

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Modélisation du piégeage et des pertes de protons de hautes énergies (1-50MeV) dans les ceintures de radiation terrestres pour la météorologie de l'Espace

Référence : **PHY-DPHY-2025-06**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 01/10/2025

Date limite de candidature : 28/02/2025

Mots clés

Météo de l'Espace, physique statistique, ceintures de radiation terrestres, particules chargées énergétiques

Profil et compétences recherchées

Connaissances approfondies en méthodes numériques, physique statistique et/ou spatiale.

La maîtrise des langages de programmation python et fortran, ainsi que de la physique des particules chargées dans un champ magnétique dynamique serait un plus.

Appétence pour la modélisation physique.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les ceintures de radiation terrestres constituent un environnement radiatif naturel très dynamique, hostile à la plupart des satellites artificiels, et dont la modélisation physique demeure aujourd'hui encore imparfaite. Cette dynamique est généralement décrite par des codes numériques résolvant une équation de diffusion. Du fait des forts gradients dans l'espace de la fonction de distribution et de l'intense dynamique des ceintures de radiation, la modélisation des interactions physiques doit être très précise.

Le code Salammbô 3D protons, développé et perfectionné depuis de nombreuses années au sein du département DPHY de l'ONERA, a acquis aujourd'hui une maturité reconnue internationalement. Les interactions principales sont déjà prises en compte : sources (CRAND, injections de particules), pertes (blindage géomagnétique, pertes par traversée de la magnétopause, échange de charges), diffusions des particules piégées (diffusion radiale, interactions coulombiennes et nucléaires). Cependant, la dynamique de ces interactions, souvent chaotique (modes non diffusifs), limite la précision de notre modélisation.

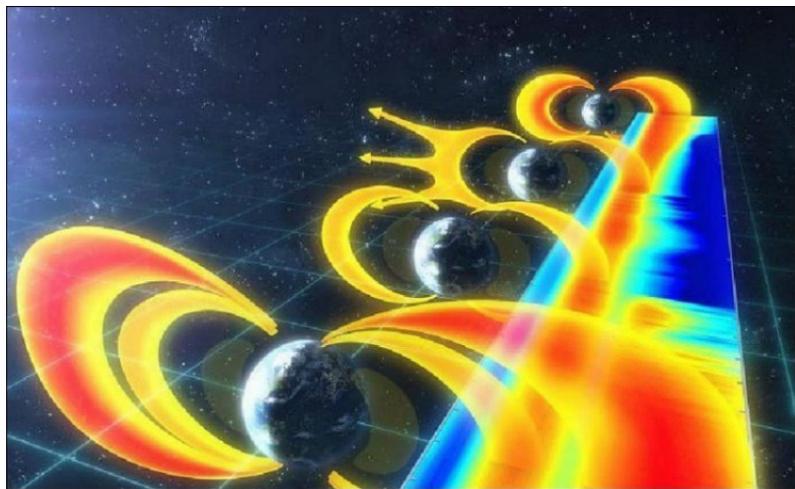
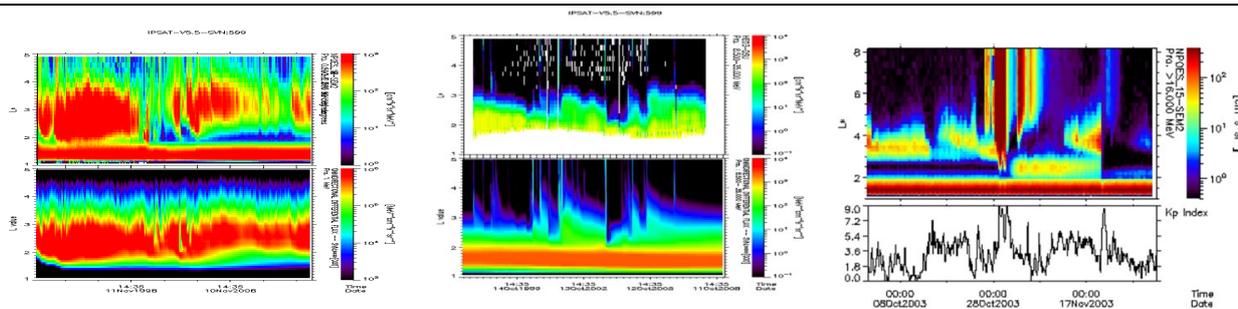


Illustration de la dynamique des ceintures de radiation (credit: Andy Kale, <https://www.eoportal.org/satellite-missions/van-allen-probes#mission-status>)

En parallèle de cette modélisation physique, nous disposons également d'une large base de données de mesures in-situ nous permettant de valider et/ou d'améliorer notre modélisation. Ces données sont déjà prétraitées et ont un format uniformisé de sorte à pouvoir facilement être exploitées pour les besoins de nos recherches.

Aujourd'hui, en particulier du fait de l'évolution des technologies spatialisées (miniaturisation et hausse de la sensibilité aux radiations) et des moyens de mise à poste des satellites (mise à poste tout électrique), la connaissance très précise de la dynamique des protons de 1 à 50 MeV est primordiale. Peu de mesures dans cette gamme d'énergie sont disponibles, et la modélisation est également complexe, car à la frontière entre deux régimes de dynamique, comme illustré sur la figure suivante : un régime diffusif à basses énergies (<1MeV) et un régime chaotique piloté par des piégeages et pertes abruptes (>10MeV). Prendre en compte ces différents régimes dans une modélisation complète et précise reste aujourd'hui encore un défi complexe à relever.



Comparaisons entre le code ONERA Salammbô-proton (bas) et les mesures de satellites in situ (haut): à gauche à 1 MeV, au milieu pour la gamme d'énergies 8,5 - 35 MeV, et à droite mesures >16MeV et l'indice de dynamique Kp.

Notre modélisation de la dynamique des protons nécessite d'être mise à jour aujourd'hui pour répondre au besoin croissant en météorologie et climatologie de l'Espace. Plusieurs axes de recherche ont été identifiés, et ce projet de thèse s'attèlera à les explorer pour améliorer notre modélisation de la dynamique, et valider ces avancées par comparaison à des mesures in-situ.

Les processus principaux dont la modélisation est à reprendre et affiner sont : le piégeage dynamique à haute énergie des protons d'éruptions solaires, le processus lent de source par désintégration de neutrons atmosphériques (CRAND pour Cosmic Ray Albedo Neutron Decay, et SPAND pour Solar Proton Albedo Neutron Decay), et les pertes rapides liées au blindage géomagnétique. Ces termes de sources et de pertes sont primordiaux pour piloter précisément la dynamique modélisée, que ce soit dans un code de simulation pure, ou pour piloter un processus d'assimilation de données, ou bien encore entraîner des modèles d'apprentissage automatique développés en parallèle au sein de l'unité ERS (Environnement Radiatif Spatial).

Collaborations envisagées

Le travail de thèse s'effectuera au sein du département DPHY Toulouse de l'ONERA, dans l'unité ERS. Des collaborations ponctuelles au cours de la thèse pourront être envisagées avec des laboratoires partenaires, français et internationaux (CEA-Saclay, US Air Force Laboratory, Dartmouth College, entre autres).

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : Vincent MAGET

Tél. : 0562252747 Email : vincent.maget@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Vincent MAGET

Laboratoire : DPHY/ERS

Tél. : 0562252747

Email : vincent.maget@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>