

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Étude des couplages entre l'eau de surface, l'eau atmosphérique et les rayons cosmiques atmosphériques à échelle diurne et saisonnière**

Référence : **PHY-DPHY-2022-Numéro d'ordre**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse : 10/2022**

**Date limite de candidature :**

### Profil et compétences recherchées

Master et/ou diplôme d'ingénieur en physique et/ou géoscience

Cette thèse implique différents domaines scientifiques tels que la physique et la géoscience. Par ailleurs, elle intègre une approche expérimentale ainsi qu'une large partie de modélisation physique/simulation

### Sujet :

Étude des couplages entre l'eau de surface, l'eau atmosphérique et les rayons cosmiques atmosphériques à échelle diurne et saisonnière

### Contexte :

Lorsque les rayons cosmiques (CR) primaires, essentiellement composé de protons et de noyaux d'hélium, pénètrent dans les hautes couches de l'atmosphère, de multiples interactions se produisent avec les noyaux des molécules d'air. Il en résulte une multitude de particules secondaires (neutrons, protons, muons, isotopes cosmogéniques etc.) dont les propriétés et les quantités varient selon l'altitude et les coordonnées géomagnétiques. Ils sont par ailleurs influencés par certaines propriétés de la colonne atmosphérique ainsi que des conditions environnementales locales. Les principaux facteurs d'influence sont la pression atmosphérique, la vapeur d'eau et l'eau liquide de la colonne atmosphérique. Une autre composante concerne les neutrons dits albedos dont l'origine résulte de l'interaction de neutrons secondaires avec le sol. L'hydrogène contenu localement dans le sol, l'air ou la neige détermine cette composante albedo dont l'impact est de renforcer le spectre neutron dans le domaine 1 eV à 10 MeV. Ces différents facteurs influencent limitent l'analyse des spectres neutrons aux énergies supérieures à 20 MeV qui y sont peu sensibles. L'étude approfondie à l'ensemble du domaine meV – GeV des spectres neutroniques de l'atmosphère implique de considérer un système complexe sol - atmosphère.

L'ONERA DPHY a déployé un réseau de spectromètres à neutrons depuis 2011, qui permet de restituer le spectre énergétique des neutrons dans le domaine meV-GeV. Deux instruments sont actuellement opérationnels, le premier au Pic du Midi de Bigorre (Pyrénées, OMP) et le second dans la station Concordia (+3233 m), accumulant des données respectivement depuis 2011 et 2015. Les analyses des spectres ont jusqu'alors été limitées aux énergies neutrons supérieures à 20 MeV, énergies peu impactées par les conditions de la colonne atmosphérique et la composante albedo. Une première approche visant à intégrer l'impact de la vapeur d'eau a été menée à Concordia grâce à un radiomètre utilisant des informations spectrales dans les bandes micro-ondes pour dériver des données troposphériques de profils de température et d'humidité. Compte tenu du caractère très sec de l'environnement de Concordia, l'apport de cette correction n'est pas déterminant dans l'analyse des séries temporelles mais constitue un premier apport méthodologique qui peut être étendu aux autres sites d'observations.

Le Centre de Recherches Atmosphériques (CRA) de l'OMP rassemble des moyens d'observation dans le domaine de la physique de l'atmosphère. Outre la mesure des profils de vapeur d'eau de la colonne atmosphérique, l'humidité du sol est elle-même caractérisée, permettant une estimation assez précise de la composante albedo contribuant au spectre neutronique. L'installation d'un spectromètre neutron apparait donc comme une plateforme expérimentale complète permettant de déterminer les spectres neutroniques tout en monitorant les caractéristiques du sol et de l'atmosphère nécessaires à l'influence des facteurs d'influences. Les mesures neutrons viendront ainsi compléter la panoplie d'analyses existantes de la zone critique, de l'humidité des sols et des échanges sol-atmosphère déployées par l'OMP sur ce site pilote.

### Objectifs de la thèse :

L'objectif de ce projet est d'étudier comment la spectrométrie des neutrons cosmiques peut aider à mieux évaluer les réservoirs d'eau dans le sol et le contenu en eau de l'atmosphère. Entre ces deux réservoirs, il y a l'interface entre la surface et l'atmosphère qui est le lieu de nombreux échanges et notamment d'eau. La méthode de détection basée sur les neutrons cosmiques offre une opportunité de combler l'écart entre les mesures in situ à l'échelle locale (~1m) et les mesures satellitaires à l'échelle kilométrique. En effet, des

travaux préliminaires ont montré que son empreinte se situe à l'échelle de la dizaine d'hectares. Cela répond par conséquent à la nécessité de développer de nouvelles techniques pour estimer les états d'humidité du sol à petite et à grande échelle. Cette méthode nécessite également d'étudier l'effet de la structure verticale de la colonne d'eau atmosphérique sur les mesures de neutrons, pour en extraire la contribution du sol.

La première motivation de ce projet vise donc à développer un socle scientifique et technique permettant de baser la spectrométrie neutrons pour étudier les couplages entre l'eau de surface, l'eau atmosphérique et les rayons cosmiques atmosphériques à échelle diurne et saisonnière. La surveillance et l'étude du cycle hydrologique sont un prérequis pour comprendre et prévoir les conséquences pour le climat et pour l'agriculture. Étant donné que le stockage de l'eau dans le sol joue un rôle clé dans la répartition des flux d'eau entre l'atmosphère, la biosphère et la lithosphère, des techniques de mesure sont nécessaires pour estimer les états d'humidité du sol à petite et à grande échelle. La méthode de détection basée sur les neutrons cosmiques, proposée dans ce projet, offre une opportunité de combler l'écart entre les observations à l'échelle locale et à l'échelle des techniques de télédétection. La profondeur d'investigation de la méthode « neutron » ( $\approx 1\text{m}$ ) renforce également l'originalité de l'approche proposée. Cette méthode nécessite également d'étudier l'effet de la structure verticale de la colonne d'eau atmosphérique sur les mesures de neutrons, pour en extraire la contribution du sol.

L'étude de l'hydrométrie des sols et de l'atmosphère à partir des neutrons cosmiques, et en particulier en utilisant la spectrométrie neutrons, nécessite des activités de recherches hautement interdisciplinaires, en particulier pour comprendre et interpréter les différents mécanismes physiques et d'influences. Les techniques récentes qui ont été proposées se limitent à l'utilisation de détecteurs de neutrons ne restituant que l'information du flux de neutron. La spectrométrie neutron présente l'avantage de restituer l'information spectrale, c'est-à-dire l'énergie des neutrons (de la dizaine de meV à plusieurs centaines de GeV), ce qui constitue une information bien plus riche du point de vue des mécanismes physiques sous-jacents. Par ailleurs, le spectromètre neutron de l'ONERA a une résolution en temps qui permet de restituer les spectres sur des temps d'intégration de l'ordre de l'heure. Cette technique d'étude des rayons cosmiques atmosphériques offre par conséquent une sérieuse opportunité d'étudier les couplages entre l'eau de surface, l'eau atmosphérique et les rayons cosmiques atmosphériques, et ce à échelle diurne et saisonnière.

Pour atteindre cet objectif, deux axes complémentaires sont envisagés :

- Mise en place d'une plateforme expérimentale dans le but d'accumuler des séries temporelles sur les trois années de la thèse et au-delà. L'ensemble des instruments sont actuellement disponibles, d'une part le spectromètre neutron de l'ONERA DPHY pour la mesure des rayons cosmiques atmosphériques, et d'autre part les capteurs atmosphériques et sols du CRA et de l'IRAP. En complément, le département optique de l'ONERA (DOTA) dispose d'un radiomètre qui peut être déployé au CRA pour faciliter certaines analyses de données.
- Compréhension avancée des mécanismes physiques mis en jeu dans le système « Rayons Cosmiques-Atmosphère-Sol ». Ce socle scientifique sera basé sur les codes de transport nucléaires, maîtrisés à l'IRAP et à l'ONERA, et largement utilisés dans la modélisation de détecteurs de particules et/ou des douches de rayons cosmiques au niveau de l'atmosphère.

#### **Liens du sujet de thèse avec les activités de l'unité de recherche d'accueil :**

Ce sujet est principalement basé sur les compétences interdisciplinaires des deux unités d'accueil. L'ONERA est reconnu dans le domaine de l'étude des rayons cosmiques au niveau atmosphère, le LAERO dans la compréhension des mécanismes atmosphériques.

Le principal atout de cette collaboration réside dans le fait de réunir plusieurs instrumentations largement validées dans le cadre d'autres études, si bien que seules des adaptations instrumentales mineures seront nécessaires. Les informations permettant de décrire la dynamique de l'ensemble du profil de l'eau atmosphérique sont rarement disponibles, le CRA offre l'opportunité d'accéder à ces informations ainsi qu'à l'humidité dans les sols. Concernant les spectromètres neutrons (ONERA), il s'agit d'instruments innovants qui ont démontré leurs apports scientifiques dans l'étude des événements solaires. Par ailleurs des séries temporelles en cours depuis 2011 et 2015 au Pic du Midi (à  $\sim 30\text{ km}$  du site d'étude, et à 2300 m de différence d'altitude) et sur la base Concordia, sont un atout majeur dans l'analyse des données.

Ces travaux de thèse seront en lien avec les projets et infrastructures suivants :

- Projet polaire CHINSTRAP dans le cadre duquel est opéré un spectromètre à neutrons depuis décembre 2015.

- Projet interne ALMA visant à enregistrer des séries temporelles à proximité du corrélateur ALMA (Chili, +5050 m).
- Ces travaux bénéficieront des séries temporelles accumulées au Pic du Midi depuis 2011.
- CRADON (projet OMP – CEA, avec financement CEA, national) dont l’objectif est d’étudier de l’influence des facteurs environnementaux sur la spectrométrie gamma aéroportée et application à la surveillance environnementale de sites.
- Projet MOSAI (ANR 2020) – National : L’amélioration des interactions entre la surface et l’atmosphère (dont le flux d’évapotranspiration) dans les modèles numériques de prévision du temps et du climat, nécessite une bonne représentation du contenu en eau du sol. C’est par ce biais que le lien entre le projet MOSAI et le présent sujet de thèse se fera.
- Infrastructure de Recherche ACTRIS (Climat et Qualité de l’air) dont la P2OA est un site instrumenté au niveau National et Européen.

**Collaborations envisagées**

ONERA DOTA, Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) : IRAP, LAERO et CRA

**Laboratoire d’accueil à l’ONERA**

Département : DPHY

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

**Contact** : G. Hubert

Tél. : 0562252885

guillaume.hubert@onera.fr

Email :

**Directeur de thèse**

Nom : Hubert

Laboratoire : ONERA DPHY

Tél. : 0562252885

Email : guillaume.hubert@onera.fr

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