

Invitation à la soutenance de thèse

**ETUDE DE L'EMISSION SYNCHROTRON DES CEINTURES DE RADIATION
OBSERVEE DEPUIS LA LUNE**

*Study of the cyclo-synchrotron emission of the Earth's radiation belts observable
from the moon*

Gwendoline MARC

6 octobre 2025 à 13h00
ONERA Toulouse, Auditorium

Devant le jury composé de :

Baptiste CECCONI
Benoît LAVRAUD
Dimitra KOUTROUMPA
Iannis DANDOURAS
Angélica SICARD
Quentin NENON

LIRA, Observatoire de Paris
LAB, Université de Bordeaux
LATMOS, Université Paris-Saclay
IRAP, Université de Toulouse
DPHY, ONERA, Université de Toulouse
LATMOS, Université Paris-Saclay

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examineur
Directrice de thèse
Co-directeur de thèse

Résumé

Les ceintures de radiation terrestres sont des régions dynamiques de la magnétosphère où des particules chargées de haute énergie sont piégées par le champ magnétique terrestre. Leur structure et leur évolution sont fortement influencées par l'activité solaire : les tempêtes géomagnétiques modifient significativement la distribution des électrons piégés et représentent un risque sérieux pour les infrastructures spatiales. Une surveillance précise et continue de ces régions est donc essentielle. Cependant, les observations actuelles reposent principalement sur des mesures in situ par satellites, limitées par leur couverture spatiale et temporelle, restreignant ainsi notre capacité à saisir la dynamique globale des ceintures de radiation.

Cette thèse explore une nouvelle approche d'observation basée sur les émissions radio générées par les électrons piégés dans les ceintures de radiation. Ces émissions cyclo-synchrotron, bien qu'indétectables depuis le sol en raison de l'absorption ionosphérique en-dessous de 10 MHz, pourraient être observées depuis l'espace, et notamment depuis la surface de la Lune. En s'appuyant sur les travaux de Hegedus et al. (2020), centrés sur les électrons relativistes de haute énergie (> 1 MeV), nous avons développé un nouveau modèle capable de simuler les émissions cyclo-synchrotron d'électrons de plus faibles énergies. Cela a nécessité l'implémentation d'un formalisme généralisé permettant de décrire précisément les émissions dans les régimes relativiste et non

relativiste. Le modèle génère des cartes d'intensité de l'émission cyclo-synchrotron à partir de distributions spatiales et énergétiques d'électrons fournies par Salammbô-3D, un modèle physique développé à l'ONERA depuis plusieurs décennies.

La deuxième partie de la thèse aborde le problème inverse : peut-on reconstruire les distributions électroniques 3D (énergie, angle d'attaque et L^*) à partir d'images 2D de rayonnement cyclo-synchrotron ? Étant donné la nature mal posée de ce problème, plusieurs stratégies ont été explorées, incluant des inversions régularisées et une reformulation non linéaire. Pour stabiliser l'inversion et réduire sa dimension, nous avons développé une méthode basée sur l'analyse en composantes principales (PCA). Cette approche permet la reconstruction précise de distributions d'électrons dans diverses conditions géomagnétiques.

Enfin, au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'exploitation directe des images cyclo-synchrotron, sans recourir à l'inversion. L'analyse de plusieurs périodes de temps calmes et d'orages géomagnétiques a mis en évidence des corrélations entre les caractéristiques observées dans les images cyclo-synchrotron et différents paramètres géomagnétiques ou flux d'électrons. Ces résultats suggèrent que les images seules peuvent constituer un outil de diagnostic pertinent pour l'étude des ceintures de radiation.

Dans l'ensemble, cette thèse démontre la faisabilité d'utiliser des observations radio depuis la Lune pour accéder à la dynamique globale des ceintures de radiation terrestres, et pose les bases du développement futur d'instruments de télédétection dédiés à l'étude de l'environnement radiatif terrestre.

Mots clés

Emission cyclo-synchrotron, ceintures de radiation.