Doctorat de l'Université PSL
préparé à l'Observatoire de Paris

AVIS DE SOUTENANCE

Pauline TEYSSEYRE

Astronomie et astrophysique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Impact des éruptions solaires sur la région D de l'ionosphère : surveillance et modélisation

Soutenance prévue le **30 septembre 2026** à **14h00**

Lieu : Amphitéâtre Evry Schatzman
Observatoire de Paris, Bâtiment 18 5 places Jules Janssen 92195 Meudon France

Composition du jury proposé

Mme Carine BRIAND	Astronome	Observatoire de Paris	Directeur de these
M. Jean-Pierre RAULIN	Full professor	Mackenzie Presbyterian University	Rapporteur du jury
Mme Elvira ASTAFYEVA	Directeur de recherche	Institut de Physique du Globe de Paris	Rapporteur du jury
M. David THEMENS	Associate professor	University of Birmingham	Membre du jury
M. Vincent FABBRO	Ingénieur de recherche	ONERA	Membre du jury
Mme Angélique WOELFFLé	Coordinatrice pour la DGA	Direction Générale de l'Armement	Membre du jury
M. Edmund HENLEY	Physicien pour le Met Office	UK Met Office	Membre du jury
M. Vincent COUDé DU FORESTO	Astronome	LIRA - Observatoire de Paris/PSL	Membre du jury

Mots-clés : Ionosphère,Météorologie de l'espace,Chimie Ionosphérique,Traitement de données,

Keywords : Ionosphere,Space Weather,Ionospheric Chemistry,Data analysis,

Résumé :
Les éruptions solaires sont des évènements éruptifs, qui accélèrent les particules et qui émettent du rayonnement énergétique. Cette source additionnelle d'ionisation augmente la densité électronique de la couche la plus basse de l'ionosphère, la région D (60 - 90 km). Cela accroit l'absorption des ondes haute fréquence (HF, 3 - 30 MHz), une bande de fréquence utilisée pour les communications transhorizon. Ainsi, la surveillance de la région D est nécessaire, pour alerter en cas de perturbation et limiter les risques. Les satellites et les ballons ne sont pas adaptés pour cela, à cause de l'altitude de la région D. À la place, la propagation d'ondes très basse fréquence (VLF, 3 - 30 kHz) offre un aperçu en continu de la densité électronique de cette région. Les mesures VLF sont comparées aux résultats d'un modèle de propagation, tel le Longwave Mode Propagator. Si l'on suppose que la conductivité des sols est parfaitement connue, la densité électronique sur le chemin de propagation des ondes peut être reconstruite en minimisant l'écart entre les mesures VLF et les résultats du modèle pour diverses conditions ionosphériques. Toutefois, nous avons démontré l'importance cruciale d'une connaissance approfondie de la conductivité des sols,

tant en termes d'amplitude que de résolution spatiale, pour reconstruire avec précision les profils de densité électronique dans la région D. Ceci est particulièrement vrai dans les régions de faible conductivité, comme les hautes latitudes ou les chaines de montagnes. Le comportement de la région D peut aussi être modélisé avec divers schémas de chimie. Nous avons développé un code, le Lower Ionosphere — Absorption and Chemistry Modelling (LIR-ACheM) pour modéliser la région D. Puisque ce modèle inclut spécifiquement l'ionisation par les rayons X durs et mous, il est particulièrement adapté à l'étude de la réponse de la région D aux éruptions solaires. LIR-ACheM inclut sept espèces majeures dans la région D, au travers du schéma de Mitra-Rowe, offrant ainsi un compromis entre une représentation correcte de cette région et un coût numérique faible. Le forçage extérieur comprend les EUV et les rayons X. Ce modèle permet d'étudier l'influence de l'angle zénithal solaire, la latitude et longitude, et les variations saisonnières. Avec LIR-ACheM, nous avons montré que le délai du pic de densité électronique par rapport au pic du flux de rayons X, et son temps de récupération étaient contrôlés par les réactions de détachement à basse altitude et l'ionisation par les rayons X mous à haute altitude. Deux flares M1 similaires se produisant le même jour sont présentés dans une étude de cas. Ils ont un impact différent sur la région D. Nous montrons que ceci est dû aux variations d'angle zénithal solaire, et [NO] à plus haute altitude. Les ondes VLF sont aussi de bons détecteurs d'éruptions solaires en temps réel. Nous avons développé un nouvel outil, vlf4ions, depuis les données VLF mesurées à Nançay (Sologne, France), avec un récepteur AWESOME. Cet outil permet de détecter les éruptions solaires à partir des changements de pentes de la phase des ondes VLF, et d'estimer le flux de rayons X mous associé en combinant les informations provenant des mesures de phase de plusieurs transmetteurs. Il fonctionne indépendamment des données satellites. Des cartes représentant la densité électronique sur différents chemins de propagation orientés selon les directions nord-sud et est-ouest sont générées chaque minute, et des alertes peuvent être envoyées à divers utilisateurs, comme services de météorologie de l'espace. Ces travaux représentent une avancée vers un service d'alertes plus robuste en cas d'évènements de météorologie de l'espace.

Summary :

Solar flares are eruptive events, accelerating particles and especially emitting energetic radiation. When reaching Earth, this additional source of ionisation increases the electron density in the lower ionospheric layer, the D-region (60–90 km). This causes enhanced absorption of High Frequency (HF, 3–30 MHz) waves, a frequency band regularly used for trans-horizon communications. Thus, continuous monitoring of the D-region is required, to alert in case of perturbation and mitigate the risks. Satellites and ballons are not suitable for D-region monitoring due to its altitude range. Instead, Very Low Frequency (VLF, 3–30 kHz) waves propagating in the waveguide formed by the Earth and the ionosphere provide a continuous insight into the D-region's electron density. Usually, VLF measurements are compared to the results from a propagation model, such as the Longwave Mode Propagator. By assuming that the ground conductivity is perfectly known, the electron density over the propagation path can be reconstructed by minimising the difference between the measurements and the modelling for various ionospheric conditions. However, we first showed that precise knowledge of the ground conductivity, in terms of both magnitude and spatial resolution, was crucial to accurately reconstruct D-region electron density profiles from VLF waves. This is particularly the case for low ground conductivity regions, like high latitude countries and mountain ranges. The behaviour of the D-region is modelled by various chemistry schemes. We developed a new code, the Lower Ionospheric Region – Absorption and Chemistry Modelling (LIR-ACheM), to model the D-region. Since this model specifically includes ionisation by soft and hard X-rays, it is particularly suitable to describe the time evolution of the D-region during flares. LIR-ACheM considers seven main species in the D-region through the Mitra-Rowe scheme, offering a compromise between an accurate representation of the D-region and a low computation cost. The external forcing includes X-ray and EUV solar radiation. Through this model, the influence of the solar zenith angle, latitude and longitude, or seasonal variations may be investigated. From LIR-ACheM, we showed that the delay of the electron density peak compared to the flux peak, and its recovery time, are controlled by the detachment at low altitudes and the ionisation by soft X-rays at high altitudes. A case study is also presented of two similar M1 flares occurring on the same day, causing different D region's responses. We demonstrated that these differences were due to variations in the solar zenith angle and [NO] at high altitudes. VLF waves are also very powerful real-time flare detectors. We developed a new tool, vlf4ions, from VLF data measured with a VLF AWESOME receiver in Nançay (Sologne, France). This tool enables flare detection from the changes in VLF phase slope, and the estimation of their flux by combining information from the VLF waves from several transmitters. It works independently from satellite data. Maps representing the D-region electron density on several propagation paths oriented in the North-South and Est-West direction are generated each minute, and alerts can then be sent to specific users as space weather services. This work thus represents an additional step towards a more resilient alert system for space weather events.