

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Développement d'un modèle réduit dynamique des ceintures de radiations terrestres

Référence : **PHY-DPHY-2026-20**

(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : **01/10/2026**

Date limite de candidature : **01/03/2026**

Mots clés

Ceintures de radiations, simulation numérique, apprentissage automatique, modèles réduits, météorologie et climatologie de l'espace

Profil et compétences recherchées

Formation en physique statistique, spatiale, ou des plasmas.

La maîtrise des langages de programmation python et fortran, de frameworks d'apprentissage automatique (Pytorch) ainsi que de la physique des particules chargées dans un champ magnétique dynamique seraient des plus.

Profil multidisciplinaire mathématiques/physique, ouvert et curieux.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les ceintures de radiation terrestres, environnement radiatif naturel très dynamique, restent un défi pour la modélisation physique. Or, leur simulation et reproduction précises sont cruciales pour la protection des satellites et la compréhension des phénomènes spatiaux. Le code Salammbô 3D électrons, développé à l'ONERA / DPHY, est une référence internationale pour modéliser ces ceintures et repose sur la résolution d'une équation de diffusion avec un schéma numérique de type implicite, volumes finis. Toutefois, son coût calculatoire limite son utilisation pour des simulations raffinées de très longue durée, utilisées pour mieux caractériser le comportement des ceintures de radiations du point de vue de leur climatologie, mais aussi pour la génération rapide d'ensembles de prévisions, un besoin essentiel pour la météorologie de l'espace. La modélisation réduite offre une solution en construisant des *surrogates* (modèles « simplifiés ») capables de reproduire la dynamique du système tout en réduisant drastiquement le temps de calcul. L'objectif principal de cette thèse est d'étudier la faisabilité du développement d'un tel modèle pour Salammbô. De manière sous-jacente, il s'agira d'explorer des méthodes innovantes de modélisation utilisant les données complémentaires à la modélisation purement physique et d'analyser les limites et bénéfices de telles méthodes.

Cette thèse s'articule autour de trois axes de recherche qui conjuguent enjeux numériques et physiques :

- Le premier axe porte sur la réduction de dimensionnalité : il s'agit d'identifier une représentation latente compacte capable de conserver les caractéristiques physiques du système, tout en permettant une compression efficace des cartes de densité d'espace des phases produites par Salammbô.
- Le deuxième axe explore la construction d'un modèle dynamique dans cet espace latent : nous étudierons des approches classiques (régressions polynomiales, processus gaussiens) et des techniques d'apprentissage profond comme les modèles récurrents capables de capturer l'évolution temporelle des variables d'état. Une piste potentielle consistera à intégrer des paramètres externes (activité solaire, conditions géomagnétiques) pour adapter dynamiquement le modèle. Ces paramètres pourront être ceux déjà utilisés pour calculer les différents coefficients pour le modèle Salammbô actuel (K_p , C_a , etc.), mais aussi d'autres paramètres physiques d'intérêt plus difficiles à exploiter dans le cadre de la modélisation purement physique.
- Le troisième axe vise à quantifier l'impact de la réduction sur la précision et la robustesse du *surrogate*. Il s'agira alors d'analyser la capacité du ou des modèles à reproduire des événements critiques et comprendre les interactions physiques prises en compte (ou non) par les modèles réduits, afin d'évaluer la performance en termes d'équilibre entre la crédibilité physique et le gain de performance computationnelle.

Au-delà de ces axes, cette thèse ouvrira de nouvelles pistes pour l'étude et la compréhension des ceintures de radiations terrestres, dont une partie pourra être explorée au cours de celle-ci en fonction de l'avancement. Par exemple, en utilisant des méthodes d'analyse de sensibilité couplées aux modèles réduits, il sera possible de mettre en évidence les mécanismes de couplage entre l'activité solaire et la dynamique des ceintures et de quantifier l'influence des paramètres géomagnétiques sur la dynamique des ceintures. Cela pourra s'appuyer sur la comparaison avec des mesures issues de missions scientifiques, afin de valider les avancées obtenues. Ces travaux ouvrent également la porte à une exploration, en première approche, de l'assimilation de données observationnelles dans l'espace latent. Les travaux et études proposés dans cette thèse sont ainsi hautement innovants mais aussi multidisciplinaires, à la frontière de la modélisation numérique, de la physique et de l'intelligence artificielle.

En termes de perspectives, cette étude ouvrira la voie à des applications opérationnelles, comme l'intégration du *surrogate* dans des chaînes de prévision en temps réel. Elle contribuera également à l'amélioration des modèles de spécification pour les missions spatiales, en fournissant des simulations climatologiques à long terme statistiquement plus riches.

Collaborations envisagées

Une collaboration avec le CNRM/Météo France sur les méthodes est envisagée.

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : TOULOUSE

Contact : Guillaume BERNOUX

Tél. : 0562252932 Email : guillaume.bernoux@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Vincent MAGET

Laboratoire : ONERA/DPHY

Tél. : 0562252747

Email : vincent.maget@onera.fr

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