



Interaction entre Ganymède et le plasma jovien : approche multi-grille dans un code hybride

Ludivine Leclercq^{1,2}, Ronan Modolo^{1,2}, François Leblanc¹,
Sébastien Hess³, Nicolas André⁴, Philippe Louarn⁴

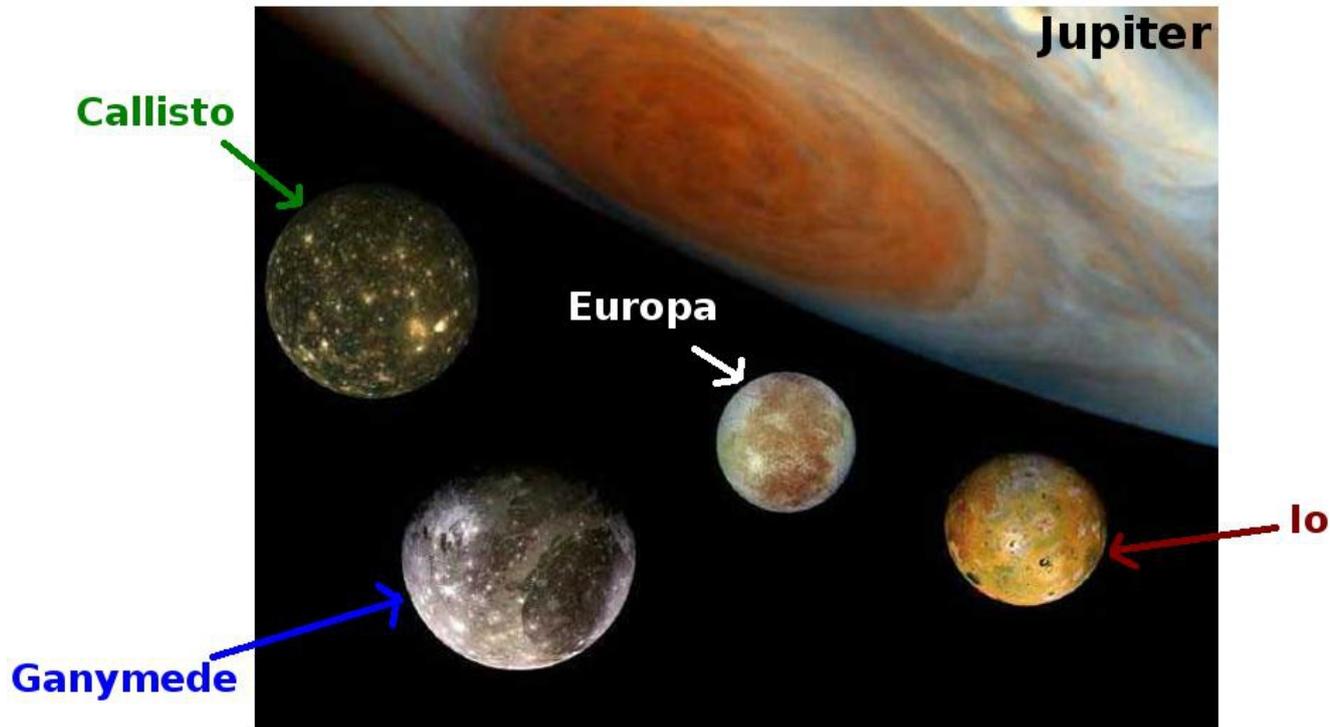
1 : LATMOS-CNRS-IPSL, Paris, France – 2 : UVSQ, Versailles, France

3 : ONERA, Toulouse – 4 : IRAP, Toulouse

05 février 2015, Atelier magnétosphères, Meudon, France

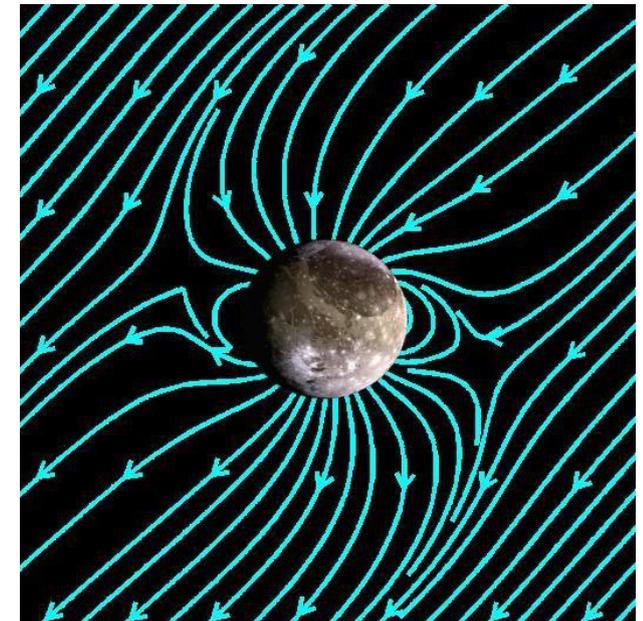
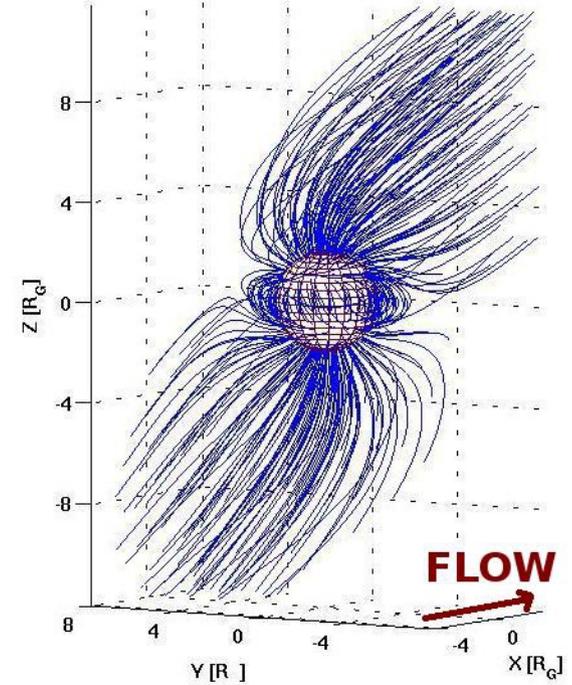
La lune Ganymède

- Le plus gros satellite du système solaire ($R_G=2634\text{km}$)
- Surface couverte de glace d'eau et de régolithe ($80\text{K}<T_s<150\text{K}$)
- Océan d'eau liquide sous la surface ?

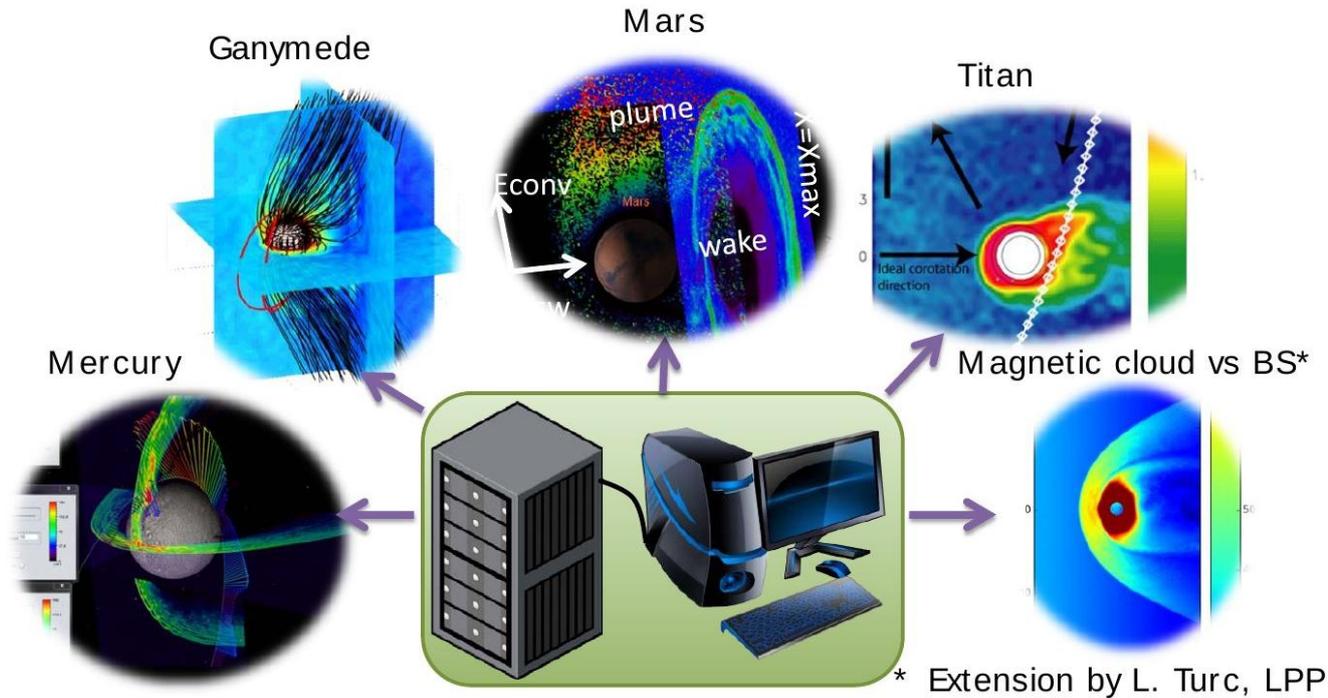


Magnétosphère de Ganymède

- Découverte du champ magnétique de Ganymède par Galileo (Kivelson et al. 1996)
- Unique lune du système solaire possédant son propre champ magnétique intrinsèque (champ dipolaire, 720nT à l'équateur)
- Champs induits (présence d'un océan d'eau liquide sous la surface ?)
- Magnétosphère « imbriquée » dans celle de Jupiter : unique cas connu d'interaction entre 2 magnétosphères
- Écoulement de plasma jovien sub-alfvénique et subsonique : pas de choc et formation des ailes d'Alfvén



Modèle Hybride Parallélisé

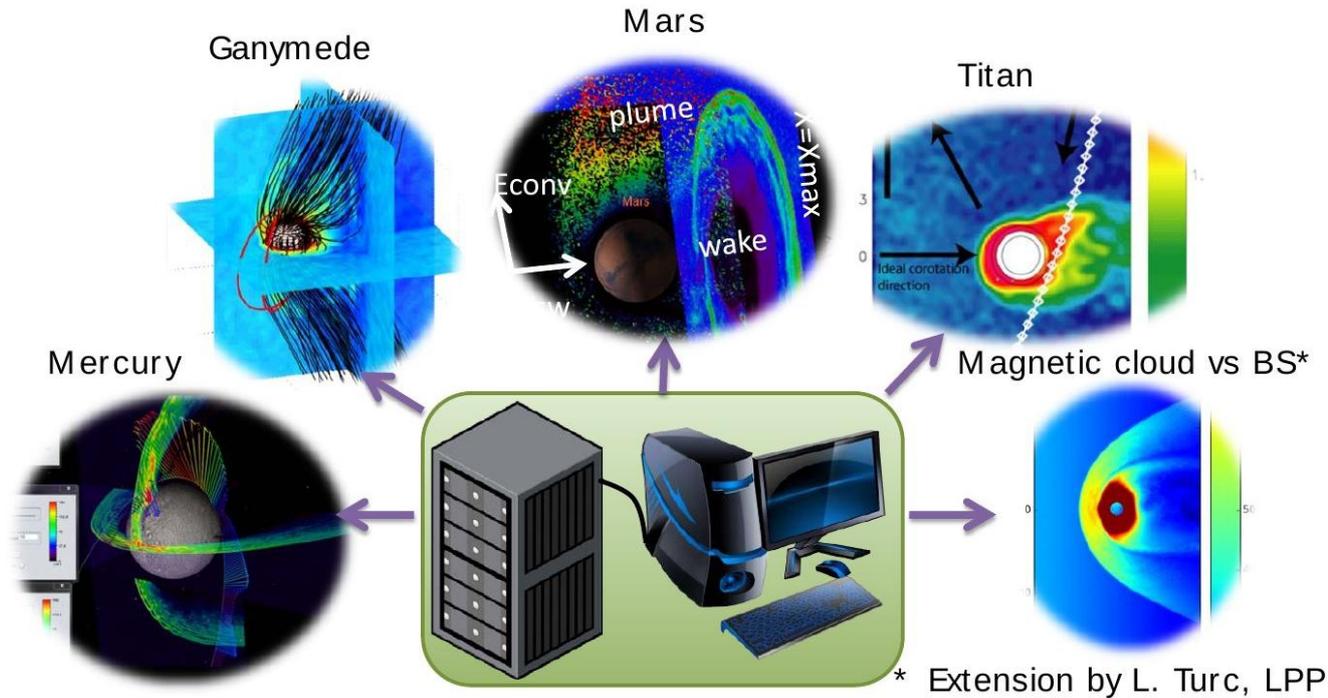


Formalisme hybride :

- Description cinétique des ions (macroparticules)
- Description fluide des e⁻ (fluide sans inertie)
- Résolution des équations de Maxwell

- Algorithme CAM-CL (Matthews, 1994)
- Utilisation d'une grille 3D uniforme et cartésienne (dx=240km au mieux pour Ganymède)

Modèle Hybride Parallélisé

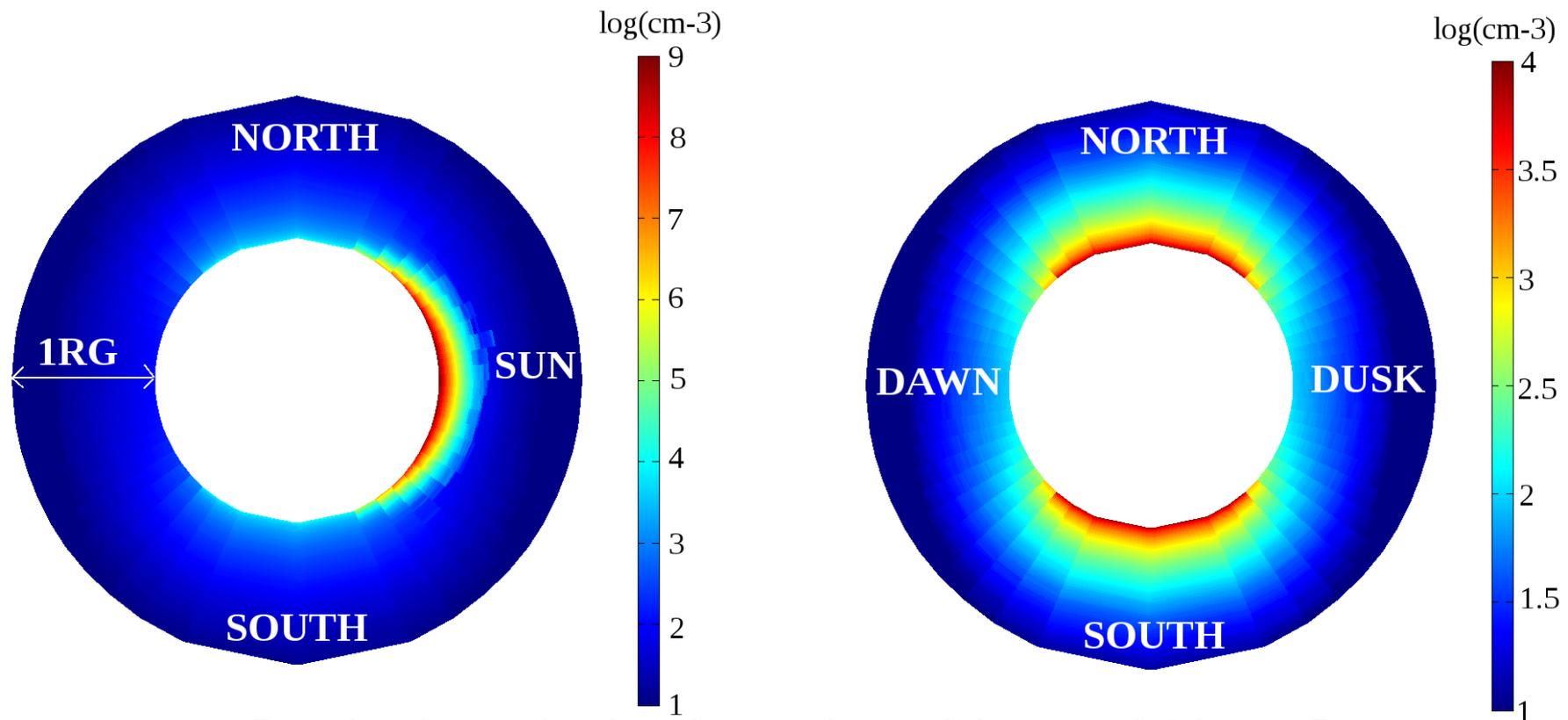


Ingrédients du modèle :

- Plasma incident magnétisé
- Dipôle magnétique de Ganymède (pas de champs induits)
- Ionosphère (profil de densité théorique)
- Exosphère
- *Réactions d'échange de charge, de photo-ionisation, ionisation par impact électronique*

Premiers résultats et objectifs

- Couplage avec modèle exosphérique 3D
(résolution spatiale radiale 10km à la surface)



Densité d'eau simulée d'après le modèle exosphérique 3D

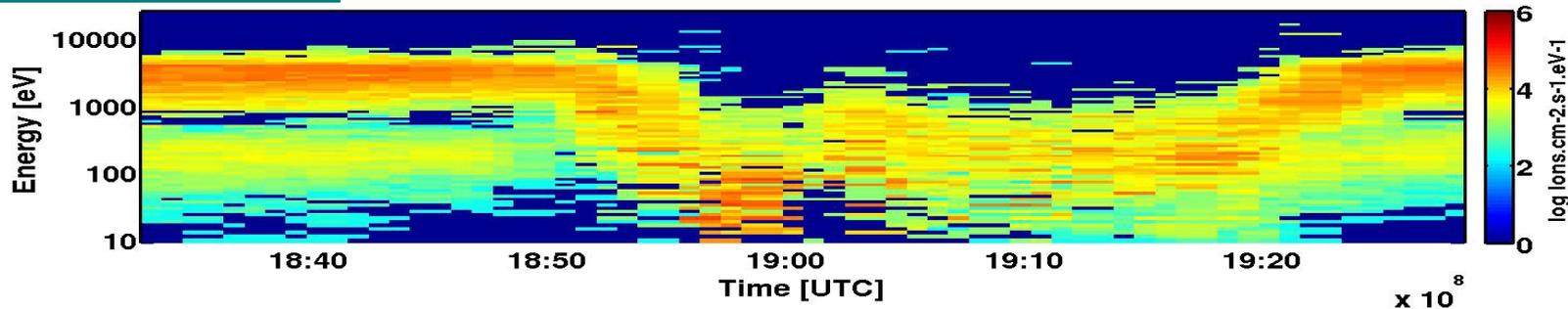
a) Plan subsolaire/antisolaire

b) Plan du terminateur

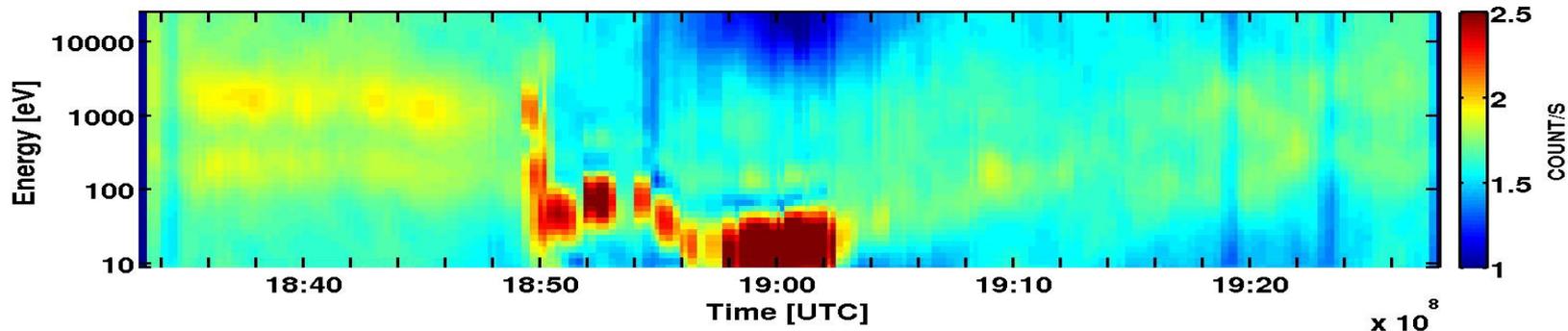
Premiers résultats et objectifs

- Couplage avec modèle exosphérique 3D (résolution spatiale radiale 10km à la surface)
- Comparaisons des résultats avec les mesures Galileo lors des survols G1 et G2 plutôt satisfaisants

Spectrogramme d'énergie des ions lors du survol G2 :



Simulation

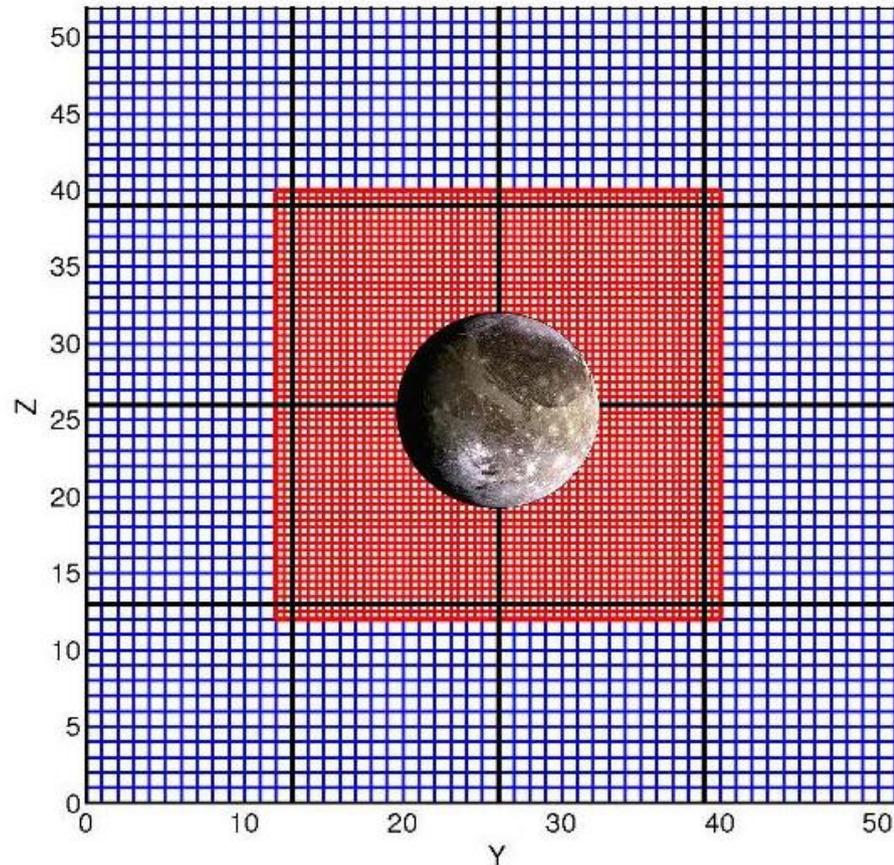


Mesures
Galileo

Premiers résultats et objectifs

- Couplage avec modèle exosphérique 3D (résolution spatiale radiale 10km à la surface)
- Comparaisons des résultats avec les mesures Galileo lors des survols G1 et G2 plutôt satisfaisants

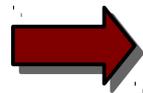
Besoin d'améliorer la résolution spatiale :
Approche multi-grille



Autres modèles multi-grille

Kallio & Janhunen 2003, Modèle AIKEF (Muller et al. 2001), Lapenta 2002, ...

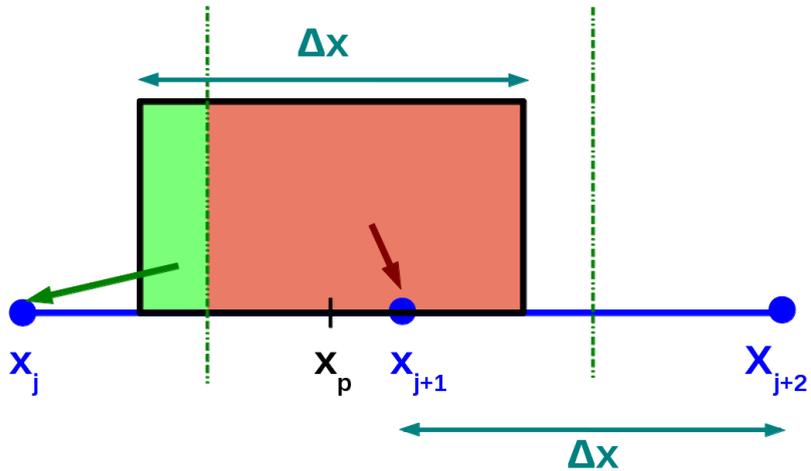
- Maillage adaptatif en temps
- Particules coupées en 2 et conservent volume
- Particules fusionnées → vitesse des particules ?
- Calculs aux interfaces ? Cellules fantômes ?



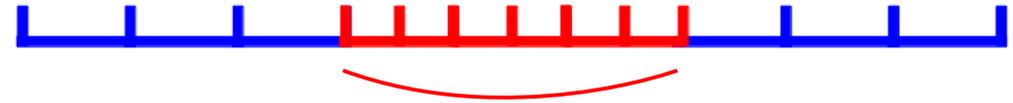
Autres Méthodes ?

Tests 1D code PIC électrostatique

Collecte des moments : méthode
CIC (*Cloud In Cell*)



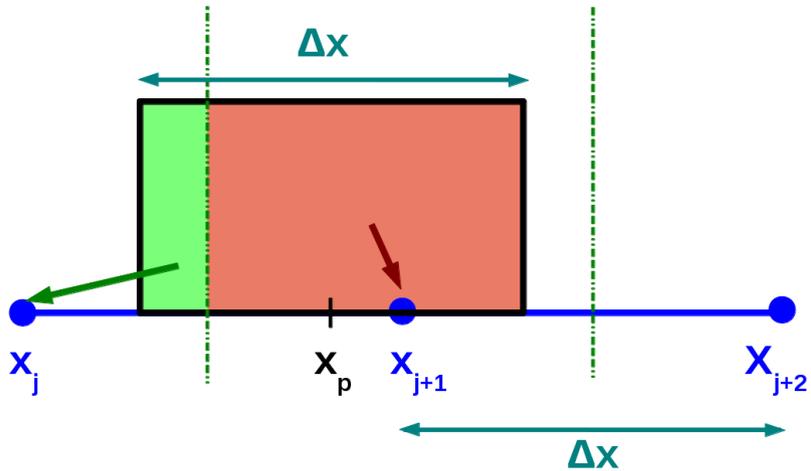
Introduction d'un 2ème maillage :



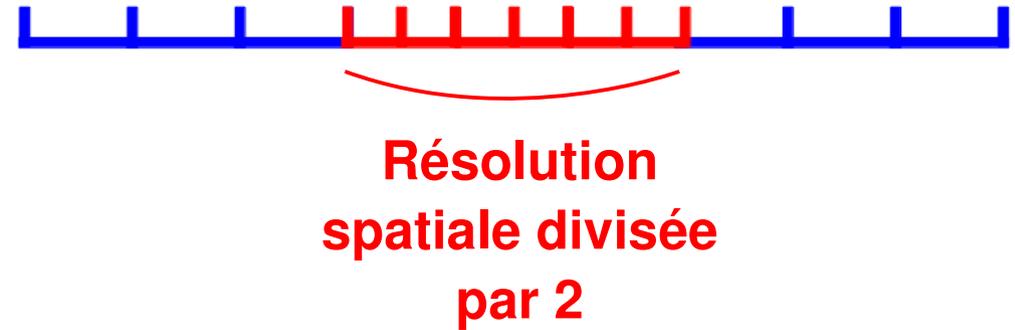
**Résolution
spatiale divisée
par 2**

Tests 1D code PIC électrostatique

Collecte des moments : méthode
CIC (*Cloud In Cell*)

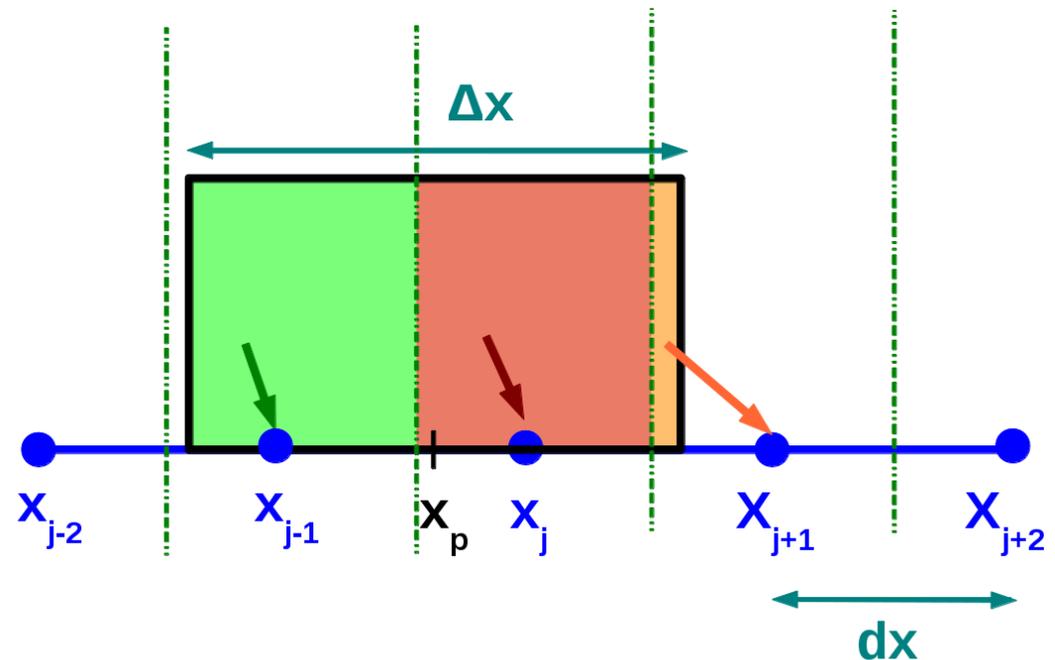


Introduction d'un 2ème maillage :



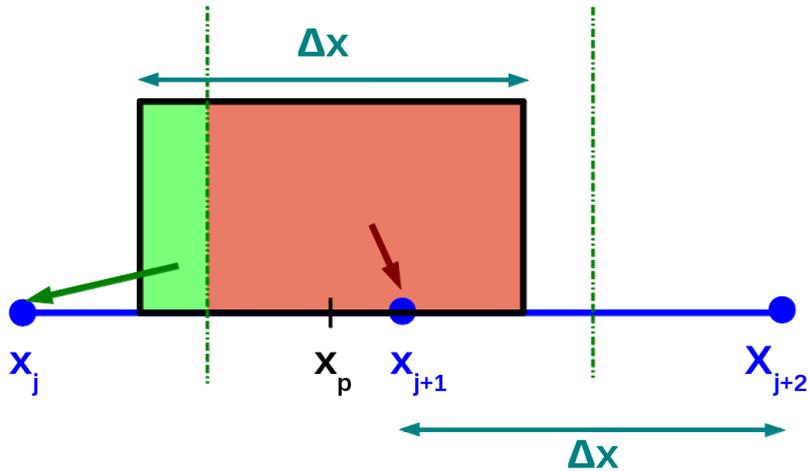
3 méthodes testées :

- Macroparticules conservent volume et facteur de forme



Tests 1D code PIC électrostatique

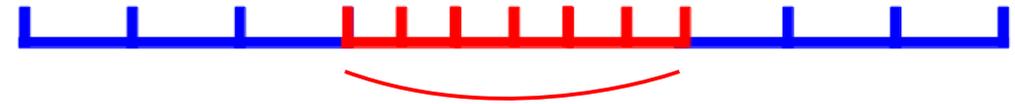
Collecte des moments : méthode CIC (*Cloud In Cell*)



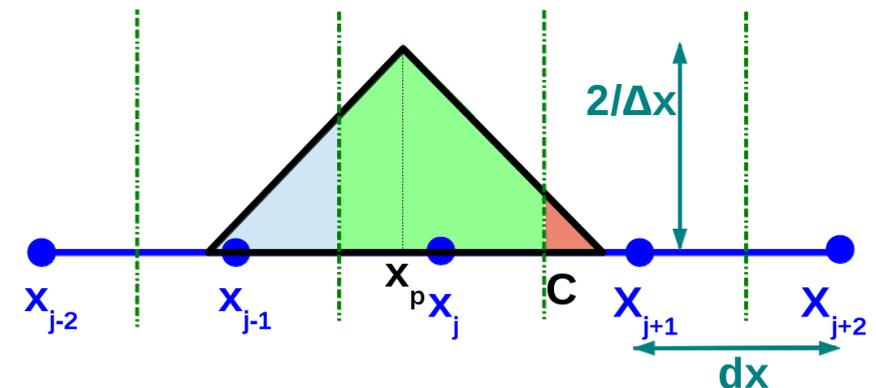
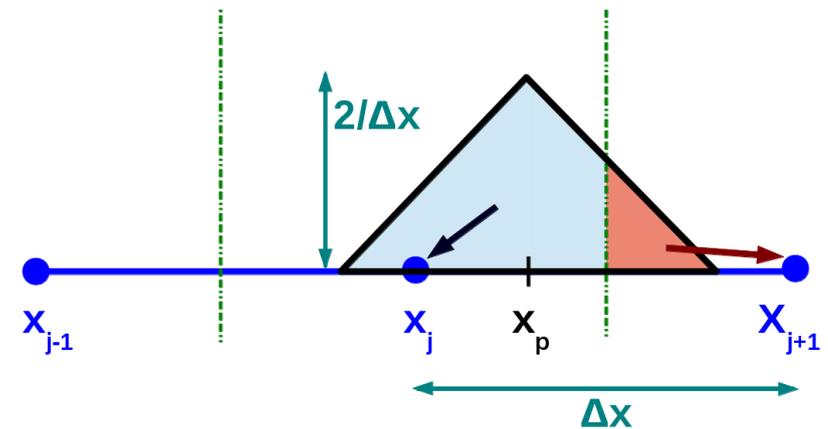
3 méthodes testées :

- Macroparticules conservent volume et facteur de forme
- Changer le facteur de forme des particules-test

Introduction d'un 2ème maillage :

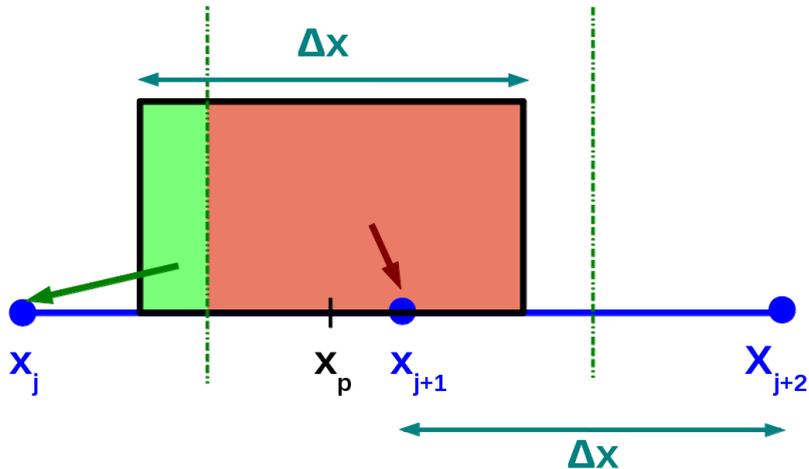


Résolution spatiale divisée par 2

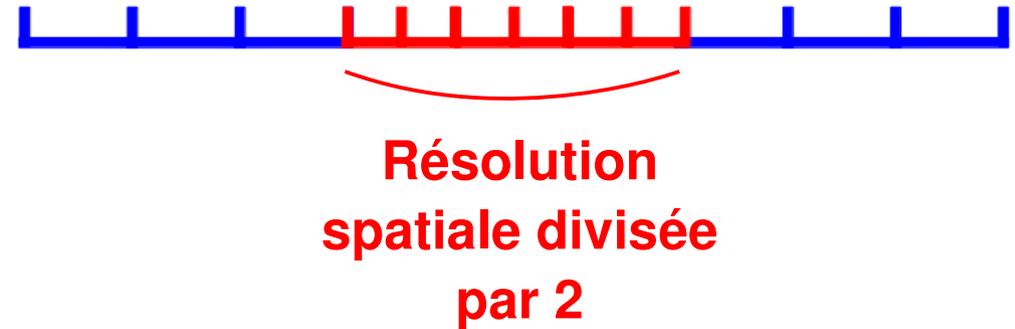


Tests 1D code PIC électrostatique

Collecte des moments : méthode CIC (*Cloud In Cell*)

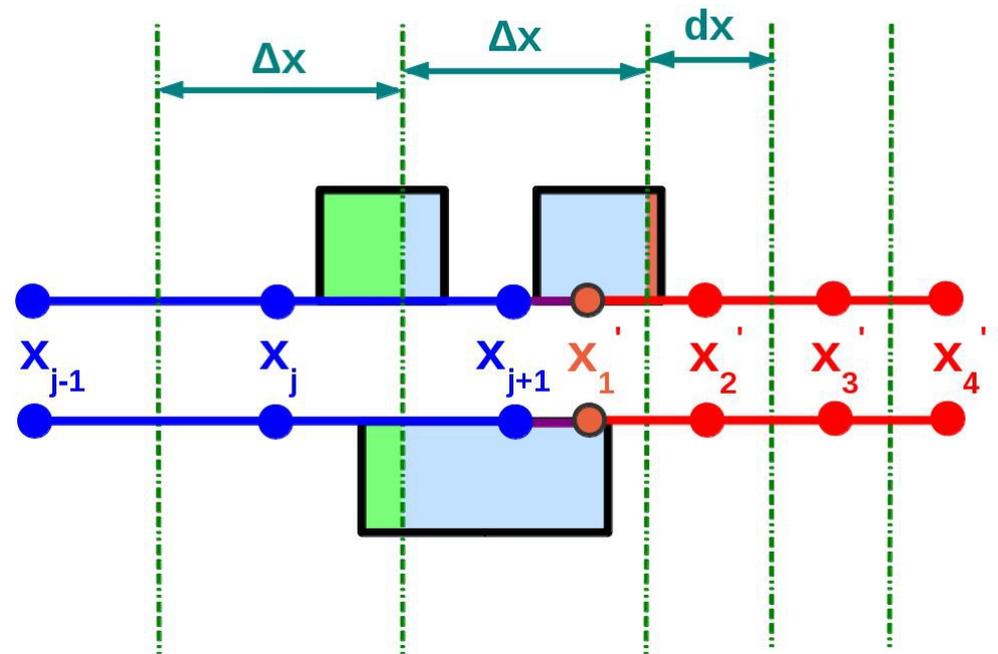


Introduction d'un 2ème maillage :



3 méthodes testées :

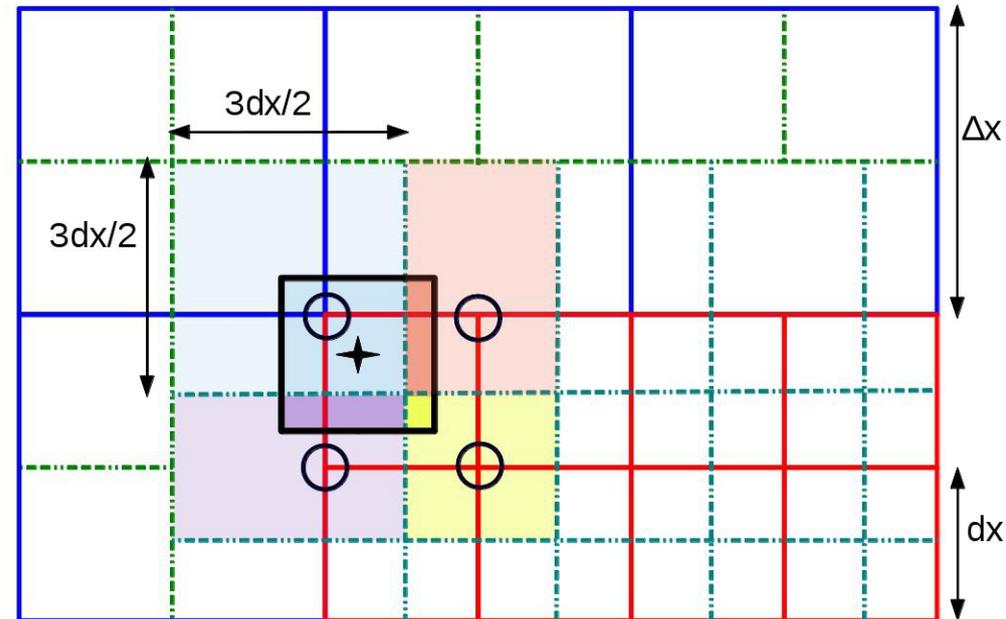
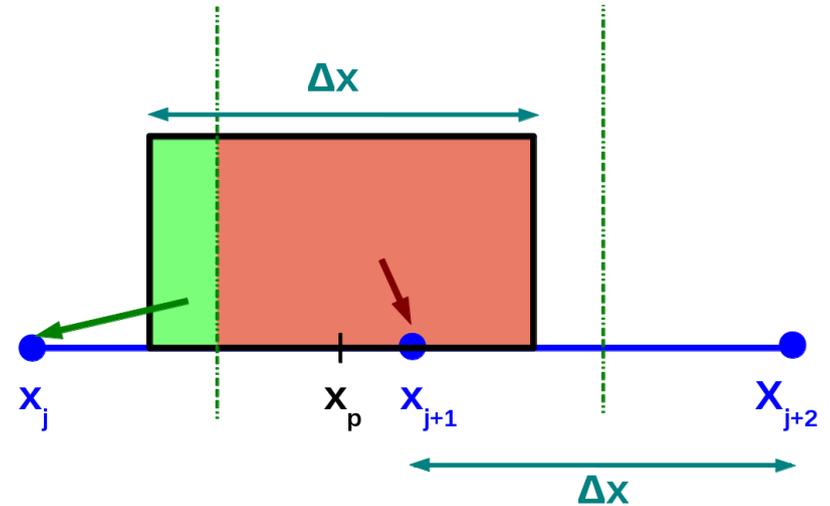
- Macroparticules conservent volume et facteur de forme
- Changer le facteur de forme des particules-test
- **Conserver la forme des macroparticules, et les couper dans le maillage fin**



Développement multi-grille dans le code hybride

Extension en 3D :

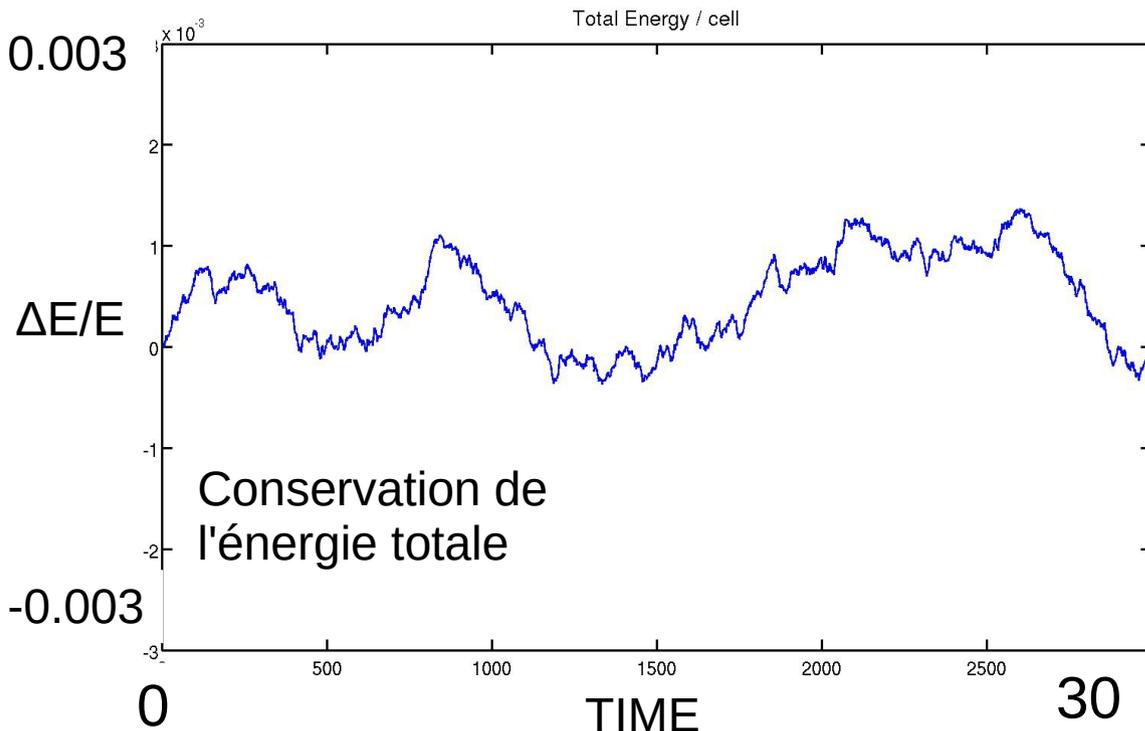
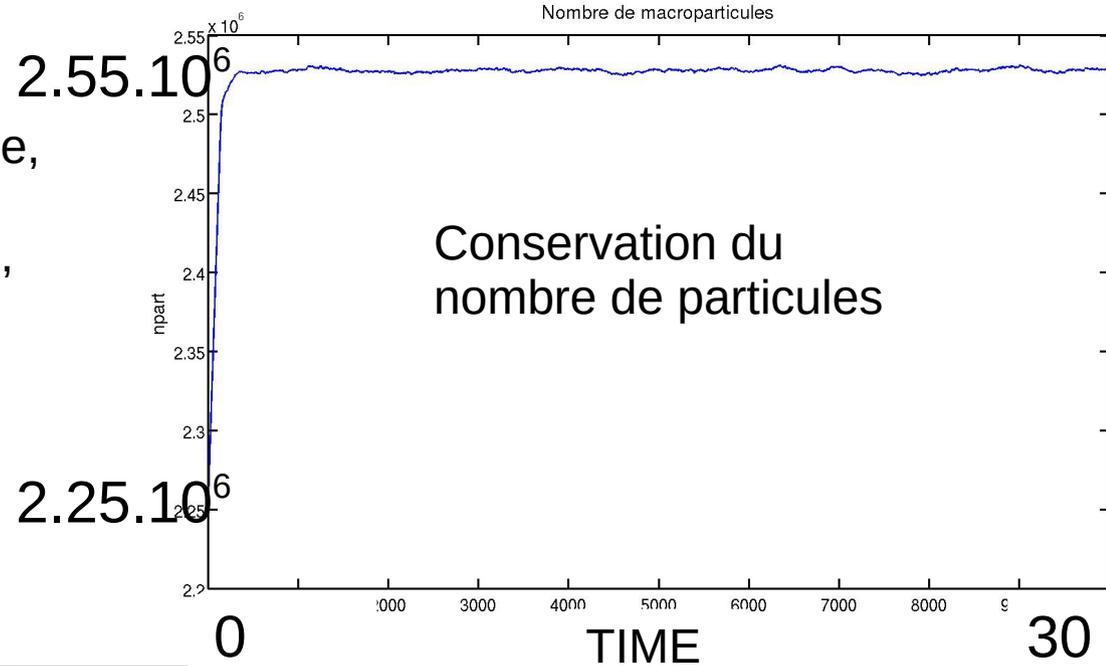
- Couper les particules en 8 (changement de volume)
- Particules non fusionnées en sortie de grille raffinée
- Difficulté supplémentaire :
Calculs des moments aux interfaces
 - Prendre en compte volume des régions d'interaction
 - 3 cas : face, arête, coin



Validation du code

3 différents tests :

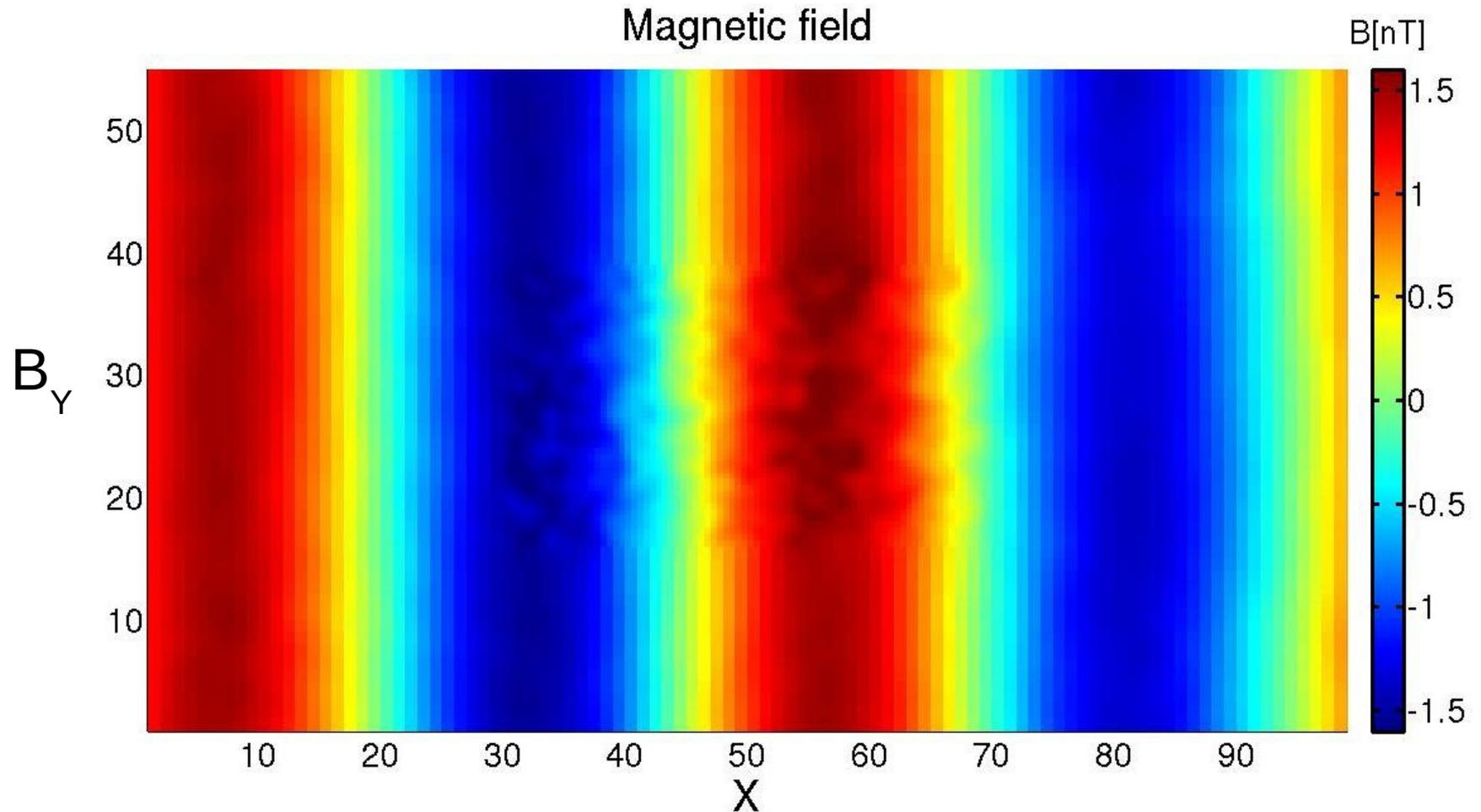
- Écoulement de plasma calme type vent solaire au voisinage de Mars (supersonique, super-alfvénique)
- Écoulement de plasma jovien (subsonique, sub-alfvénique)



Validation du code

3 différents tests :

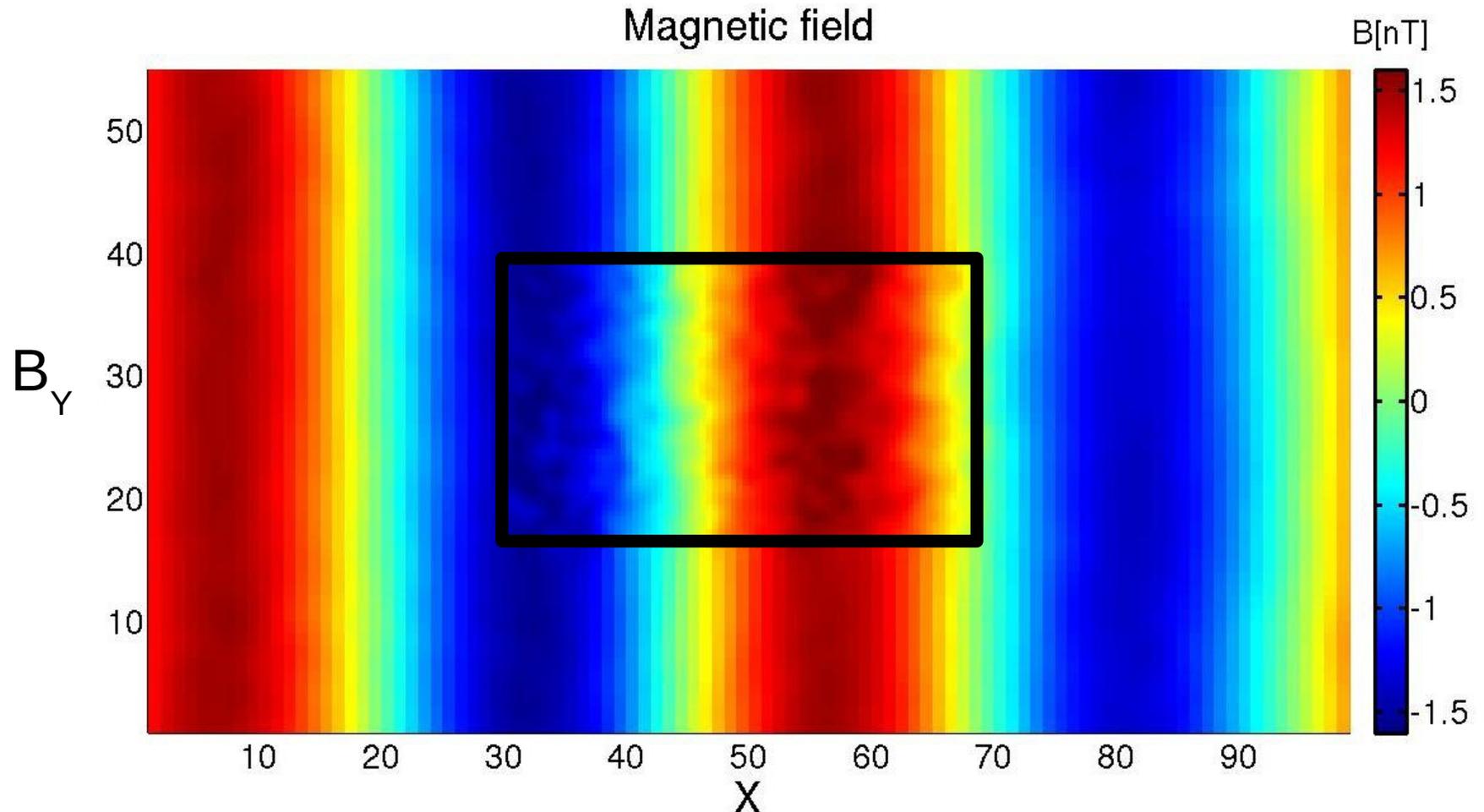
- Écoulement de plasma calme type vent solaire au voisinage de Mars (supersonique, super-alfvénique)
- Écoulement de plasma jovien (subsonique, sub-alfvénique)
- Propagation d'une onde l'Alfvén polarisée



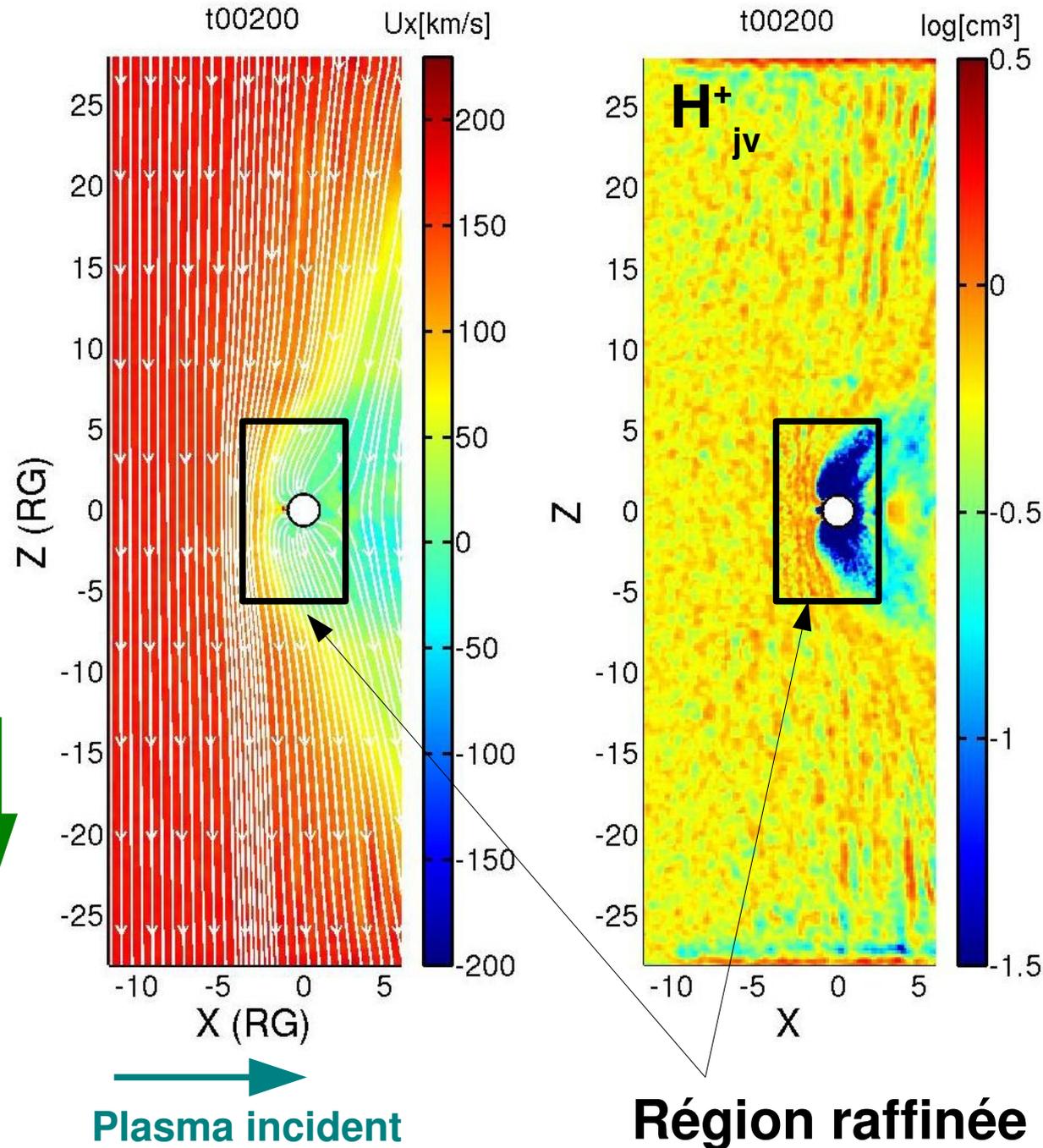
Validation du code

3 différents tests :

- Écoulement de plasma calme type vent solaire au voisinage de Mars (supersonique, super-alfvénique)
- Écoulement de plasma jovien (subsonique, sub-alfvénique)
- Propagation d'une onde l'Alfvén polarisée



Application à Ganymède : résultats préliminaires

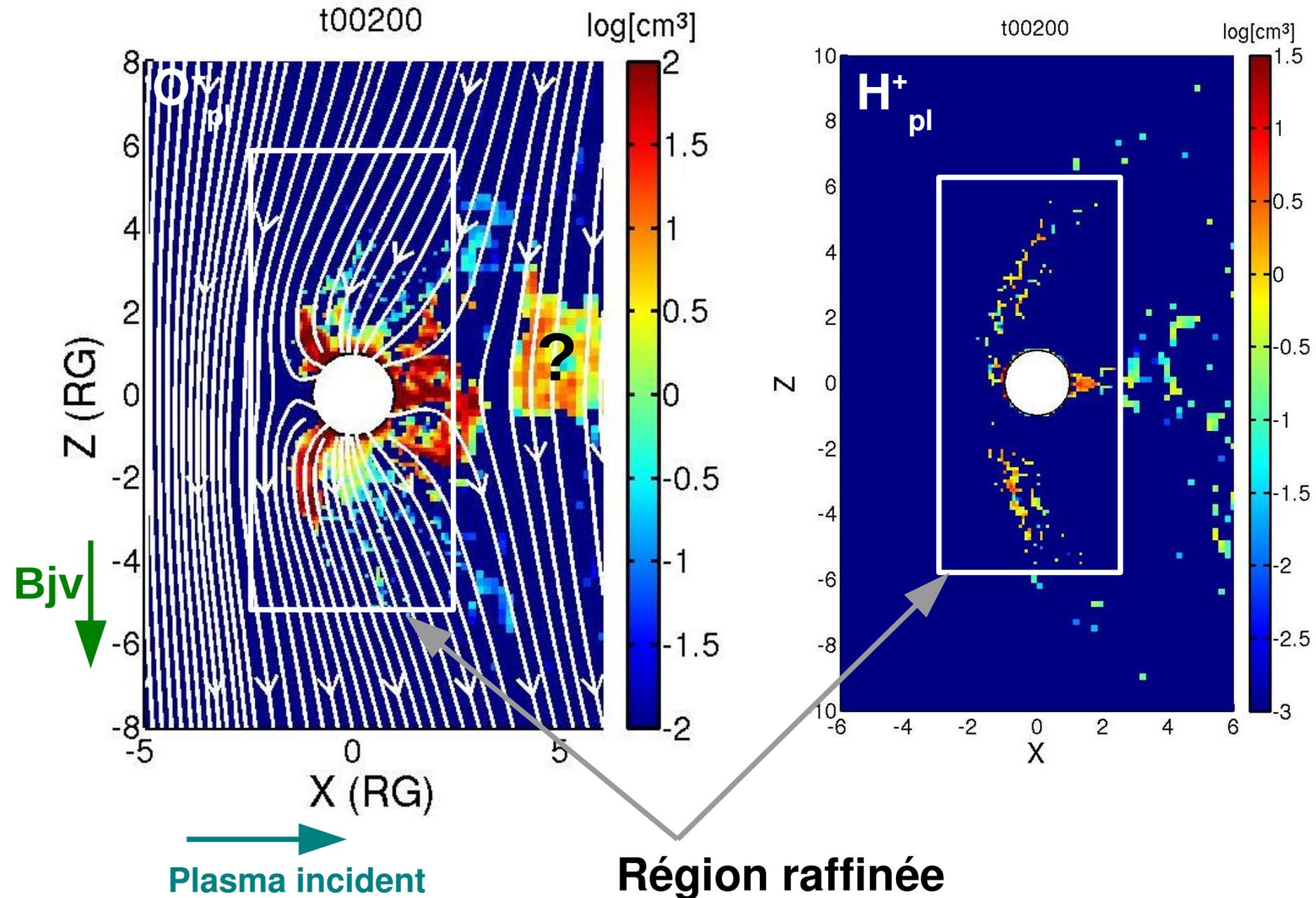


Plasma jovien incident :
O⁺ et H⁺ ($n_e=4\text{cm}^{-3}$)
 $B_z=-120\text{nT}$ (Khurana et al. 1996)

Ionosphère :
O⁺ et H⁺ ($n_i=5000\text{cm}^{-3}$,
 $H=125\text{km}$) (Paty et al. 2004, Kliore et al. 2001)

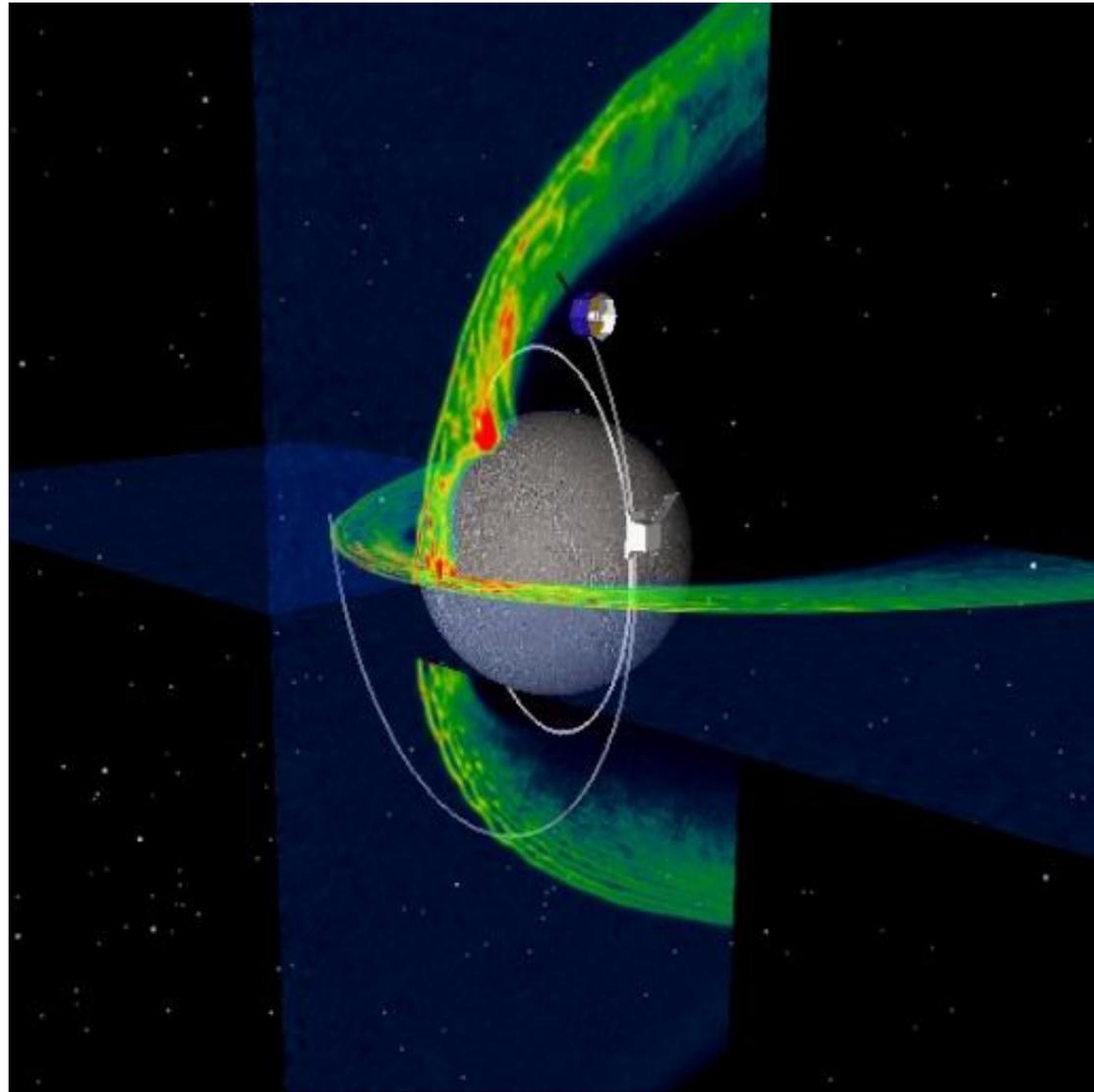
Champ dipolaire :
720 nT équateur
(Kivelson et al. 1996)

Application à Ganymède : résultats préliminaires



La suite :

- Validation : comparaison aux observations (G1, G2, G8) et autres modèles (MHD, multi-fluides ...)
- Ajout d'une exosphère (échanges de charges, photo-ionisation, ionisation par impact électronique)
- Validation de l'approche multi-grille pour d'autres objets (Mercure)



Simulation Mercure : Densité de H⁺ VS

**Modèle
exosphérique**
(Turc et al. 2014)

**Modèle
ionosphérique**
(Leblanc et al. In
prep)

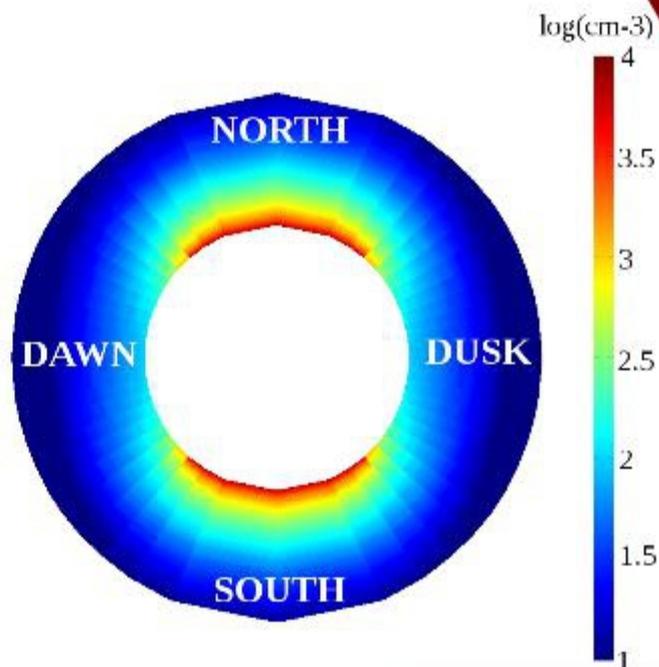
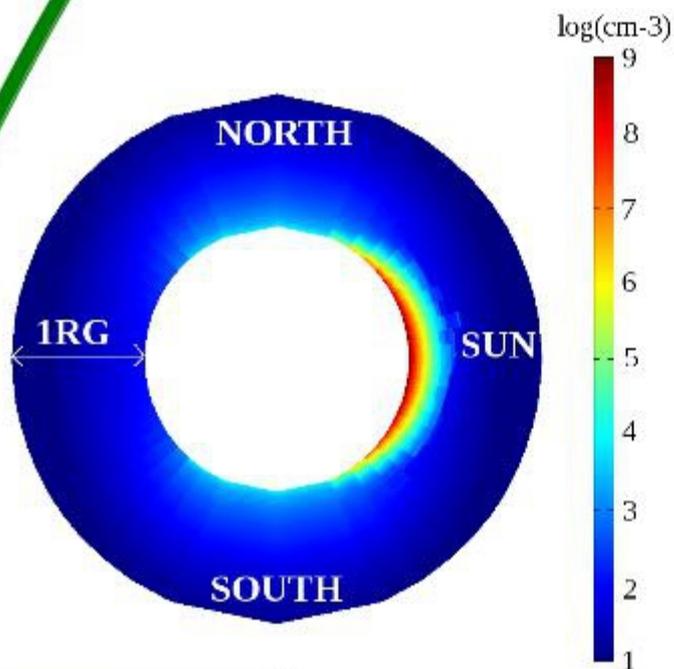
**Modèle
magnétosphérique**
(Leclercq et al. In
prep)

**Modèle
exosphérique
(Turc et al. 2014)**

**Production
ionique**

**Densités de
neutres**

Densité de H₂O



**Modèle
ionosphérique
(Leblanc et al. In
prep)**

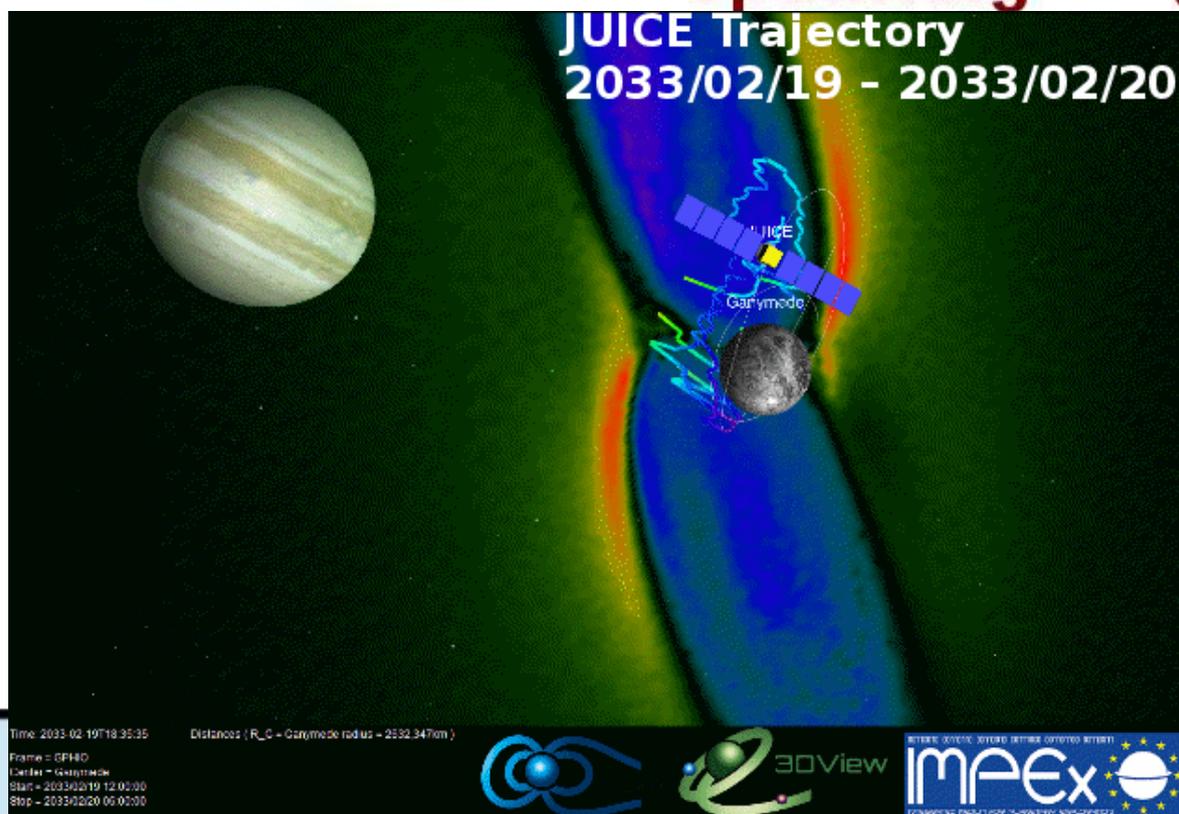
**Modèle
magnétosphérique
(Leclercq et al. In
prep)**

**Modèle
exosphérique
(Turc et al. 2014)**

**Production
ionique**

**Densités de
neutres**

**Cartes de
précipitations
-> Sputtering**



**Modèle
ionosphérique
(Leblanc et al. In
prep)**

**Modèle
magnétosphérique
(Leclercq et al. In
prep)**

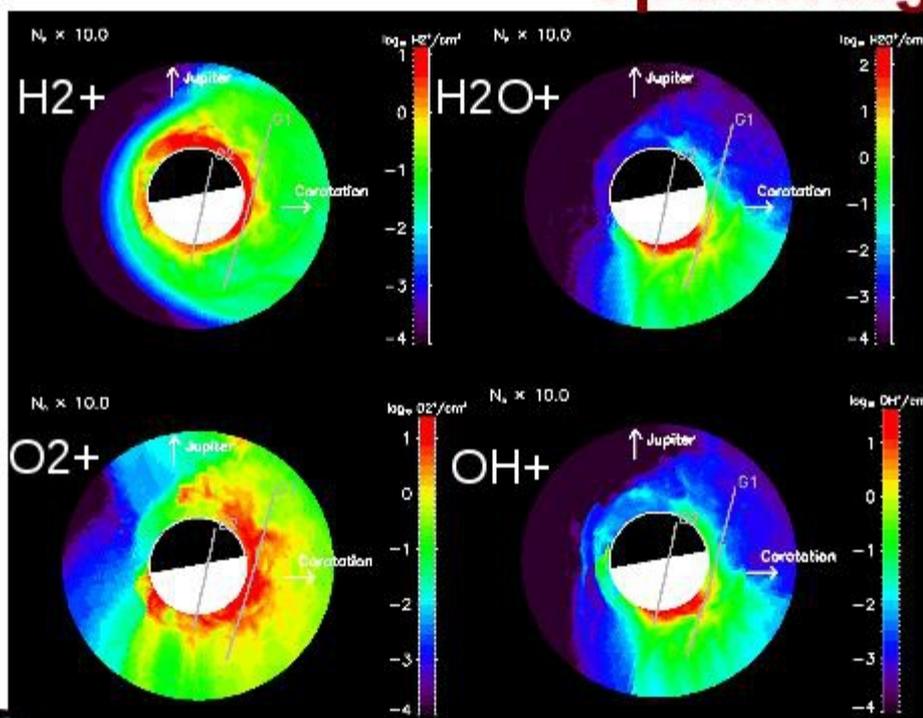
Champs E et B

**Modèle
exosphérique
(Turc et al. 2014)**

**Production
ionique**

**Densités de
neutres**

**Cartes de
précipitations
-> Sputtering**



**Modèle
ionosphérique
(Leblanc et al. In
prep)**

Densités ioniques

**Modèle
magnétosphérique
(Leclercq et al. In
prep)**

Champs E et B