

## Soutenance de thèse

**Nicolas NESME** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA PSI et intitulée «*Imagerie spectrale satellitaire pour l'observation des émissions anthropiques de gaz atmosphérique à haute résolution spatiale*»

**Le 19 janvier 2023 à 14h00, Auditorium ONERA Toulouse**

devant le jury composé de

M. François-Marie BRÉON	Directeur de recherche CEA/DRF/LSCE	Rapporteur
M. Sébastien PAYAN	Professeur Sorbonne Université	Rapporteur
M. Yannick DEVILLE	Professeur Université Toulouse III	Examineur
Mme Martine DE MAZIÈRE	Professeure Belgian Institute	Examinatrice
M. Pierre-Yves FOUCHER	Ingénieur de recherche ONERA	Directeur de thèse
M. Olivier LEZEAUX	Ingénieur scientifique expert SPASCIA	Co-encadrant de thèse

**Résumé :** Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, notamment du méthane, sont au cœur d'enjeux énergétiques, sociétaux et environnementaux. L'observation satellite de ces sources ponctuelles a longtemps été limitée par la résolution spatiale des sondeurs atmosphériques. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans un contexte satellitaire qui voit l'émergence d'imageurs satellitaires spectraux permettant de résoudre spatialement les points d'émissions. Ces imageurs hyperspectraux ont montré un réel potentiel notamment pour la cartographie de la concentration de panaches de méthane pour des observations aéroportées. En ce sens deux pistes principales d'analyses ont pu être proposées dans la littérature : (i) des méthodes rapides s'appuyant sur l'information spatiale mais qui impliquent une linéarisation de l'expression de la transmission, fonction de la concentration, et donc des biais éventuels de quantification, (ii) des méthodes non linéaires itératives, se basant sur des outils complets de transfert radiatif et coûteuses en temps de calcul pour des images contenant un grand nombre de pixels. Au cours de cette thèse, une méthode hybride nommée ISBR-OE (In-Scene Background Radiance – Optimal Estimation) a été élaborée. Elle a été développée pour s'affranchir des biais des méthodes linéaires par une méthode itérative mais en déterminant les composantes radiatives de la scène sans calculs radiatifs coûteux en temps. Elle offre de plus l'avantage de maîtriser les incertitudes a posteriori. Elle fournit en premier lieu des concentrations intégrées sur le chemin optique, utilisées ensuite pour estimer le débit de la source. Cette estimation repose sur la quantification de la masse sur une étendue spatiale donnée mais nécessite aussi une information sur la vitesse de déplacement associée à cette masse ou vitesse du vent effectif du panache. En ce sens, l'outil de traitement d'images hyperspectrales CELINE (Characterization of Effluent Leakages in INdustrial Environment) incluant ISBR-OE, a été développé. A partir d'une image en luminance (niveau 1), il permet de restituer une carte de concentrations (niveau 2) et le débit de la source (niveau 4). Cet outil a été appliqué et validé sur des données synthétiques, puis appliqué sur des données réelles aéroportées et satellitaires. Il s'agit en particulier de données aéroportées HySpex acquises lors d'une expérimentation terrain à débit contrôlé en méthane de l'ordre de 75 g/s. Des données aéroportées AVIRIS associées à différentes sources bien documentées en Californie ont également été utilisées. Cet outil a enfin été appliqué sur des données de l'imageur hyperspectral satellitaire PRISMA lancé en 2019 qui, avec une résolution spatiale décimétrique et une résolution spectrale de 10 nm, a ouvert la voie à un suivi régulier et à grande échelle des émissions de méthane. Nous nous sommes penchés plus particulièrement sur une

industrie au Turkménistan avec quatre points sources et avons proposé une analyse temporelle entre 2020 et 2021. Sur cette période, nous avons estimé des débits variant entre 350 et 4500 g/s en fonction des points sources et de la période d'acquisition. Nous avons posé les bases d'une analyse multi-temporelle. Elle se base sur l'utilisation conjointe de plusieurs images dans le processus d'inversion dans l'optique d'améliorer la sensibilité de la détection en réduisant l'incertitude sur la connaissance des réflectances de surfaces. Les premiers résultats montrent une amélioration des performances de détection mais le temps de revisite s'est avéré trop long pour améliorer la quantification (au mieux deux acquisitions par mois). L'arrivée récente de nouveaux imageurs satellitaires et les futurs projets de constellations devraient permettre de réduire le temps de revisite hyperspectral. Associés aux sondeurs dont la résolution spatiale tend à décroître, ces nouveaux produits ouvrent la voie au suivi des sources ponctuelles de méthane sur toute la surface du globe.

**Mots-clés :** télédétection, SWIR, atmosphère, haute résolution, émission de gaz

**Summary :** Today, the need to monitor greenhouse gas emissions is increasingly demanding and the main actors such as sectors related to mining exploration, environmental monitoring or crisis management (accidents) have significant needs for quantitative diagnostics of direct emissions. At the present time, current satellite atmospheric sounders are able to meet these needs. However, due to their low spatial resolution (> km), these diagnoses are used to establish global trends. They do not allow the study of most anthropogenic sources whose spatial extent is limited (typically in the order of 100 metres). There are in parallel with hyperspectral airborne imaging solutions (high spatial resolution). ONERA, among others, has been working on it for several years. These solutions have been experimentally validated for the detection, location and quantification of gas leaks and in particular methane. However, the transposition of the methods developed at the imaging satellite level must be explored. This is particularly true in a current spatial context where, in the short and medium term, various hyperspectral imaging instruments in the SWIR domain will be put into orbit (EnMap, Prisma,...) with decametric resolutions. The challenge of the proposed work is proposing a new methodology for restoring the properties of gas plumes and in particular methane, in order to monitor emissions from anthropogenic activity sites based on data from the next generation of hyperspectral imagers in the SWIR domain.

**Keywords:** remote sensing, SWIR, gas emission, high resolution, atmosphere