



## **Imagerie spectrale satellitaire pour l'observation des émissions anthropiques de gaz atmosphérique à haute résolution spatiale**

### **Satellite spectral imaging for the observation of anthropogenic atmospheric gas emissions at high spatial resolution**

Soutenance de thèse - Nesme Nicolas

**Jeudi 19/01/2023 à 14h00**

Auditorium ONERA - Toulouse

#### **Devant le jury composé de :**

François-Marie BREON  
Claude CAMY-PEYRET  
Martine DE MAZIERE  
Yannick DEVILLE  
Stéphanie DOZ  
Pierre-Yves FOUCHER  
Olivier LEZEAUX  
Sébastien PAYAN

CEA/DRF/LSCE  
IPSL  
BIRA-IASB  
IRAP  
ONERA  
ONERA  
SPASCIA  
LATMOS

Rapporteur  
Membre invité  
Examinatrice  
Examineur  
Membre invité  
Directeur de thèse  
Encadrant SPASCIA  
Rapporteur

#### **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. Cette approche 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, Emission de gaz, Haute résolution