

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Utilisation et intégration de mesures magnétiques sol dans la modélisation dynamique des rayons cosmiques atmosphériques pour la caractérisation de l'environnement radiatif naturel atmosphérique et de ses effets

Référence : **PHY-DPHY-2026-22**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre-Décembre 2025

Date limite de candidature : N/A

Mots clés

ERN atmosphérique, mesures magnétiques, aurores australes, observatoires en milieu polaire

Profil et compétences recherchées

Master et/ou diplôme d'ingénieur en physique (EOST ...)

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Les rayons cosmiques sont composés de particules très énergétiques provenant de l'espace, principalement des protons. Ils suivent des trajectoires complexes dans le champ magnétique interplanétaire (du Soleil) puis terrestre et peuvent même être empêchés d'accéder à l'atmosphère, si leur énergie est trop faible. Lorsque ces particules pénètrent le voisinage terrestre, elles interagissent avec les atomes de l'atmosphère, produisant d'autres particules très énergétiques qui elles-mêmes produisent d'autres particules, etc. Cette douche inonde la surface terrestre de particules cosmiques dites « secondaires » dont la nature demeure variée (proton, neutron, muon, électron, etc.). Le transport des rayons cosmiques jusqu'au sol est également influencé par l'eau de surface et l'eau atmosphérique [1][2]. La caractérisation de l'environnement radiatif naturel (ERN) atmosphérique est un enjeu crucial, en particulier pour la prise en compte de ses impacts sur les systèmes électroniques.

La variabilité du champ magnétique et de l'activité du Soleil introduit des modulations du spectre des rayons cosmiques pénétrant la haute atmosphère terrestre sur des échelles de temps allant de quelques heures aux millénaires. Les éruptions solaires sont des phénomènes physiques complexes, tant au niveau des variations du champ magnétique qu'au niveau de la dynamique du plasma, tout au long du chemin du Soleil à la Terre. Lors des éjections de masses coronales, de grandes quantités de plasmas, principalement composés de protons et d'électrons dans des gammes d'énergie très variables de 0.1 eV jusqu'aux très hautes énergies, sont libérées et envoyées dans l'espace interplanétaire. Le vent solaire augmente en densité et en vitesse et peut venir comprimer drastiquement la magnétosphère. Les lignes du champ magnétique terrestre sont ainsi compressées, les mesures magnétiques effectuées dans les observatoires à la surface de la Terre montrent des variations brusques et intenses qui s'accompagnent parfois d'événements lumineux visibles dans la haute atmosphère, les aurores polaires, mais également de phénomènes intangibles comme la propagation de rayons cosmiques.

Si les orages magnétiques naissent de la perturbation des systèmes de courants électriques de la magnétosphère et de l'ionosphère, les aurores résultent quant à elles de l'interaction entre les particules chargées du vent solaire et les molécules présentes dans la haute atmosphère terrestre. Lorsque ces particules pénètrent la magnétosphère terrestre notamment à l'arrière de la Terre, elles suivent un trajet complexe qui, à partir de 6 à 7 rayons terrestres, suit les lignes du champ magnétique. Elles sont dirigées autour des pôles magnétiques où elles entrent en collision avec les composés de la haute atmosphère. Ces collisions excitent les atomes, ions et molécules, qui émettent ensuite de la lumière lorsqu'ils reviennent à leur état fondamental. Certaines particules captées directement par le champ magnétique terrestre entrent à très hautes latitudes dans l'atmosphère. Elles ont généralement des énergies moindres et créent des émissions rouges peu intenses nommées « Polar Rain ».

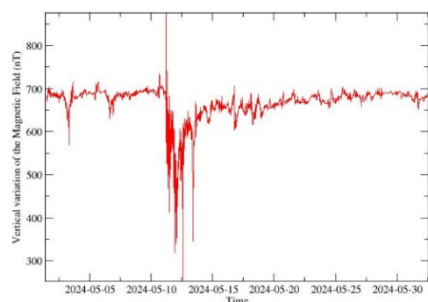
La station de Concordia est un site isolé en Antarctique aux conditions extrêmes mais uniques pour les observations scientifiques. La station, située sur une épaisseur de plus de 3 500 mètres de glace, est éloignée de la croûte terrestre. Les phénomènes d'induction secondaire dans celle-ci se révèlent parfaitement atténués favorisant des mesures précises du champ magnétique. De plus, la proximité du pôle Sud géomagnétique permet une observation privilégiée de l'intérieur de l'ovale auroral (cornet polaire) et donc des aurores australes depuis un azimut unique. Enfin, Concordia est idéale pour étudier les rayons cosmiques, car l'atmosphère y est plus fine, permettant des observations plus directes des particules venant de l'espace. Le magnétisme est observé depuis 2005, les rayons cosmiques depuis 2015 et les aurores polaires depuis janvier 2025.

Le programme GEOMAGNETISM/OBS (no 139) opère cinq observatoires magnétiques permanents dans les Terres australes au sud de l'Océan Indien et en Antarctique dont Concordia en continu depuis 2005 [3]. Le champ magnétique terrestre y est enregistré en continu avec des taux d'échantillonnage de 1 seconde. La continuité, la qualité, la stabilité et l'homogénéité de ces observations sont de première importance pour leur utilisation continue par les communautés scientifiques de la Terre solide et de l'Astronomie-Astrophysique.

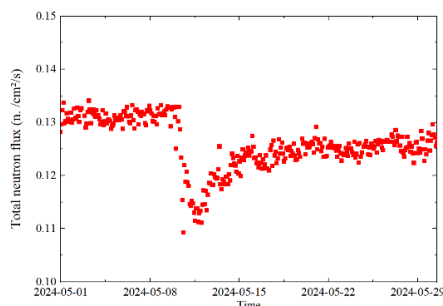
Le programme CHINSTRAP (no 1112) [4] permet des mesures permanentes depuis 2015 des spectres de neutrons cosmiques. Il couvre une large gamme d'énergie allant de la dizaine de meV à la dizaine de GeV, avec une résolution temporelle de 5 minutes. Ces mesures étant influencées par l'hydrométrie atmosphérique, elles peuvent être corrigées en utilisant les profils de vapeur d'eau mesurés par le radiomètre micro-ondes du programme HAMSTRAD (no 910).

Enfin, le programme All Sky Antarctica (no 1286) propose la mise en place lors de la campagne d'été 2024/25 d'une caméra plein ciel qui observe de manière permanente des aurores polaires australes. Une autre caméra identique a été installée à proximité de l'ovale sur la base Dumont D'Urville. Ces caméras sensibles aux rayonnements dans différentes longueurs d'onde (391 nm et 630 nm), vont permettre d'analyser la dynamique de l'atmosphère terrestre pendant ces phénomènes lumineux ainsi que les caractéristiques énergétiques des précipitations de particules. En plus de fournir des informations directes sur ces phénomènes, les imageurs sont soumis à l'impact direct des rayons cosmiques par dépôts de charges directs et/ou indirects dans les pixels. Les caméras CMOS et/ou CCD utilisées par les astronomes pour enregistrer leurs observations sont soumises aux mêmes perturbations qui font l'objet de corrections algorithmiques lors des traitements d'images. Ces signaux parasites sont pourtant une source d'information pour étudier la dynamique de l'ERN et une opportunité pour valider les modèles physiques. Dans le cadre du programme ASTEP+ (no 1066) dédié à l'observation des exoplanètes en Antarctique, les astronomes sont confrontés à ces niveaux de charges parasites, systématiquement enregistrés depuis 2017, et constituant une base de données unique.

L'illustration suivante représente trois observations faites à Concordia, avec les variations de la composante verticale du champ magnétique, le flux de neutrons et une photographie de l'aurore observée le 10 mai 2024 (© Marco Buttu). Une tache solaire de très grande taille (nommée AR3664) est entrée en éruption à plusieurs reprises. Elle a notamment été à l'origine d'un intense orage magnétique le 10 mai en fin d'après-midi ressenti dans tous les observatoires magnétiques à la surface du globe. Les indices d'activité magnétique ont atteint des valeurs importantes ($am > 462$ nT, $Dst < 400$ nT, $PC_{Sud} > 18$ mV/m). Des observations d'aurores dans la nuit du 10 au 11 mai ont illuminé le ciel jusqu'au sud de l'Europe. Enfin, une décroissance du flux de neutrons a été observée sur les données du spectromètre à neutrons. Elle résulte d'une diminution rapide de l'intensité des rayons cosmiques galactiques pénétrant la haute atmosphère terrestre, observée suite à la compression de la magnétosphère.



Composante verticale du champ magnétique mesurée à Concordia (Mai 2024)



Flux de neutrons mesuré à Concordia (Mai 2024)



Aurore observée le 10 mai 2024 à Concordia (© Marco Buttu)

L'objectif de cette thèse est d'utiliser et d'intégrer des données magnétiques d'observatoires sol dans la modélisation dynamique des rayons cosmiques au niveau de l'atmosphère, principalement pour la caractérisation de l'ERN atmosphérique et de ses effets. Les travaux de simulation seront basés sur la plateforme ATMOS CORE [5], développée depuis 2015 par l'ONERA, et dont la prise en compte de l'impact du champ magnétique s'appuie sur des cartographies statiques de la rigidité de coupure. L'exploitation scientifique des perturbations extraites des caméras des programmes All Sky Antarctica et ASPET+ s'appuiera sur la connaissance de l'ERN et sur la plateforme MUSCA SEP3 dont des travaux antérieurs ont démontré sa capacité à simuler l'impact des radiations sur les composants à base de semi-conducteurs (technologies CMOS et CCD) [6]. Ces analyses permettront de valider les modèles dynamiques, à la fois sur le long terme (depuis 2017) et lors d'évènements solaires et/ou magnétiques.

La thèse débutera par des travaux de traitement des données obtenues sur la station Concordia (magnétisme, rayons cosmiques et aurores polaires). Ces traitements et analyses conduiront au développement de nouveaux modèles physiques permettant de considérer la dynamique physique complexe proche du pôle magnétique sud. Ces modèles seront intégrés dans la plateforme ATMOS CORE, permettant de mener deux types de comparaisons : directement avec les spectres neutrons issus du programme CHINSTRAP depuis 2015, et avec les perturbations observées sur les imageurs CCD et CMOS depuis 2017 via le programme ASTEP+. Cette thèse vise très clairement à structurer les approches interdisciplinaires dans ces régions polaires [7] en tirant parti de la colocalisation des mesures des nouveaux programmes et des Services Nationaux d'Observation (SNO) du CNRS INSU.

Collaborations envisagées

- École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), Strasbourg
- Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), Université de Grenoble
- OCA, Université de Nice (données ASTEP+)
- National Institute of Polar Research (NIPR)
- Institut Polaire Paul-Emile Victor (IPEV)
- Labex FOCUS

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département :

Physique, instrumentation, environnement, espace

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact et co-directeur de thèse: Guillaume HUBERT

Tél. : 0562252885

Email : guillaume.hubert@onera.fr

Co-directrice de thèse

Nom : CHAMBODUT Aude

Laboratoire : EOST

Tél. :

Email : aude.chambodut@unistra.fr

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