

**PROPOSITION DE SUJET DE THÈSE**

**Intitulé : Extension de la modélisation de la dynamique des ceintures de radiation terrestres aux basses énergies**

Référence : **PHY-DPHY-2022-03**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse :** 1<sup>er</sup> octobre 2022

**Date limite de candidature :**

**Mots clés**

Magnétosphère interne, Ceintures de radiation, Champ électrique terrestre, Equation de diffusion-convection

**Profil et compétences recherchées**

Ingénieur ou M2 Recherche à dominante aérospatiale ou astrophysique

Environnement spatial, Physique des plasmas, Physique appliquée, Modélisation numérique, Programmation fortran 90

**Présentation du projet doctoral, contexte et objectif**

Les ceintures de radiations sont des structures physiques typiques des planètes magnétisées. Elles résultent du piégeage électromagnétique de particules chargées dans une cavité magnétique de forme toroïdale. Les ceintures de radiations de la Terre s'étendent de la haute atmosphère jusqu'à l'orbite géostationnaire et sont peuplées essentiellement par des électrons et des protons avec des énergies pouvant atteindre respectivement plusieurs Méga-électron volts (MeV) et plusieurs centaines de MeV. Du fait de la forte corrélation de leur dynamique avec l'activité solaire, les flux de ces particules énergétiques peuvent gagner plusieurs ordres de grandeurs en amplitude sur des temps courts (de l'ordre de l'heure), représentant donc un environnement hostile pour l'activité spatiale.

L'unité ERS (Environnement Radiatif Spatial) du département Physique Instrumentation Environnement Espace (DPHY) de l'ONERA est spécialisée dans la modélisation de la dynamique des ceintures de radiation et développe pour cela le modèle physique Salammbô. Ce dernier est en constante évolution et repose sur une description diffusive tridimensionnelle dont les coefficients de diffusion sont représentatifs des différents processus physiques en jeu dans les ceintures (interactions coulombiennes dans la haute atmosphère, interactions résonnantes avec les ondes des plasmas magnétosphériques, transport radial depuis la queue de la magnétosphère...). Pour prendre en compte la dynamique réelle, le modèle est piloté par des indices d'activité géomagnétique comme l'indice Kp. Afin d'améliorer la précision physique du modèle Salammbô, la contribution convective du champ électrique a été intégrée récemment dans le code afin d'étendre son domaine de validité aux particules de basses énergies. Pour ce faire, la dimension longitudinale (ou temps local magnétique) a été ajoutée au modèle Salammbô (Salammbô 4D), induisant de nouvelles contraintes et de nouveaux objectifs scientifiques à explorer, tels l'augmentation du coût computationnel, la prise en compte d'une physique plus complexe, et la nécessité de modéliser plus finement certains processus physiques.

L'objectif de cette thèse est de continuer le développement entrepris sur le code Salammbô 4D, en se basant sur les acquis des travaux précédents, tout en explorant de nouvelles briques d'améliorations à adopter sur les plans physique et numérique. En effet, la contribution des différentes composantes du champ électrique (champ de corotation, champ de convection, champ induit) sur la dynamique des ceintures de radiation et leur modélisation précise reste encore à affiner. De plus, le paramètre Kp a montré ses limitations pour la prise en compte de l'asymétrie jour-nuit ou encore pour piloter la formation rapide de structures localisées lors des phases principales des orages géomagnétiques. Un travail est donc nécessaire pour piloter de manière plus optimale ce modèle dynamique.

Une première partie du travail a donc pour but de mieux prendre en compte les champs électriques magnétosphériques dans le modèle Salammbô. Depuis les premières versions testées, plusieurs développements de modèles numériques pour le champ électrique ont été testés. Il est important aujourd'hui de déterminer, étudier et mettre en œuvre dans Salammbô le modèle le plus réaliste possible. Dans un second temps, on cherchera à identifier et implémenter le ou les paramètre(s) géomagnétique(s) adéquat(s) pour piloter la dépendance en temps local magnétique des différents processus physiques, ainsi que les conditions aux limites responsables du remplissage des couches externes des ceintures de radiations. On analysera en particulier le couplage vent solaire – ceintures de radiations à basses énergies pour piloter le

modèle Salammbô-4D. Une attention particulière sera enfin portée sur l'impact de ces travaux sur la robustesse numérique et sur le coût en temps de calcul du modèle. On s'attachera en fin de thèse à comparer les résultats obtenus avec des mesures in-situ au cours d'orages géomagnétiques remarquables.

#### **Collaborations envisagées**

Co-direction avec Benoit Lavraud de l'LAB (Bordeaux) et de l'IRAP (Toulouse)

#### **Laboratoire d'accueil à l'ONERA**

Département :  
Physique, instrumentation, environnement, espace  
Lieu (centre ONERA) : Toulouse  
**Contact** : Nour Dahmen  
Tél. : 05 62 25 28 52 Email : [nourallah.dahmen@onera.fr](mailto:nourallah.dahmen@onera.fr)

#### **Directeur de thèse**

Nom : Benoit Lavraud  
Laboratoire : Laboratoire d'Astrophysique de  
Bordeaux  
Tél. : 05 40 00 31 46  
Email : [benoit.lavraud@irap.omp.eu](mailto:benoit.lavraud@irap.omp.eu)  
[benoit.lavraud@u-bordeaux.fr](mailto:benoit.lavraud@u-bordeaux.fr)

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