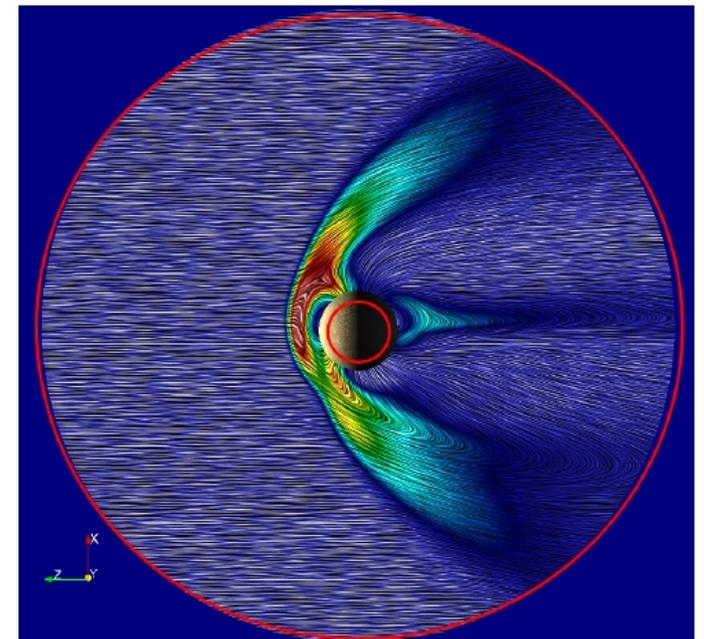
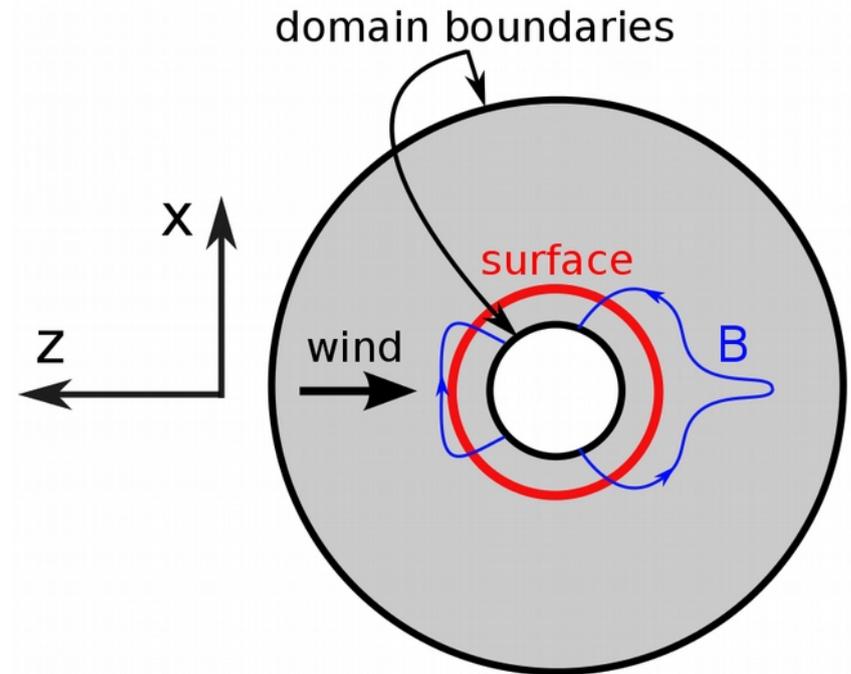
- Amont : paramètres du vent solaire
- Aval: Pour tous les champs $\partial/\partial r=0$

Bord interne

- Champ magnétique planétaire
- Densité & vitesse du son fixés (e.g.)
- $\partial \mathbf{u}/\partial r=0$

Région de transition entre la surface planétaire et le bord interne

- On contraint $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$ en approchant le bord interne i.e. $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$

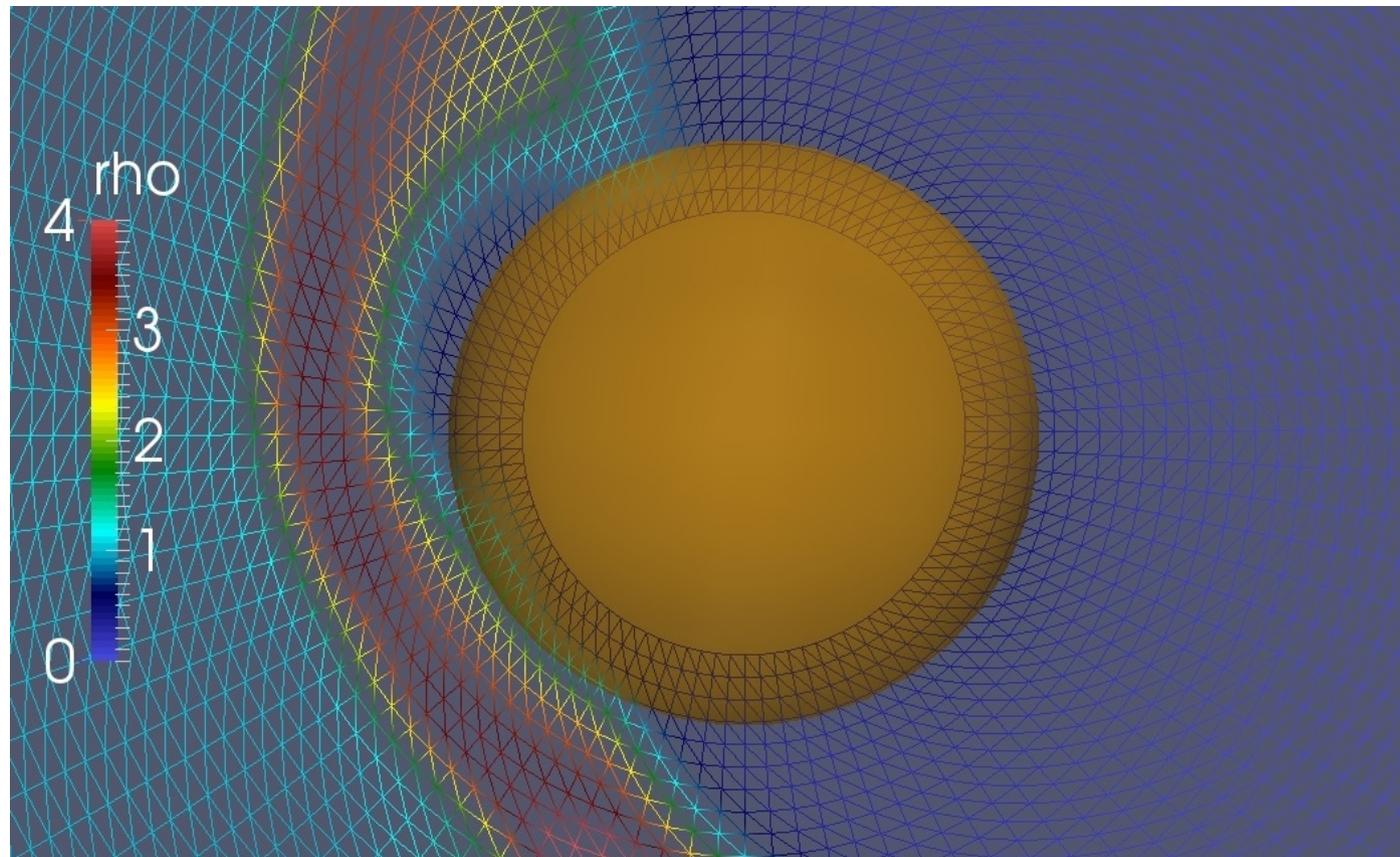


Domaine de simulation

Géométrie, 3D sphérique: (r, θ, ϕ)

Cas typique basse résolution: 96x48x48

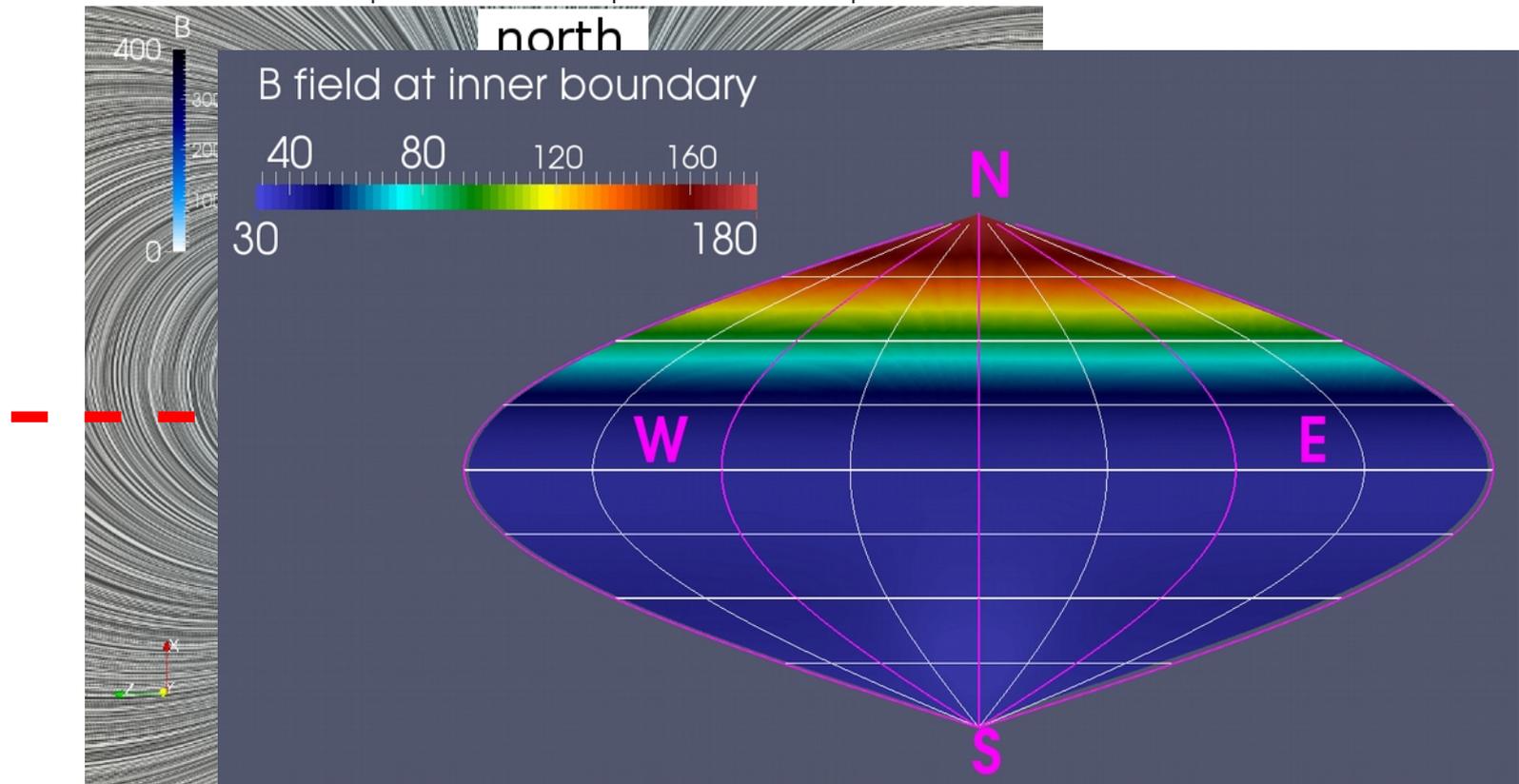
Cas typique haute résolution : 192x96x96



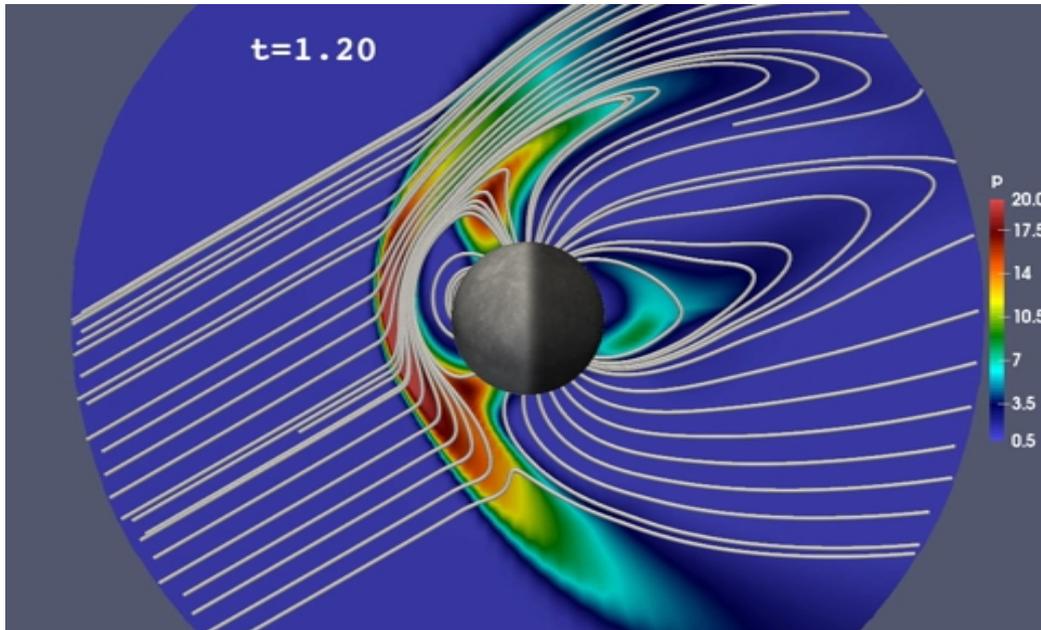
Champ intrinsèque de Mercure (*Anderson et al 2012*)

$$\mathbf{B} = -\nabla\Psi \quad \text{avec} \quad \Psi(r, \theta) = R_M \sum_{l=0}^4 \left(\frac{R_M}{r}\right)^{l+1} g_{l0} P_l(\cos\theta)$$

g_{10} [nT]	g_{20}/g_{10}	g_{30}/g_{10}	g_{40}/g_{10}
-200.0	0.393	0.1165	0.0295

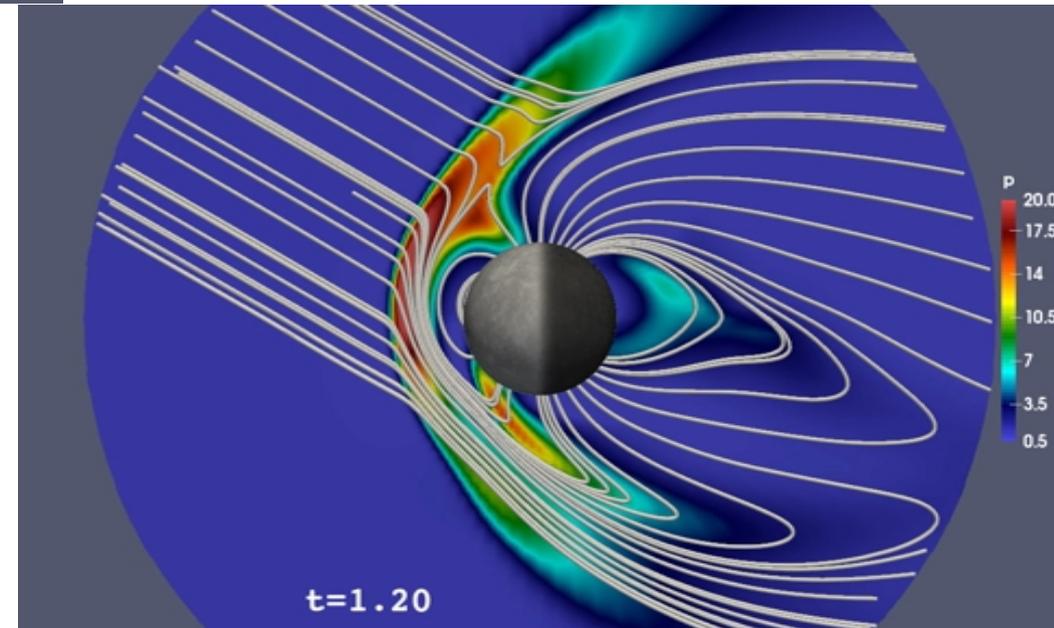


Exemple de simulation de Mercure

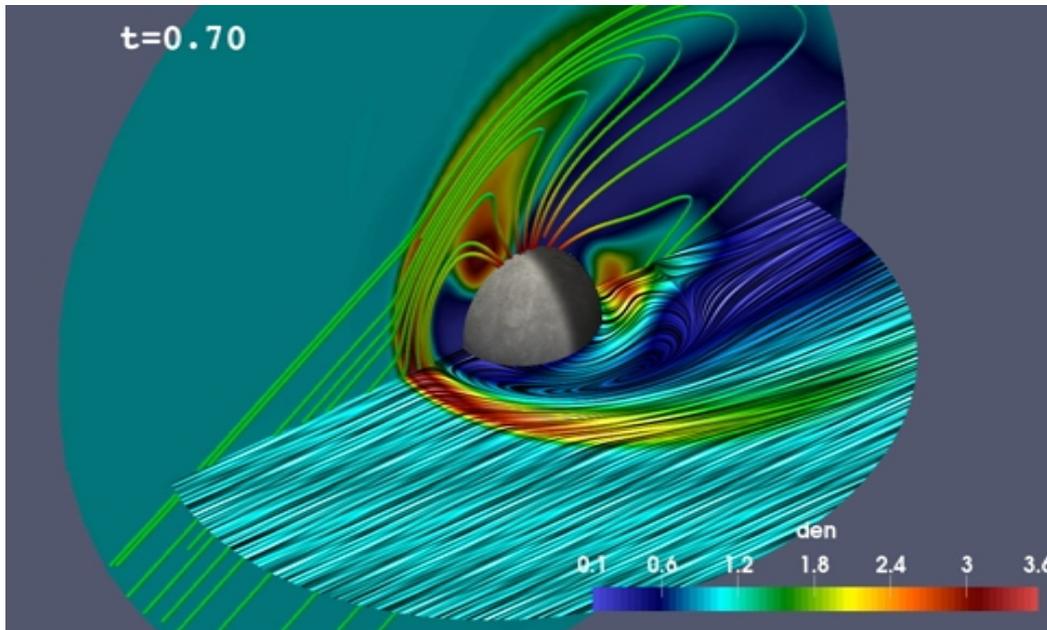


Paramètres du vent solaire

Mach (son)	Plasma beta	Champ B
6	0.5	20 nT

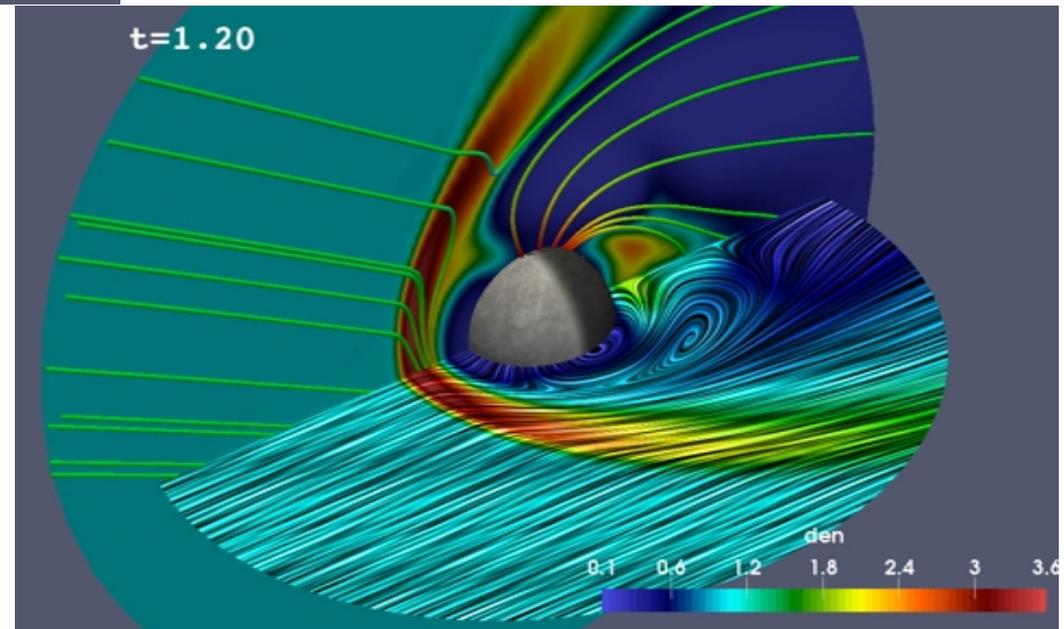


Exemple de simulation de Mercure (suite)



Paramètres du vent solaire

Mach (son)	Plasma beta	Champ B
6	0.5	20 nT



Simulations MHD versus hybrides (*Travnicek et al 2010*)

Paramètres du vent

$$v_{\text{sw}} = 202 \text{ km/s}, M_s = 3.1, n_{\text{sw}} = 60 \text{ cm}^{-3}, \beta = 2$$

Cas SN: Champ interplanétaire sud-nord

$$B_{\text{sw}} = [-16.9, 0, +6.2] \text{ nT}$$

Cas NS: Champ interplanétaire nord-sud (reconnexion)

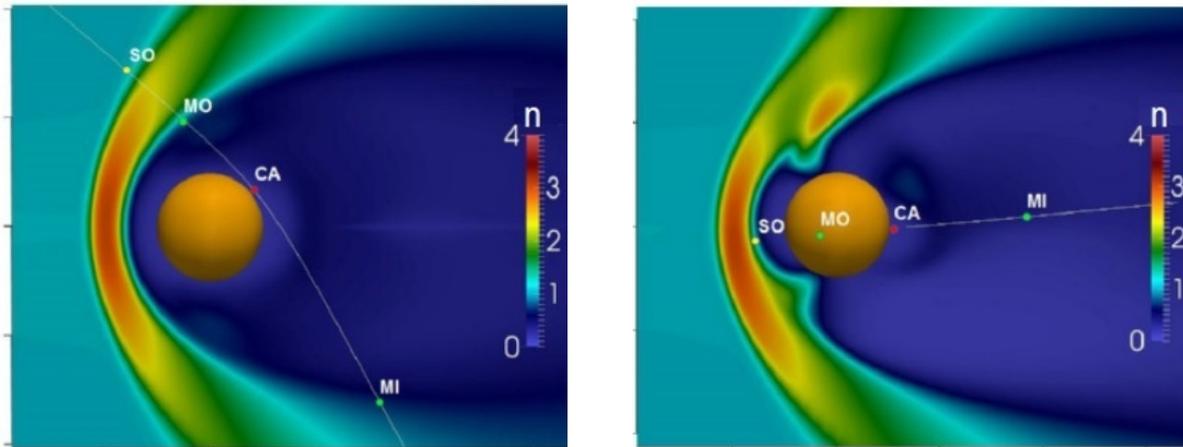
$$B_{\text{sw}} = [-16.9, 0, -6.2] \text{ nT}$$

Champ intrinsèque de Mercure: dipôle simple

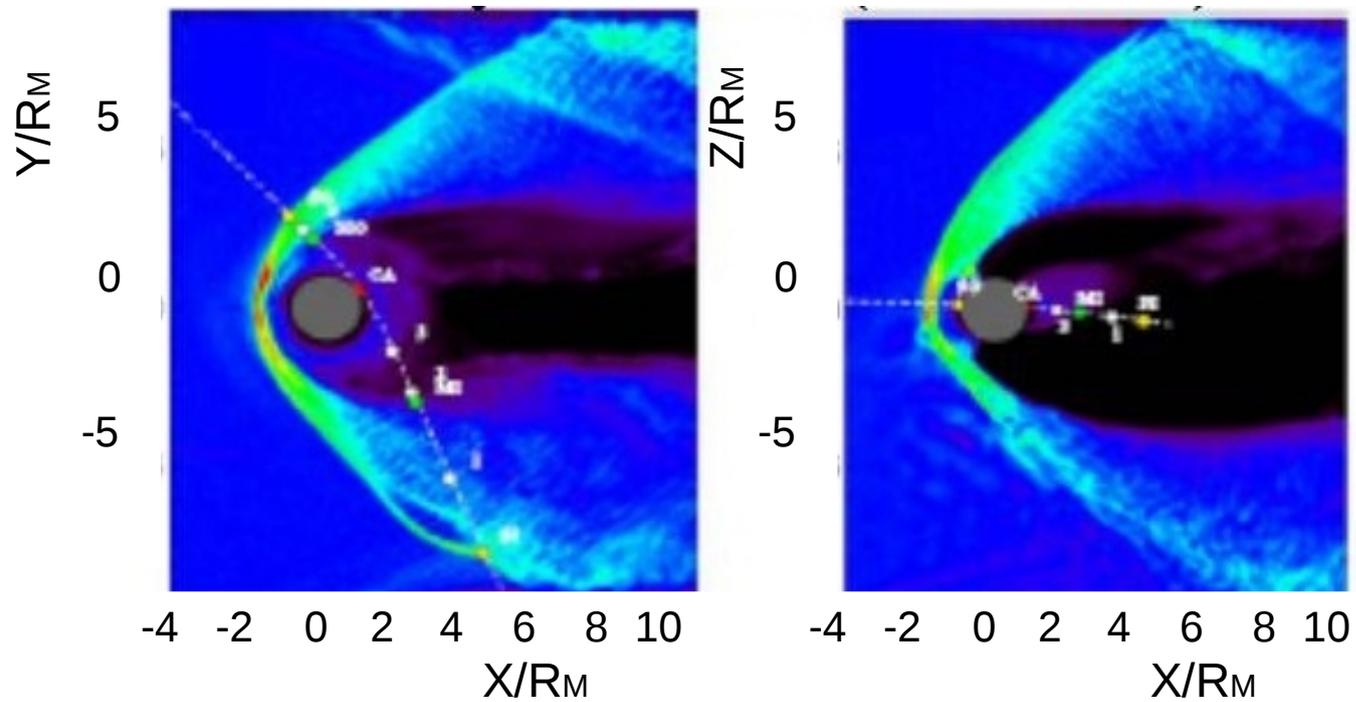
$$B_d = -250 \text{ nT} \quad (\text{Champ équatorial})$$

MHD versus hybride (pas de reconn.)

SN

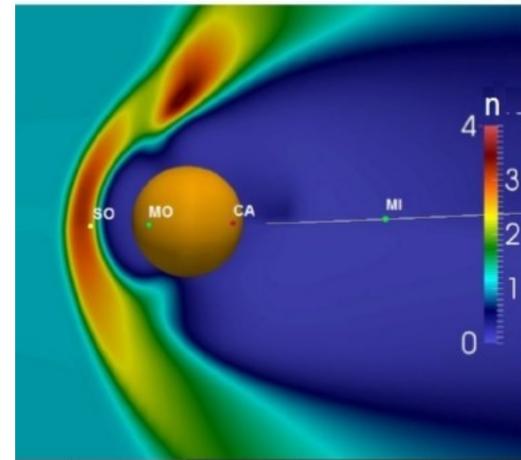
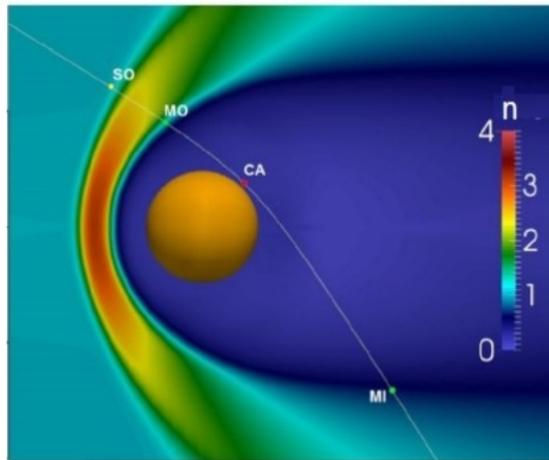


SN Hybrid code (Travnicek et al 2010)

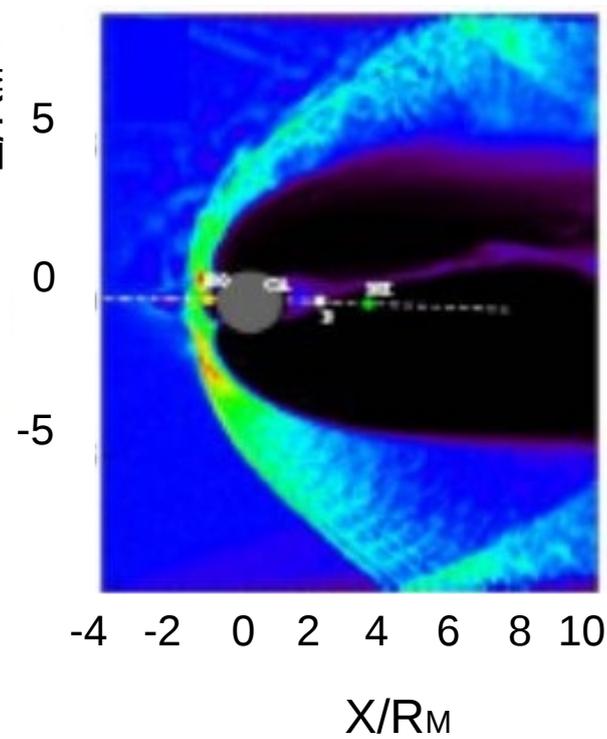
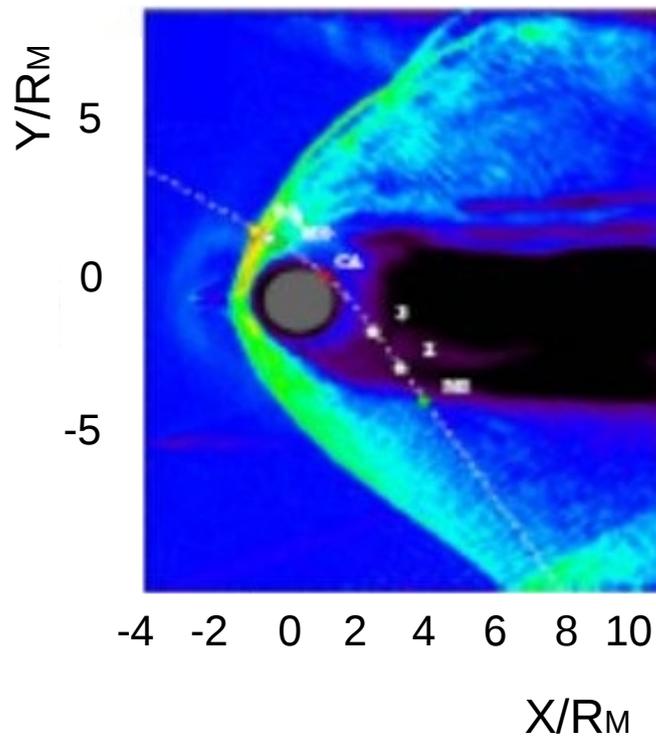


MHD versus hybride, (reconnexion)

NS



NS Hybrid code (Travnicek et al 2010)



Positions du choc et de la magnétopause dans simulation **MHD** et **hybride**



	M1-SN	M1-SN (TAL)	M2-NS	M2-NS (TAL)
SI	-	8.0	-	-
MI	3.2	2.9	4.0	3.9
MO	1.2	1.2	0.9	0.9
SO	2.0	2.1	1.8	1.6

Position de la magnétopause dans une simul. MHD

Hypothèse: champ dipolaire $B_d(r) \propto g_{10}/r^3$

Champ magnétique interplanétaire: $\alpha \equiv g_{10}/B_{sw}$

Position de la magnétopause donné par le point d'équilibre entre pression dynamique du vent et pression magnétique du dipôle planétaire :

$$\rho_0 u_{sw}^2 \approx B_d^2(r_{mp})/2\mu_0$$

$$\frac{r_{mp}}{r_M} \approx \left(\frac{\alpha^2}{\gamma\beta M^2} \right)^{1/6}$$

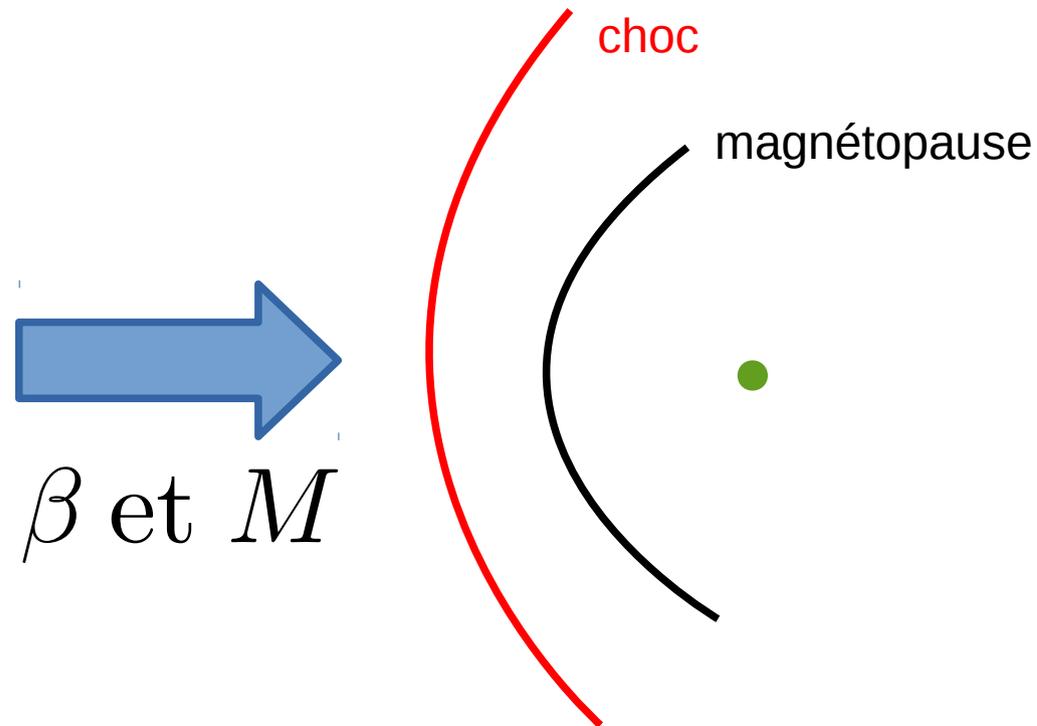
En MHD l'interaction du vent solaire avec un objet magnétisé (eg planète) dépend de 3 paramètres seulement

α, β and M

Position de la magnétopause dans une simul. MHD

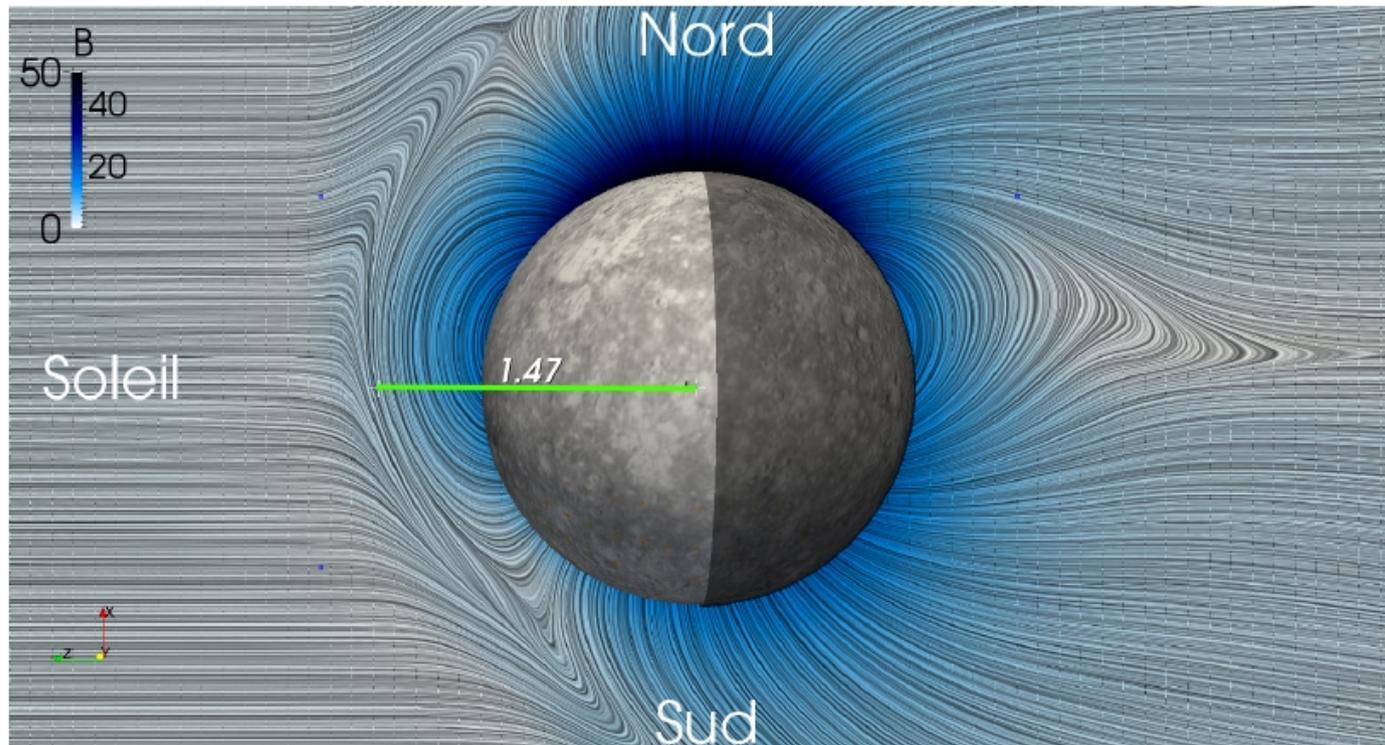
Si le rapport $r_{mp}/r_M \gg 1$ (eg Terre, Jupiter, ...)

Il n'y a plus d'échelle spatiale caractéristique dans le système et l'état stationnaire dépend de deux paramètres seulement (+ géométrie)



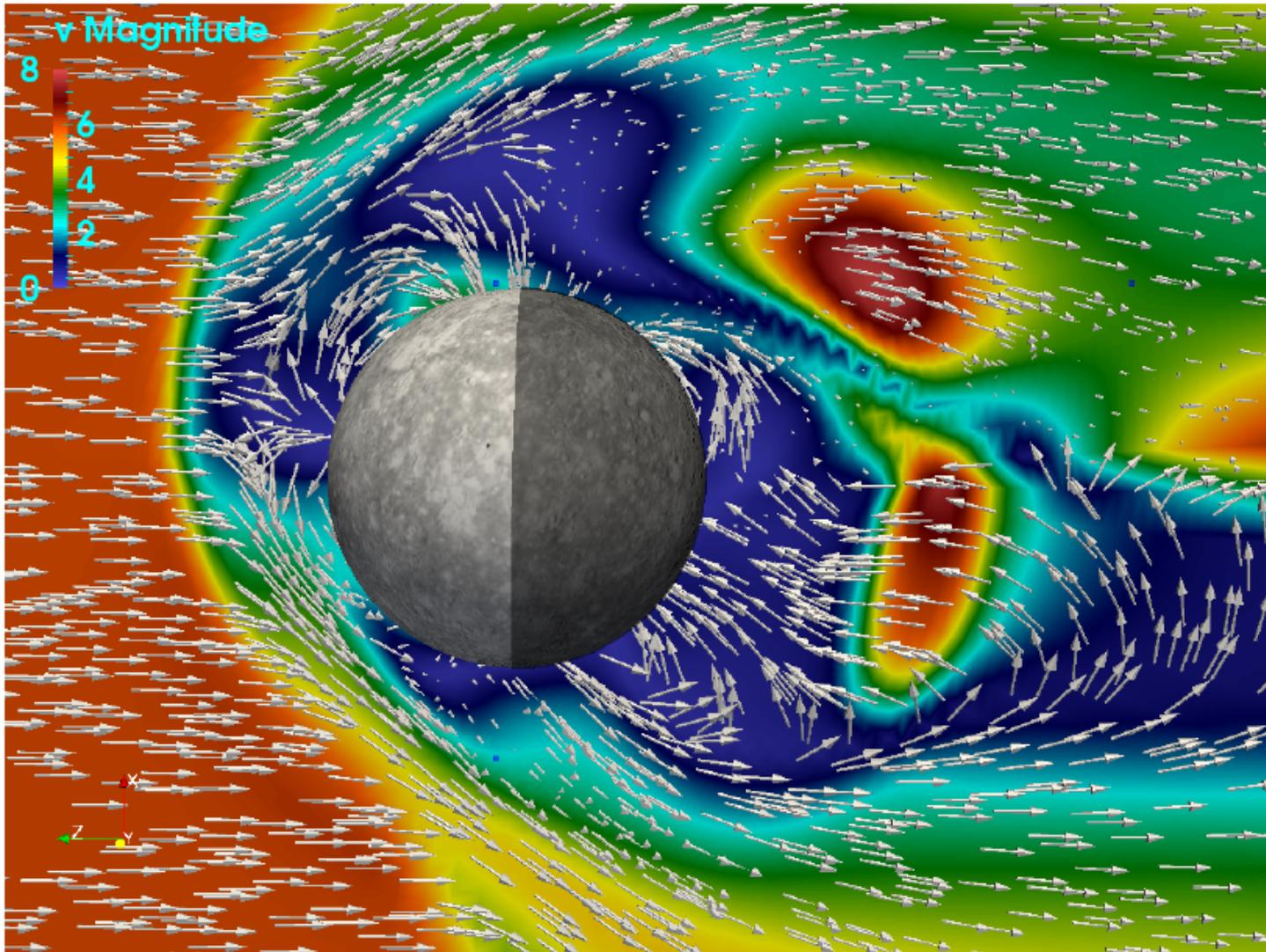
Mercure: une petite magnétosphère (donc spéciale)

α	M	β	$B_{vs,x}$ [nT]	$B_{vs,y}$ [nT]	$B_{vs,z}$ [nT]	n_{vs} [cm ⁻³]	T_{vs} [10 ⁵ K]	v_{vs} [km/s]
9.6	6.	0.5	.0.	7.67	18.46	35.6	1.6	400



$$\frac{r_{mp}}{r_M} \approx \left(\frac{\alpha^2}{\gamma\beta M^2} \right)^{1/6} = 1.21$$

Écoulement de et vers la surface



La MHD et les données Messenger

Paramètres du vent solaire

Flyby 1 (14/01/2008): (sans reconnexion)

$$v_{\text{sw}} = 400 \text{ km/s}, M_s = 7, \beta = 0.64$$

$$B_{\text{sw}} = [-12.9, 4.7, 10.3] \text{ nT}$$

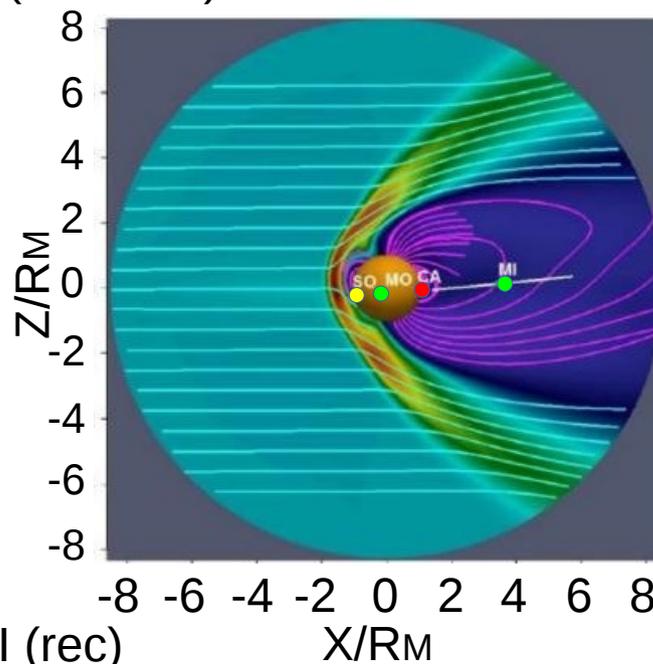
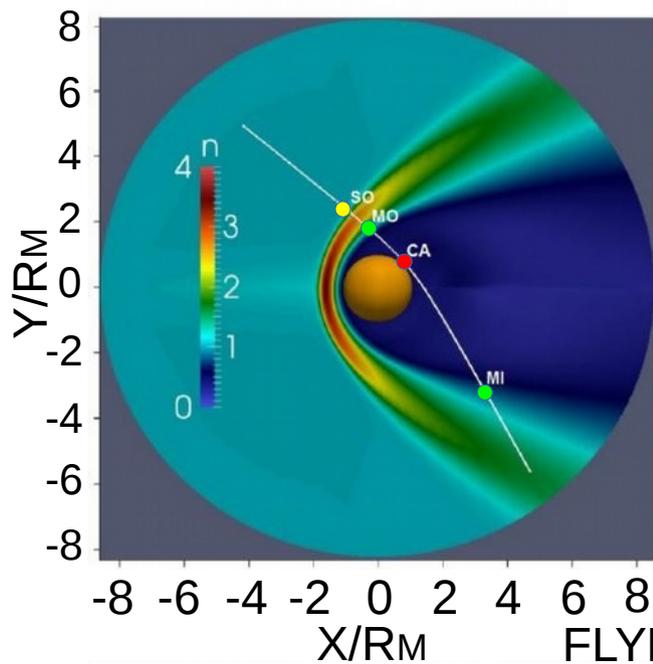
Flyby 2 (06/10/2008): (avec reconnexion)

$$v_{\text{sw}} = 380 \text{ km/s}, M_s = 7, \beta = 0.56$$

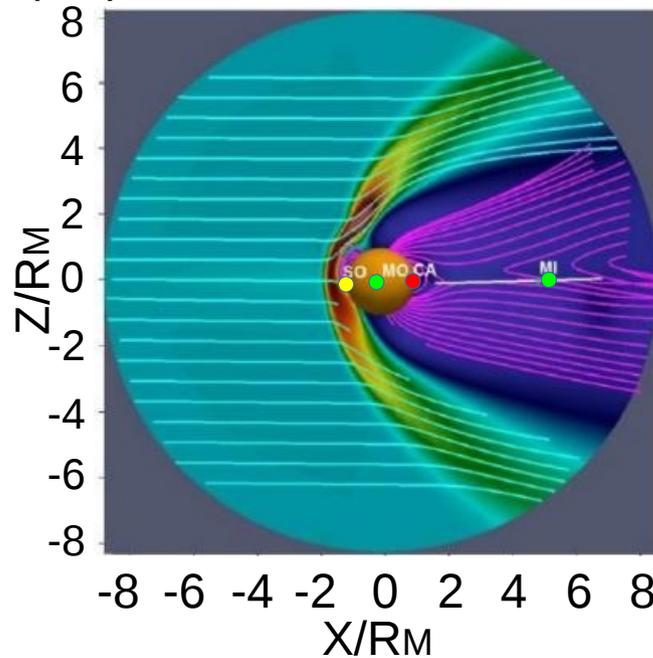
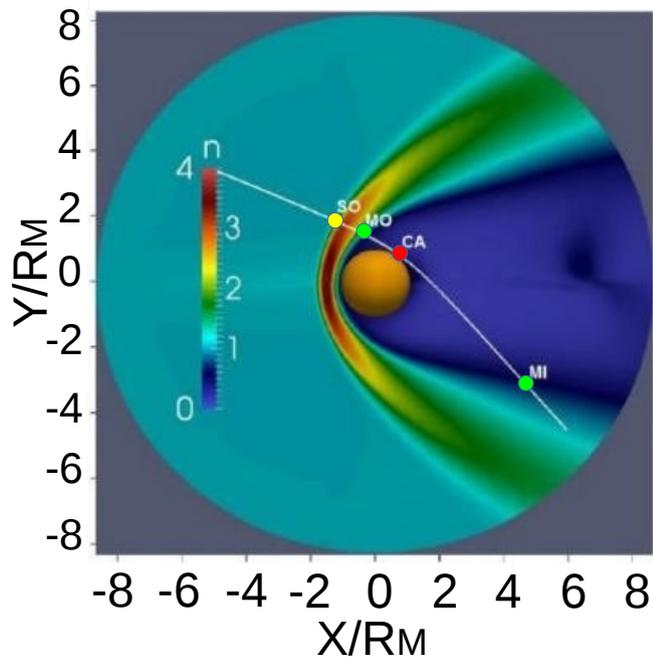
$$B_{\text{sw}} = [-18, 9, -8] \text{ nT}$$

Exemple de Mercure

FLYBY I (sans rec)

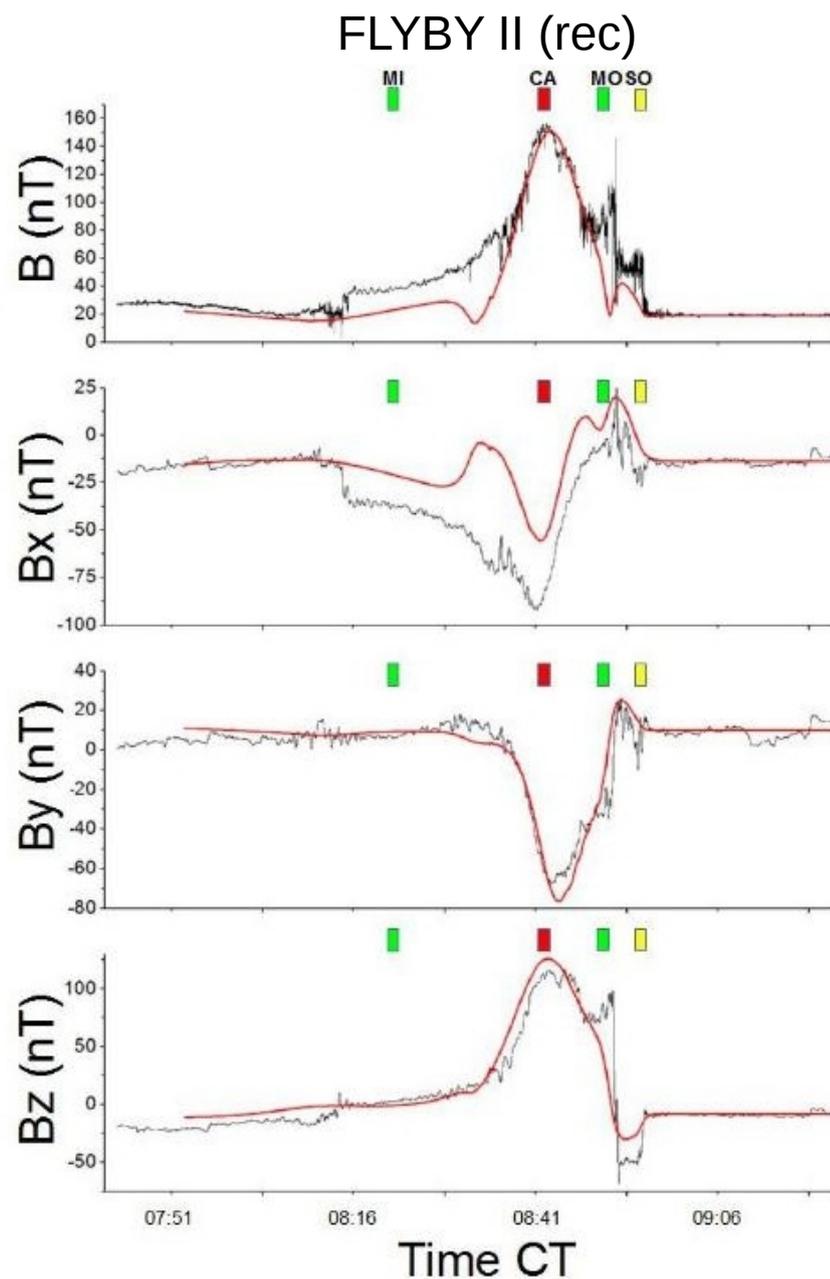
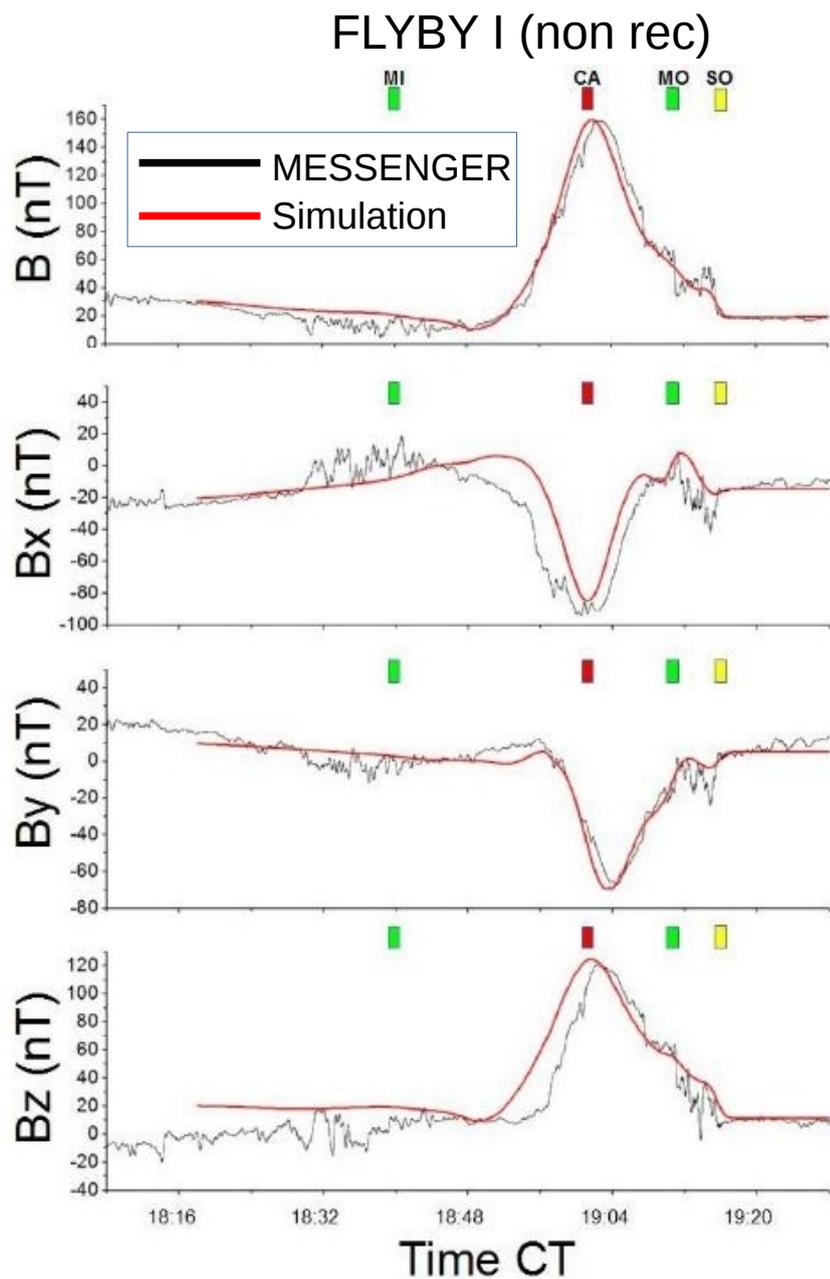


FLYBY II (rec)



- Champ B
- Écoulement
- Choc in/out
- Magnétopause in/out
- Closest approach

Messenger : flyby 1 et 2



Messenger : flyby 1 et 2

Positions du choc et de la magnétopause Simulation MHD, MESSENGER

- Bon accord coté jour. Beaucoup moins bon coté nuit.

	M1 (SIM)	M1 (MESS)	M2 (SIM)	M2 (MESS)
SI	-	7.5	-	-
MI	3.6	2.5	4.0	3.1
MO	0.9	0.8	0.6	0.7
SO	1.5	1.5	1.1	1.1

Conclusions

- Malgré l'absence d'effets cinétiques les simulations MHD restent un outil intéressant et efficace pour l'étude d'une magnétosphère (même dans le cas « limite » de Mercure)
- Choc et magnétopause sont généralement bien placés coté jour, un peu moins bien coté nuit.
- Dans les petites magnétosphères le problème MHD dépende de 3 paramètres seulement. Dans les grandes magnétosphères le nombre de paramètres se réduit à 2 !
- Autres avantages des simulations MHD: (a) rapide (b) faible bruit, ...
- Inconvénients : (a) absence d'effets cinétiques, (b) une seule espèce de particules, (c) diffusion numérique, ...