

Étude de l'influence de la propreté électrostatique du satellite sur les mesures du champ électrique basse fréquence de TARANIS

Oriol Jorba Ferro

encadré par Sébastien Hess (ONERA), Elena Seran (LATMOS) et Christophe Bastien-Thiry (CNES)

Contexte

Les satellites en orbite évoluent dans un mélange de particules chargées, et éventuellement de particules neutres. Des électrons et des ions issus de ce plasma interagissent avec les surfaces du satellite et vont ainsi modifier sa charge électrostatique. Cette charge peut induire elle-même des décharges électrostatiques aux conséquences allant de perturbations électromagnétiques (fausses commandes par exemple) à la perte du satellite. L'énergie du plasma ionosphérique est souvent faible et les satellites en orbites de basse altitude (LEO) vont rarement présenter des décharges importantes. Néanmoins, les missions scientifiques qui embarquent des instruments très précis peuvent être affectés par cette interaction satellite-plasma.

Cette thèse s'intéresse particulièrement à ces phénomènes de charge en considérant des plasmas ionosphériques et leur influence sur les instruments embarqués qui vont mesurer un environnement local perturbé.

Les Objectifs Scientifiques

La densité de plasma importante en orbite basse mène à des longueurs caractéristiques du plasma (longueur de Debye) de l'ordre du centimètre. Ces longueurs doivent être résolues dans la simulation pour assurer sa stabilité. Or, le domaine de simulation doit être sensiblement plus grand que la taille du satellite (plusieurs mètres). Cela peut rendre impossible l'utilisation de certains algorithmes. L'objectif est donc d'appliquer des schémas numériques qui permettent de simuler TARANIS en 3D et de connaître avec précision les perturbations qui vont affecter les mesures de charge électrostatique. Dans cette thèse on s'est intéressé par la méthode δf : une méthode qui permet de faire des simulations à faible bruit et avec la même fidélité physique que les autres algorithmes cinétiques.

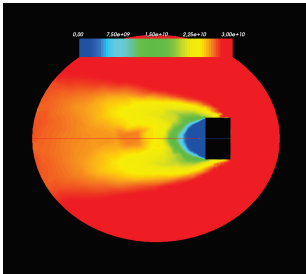


FIGURE 1: Densité ionique autour d'un CubeSat en vol ionosphérique. Le sillage ionique apparaît lorsque le satellite a une vitesse de dérive supérieure aux ions thermiques

Le Satellite : TARANIS (CNES)

- **Orbite** : à 700 km, héliosynchrone
- **Mission** : étudier des phénomènes orageux qui apparaissent dans la haute atmosphère appelés TLEs (*phénomènes lumineux transitoires*) ceux-ci sont aujourd'hui mal connus et leur origine est mal modélisée.



FIGURE 2: Satellite TARANIS (CNES)

Le logiciel : SPIS

Les simulations seront effectuées avec l'outil SPIS (*Spacecraft Plasma Interaction Software*), développé par l'ONERA avec le support de l'ESA et du CNES. SPIS permet de simuler le comportement d'un satellite soumis à un environnement spatial chargé à partir des maillages 3D non-structurés. Tous les différents modèles développés dans cette thèse ont été codés sur ce logiciel.

Description numérique du problème

Le potentiel électrostatique du plasma, ϕ , est calculé en résolvant l'équation de Poisson sur le domaine de calcul Ω , à partir des termes sources (densités de charge de chaque espèce de plasma, ρ_i) qui dépendent eux-mêmes du potentiel.

$$\Delta\phi(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{\epsilon_0} \sum_i \rho_i(\mathbf{x}, t) \quad \text{pour } \mathbf{x} \in \Omega \in \mathbb{R}^3 \text{ et } t \in \mathbb{R}^+ \quad (1)$$

Les potentiels électriques aux limites du domaine de calcul sont définies comme ϕ_{bd} aux limites extérieures et ϕ_{sc} aux limites inférieures, c'est à dire, le satellite. Le potentiel ϕ_{bd} est généralement calculé à partir des conditions de Robin : $\partial_n \phi_{bd} + \alpha \phi_{bd} = b$, alors que le potentiel du satellite est calculé à partir d'une bilan des courants :

$$\frac{d}{dt} \phi_{sc}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{C_{sat}} \sum_i I_i(\mathbf{x}, t) \quad \text{pour } \mathbf{x} \in \Omega_{SC} \in \mathbb{R}^2 \text{ et } t \in \mathbb{R}^+ \quad (2)$$

Pour calculer la densité de charge et le courant électrique il est nécessaire de définir la fonction distribution de chaque espèce $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$ à partir des méthodes analytiques (Maxwell-Boltzmann) où cinétiques (PIC, δf).

Méthodes cinétiques : PIC

La méthode Particle-In-Cell (PIC) consiste à suivre les particules individuelles à partir d'un repère lagrangien dans l'espace de phase, tandis que les moments de la distribution tels que les densités et les courants sont calculés simultanément sur un repère eulerien, donc d'un maillage.

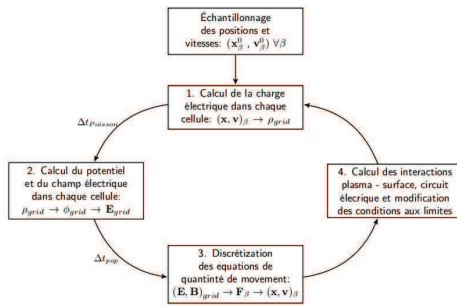


FIGURE 3: Schéma de la méthode PIC appliquée au calcul de la charge électrique des satellites

Modèles fluides : Maxwell-Boltzmann

L'approximation Boltzmann-Poisson (équation 3), utilisé en SPIS, est valable en effectuant les hypothèses suivantes :

- Équilibre thermique
- Isotropie

$$n(\mathbf{x}, t) = n_0 \exp\left(-\frac{q\phi(\mathbf{x}, t)}{kT}\right) \quad (3)$$

Finalement, le potentiel est calculé à chaque itération à partir d'une équation de Poisson non-linéaire.

$$\Delta\phi = -\frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i n_i(\phi) \quad (4)$$

En orbite basse l'approximation Maxwell-Boltzmann n'est plus valable parce qu'il n'y a pas d'isotropie.

Méthode	PIC	Maxwell-Boltzmann
Temps de Calcul :	Très restrictif	Très rapide
Bruit statistique :	Élevé	Pas de Bruit
Stabilité :	Conditionnelle	Conditionnelle mais moins restrictive
Précision Physique :	Oui	Pas dans tout le cas

TABLE 1: Comparation des méthodes PIC et Maxwell-Boltzmann

Méthode δf

La méthode δf consiste à séparer la fonction distribution des populations en deux parties : une fixée f_0 et l'autre perturbée δf . La fonction qui est fixée sera résolue par des méthodes fluides alors que la partie perturbée sera calculée par une méthode cinétique (PIC). Cela conduit à une amélioration de plusieurs ordres de grandeurs du niveau de bruit, en particulier lorsque f_0 peut être choisi de telle sorte que $|\frac{\delta f}{f}| \ll 1$.

$$f(x, v, t) = \underbrace{f_0(x, v, t)}_{\text{fonction analytique}} + \underbrace{\delta f(x, v, t)}_{\text{fonction perturbé}} \quad (5)$$

Fonction analytique f_0

Le bruit de la méthode δf est proportionnelle au ratio $|\frac{\delta f}{f}|$. En conséquence est intéressante d'avoir une fonction analytique - où tabulé - f_0 très proche à la fonction de distribution réel f . Dans le cas du vol ionosphérique, on a proposé la méthode couplée laquelle permet de calculer les principaux moments de la distribution (densité, courant, vitesse...) par des méthodes cinétiques ou géométriques.

Fonction perturbé δf

La fonction perturbé δf est simulé par une méthode cinétique très similaire à la méthode PIC, dans laquelle le poids des particules va être modifié au cours du temps. Sur des simulations 3D le nombre d'équations à résoudre par particule est de 7 (3 pour l'espace, 3 pour la vitesse et une pour le poids de la particule). Le poids d'une particule ω_i , dans un repère lagrangien, suit l'équation suivante :

$$\frac{d\omega_i}{dt} = -(1 - \omega_i) \nabla_{\mathbf{x}, \mathbf{v}} f_0 \quad (6)$$

Résultats

Les figures 4(a) et 4(b) montrent le potentiel électrique autour d'un CubeSat en vol ionosphérique utilisant respectivement la méthode PIC et la méthode δf . La figure 4(c) montre l'évolution temporelle du potentiel de surface des différentes faces du CubeSat avec la méthode PIC et la méthode δf . Comme conclusion, on peut observer que la distribution du potentiel est cohérente avec les méthodes cinétiques (lesquelles peuvent prendre en compte le sillage ionique) au même temps que le bruit mesuré va être énormément réduit.

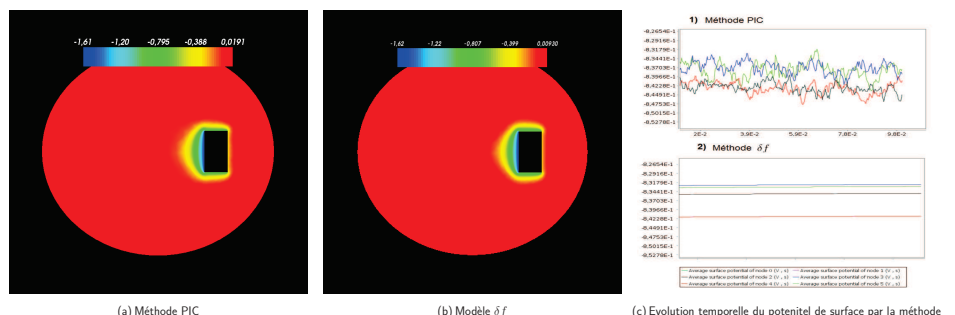


FIGURE 4: Potentiel électrique, en V, autour d'un CubeSat en vol ionosphérique (fig. 4(a) et 4(b)) et évolution temporelle du potentiel de surface (fig. 4(c)).