

Titre : suivi des sources intenses d'émission de particules industrielles dans l'atmosphère par imagerie spectrale satellitaire

Encadrement :

- Rodolphe Marion ([rodolphe.marion@cea.fr](mailto:rodolphe.marion@cea.fr), CEA/DAM – Site de Bruyères-le-Châtel)
- Pierre-Yves Foucher ([pierre-yves.foucher@onera.fr](mailto:pierre-yves.foucher@onera.fr), ONERA – Site de Toulouse)
- Jean-François Léon ([jean-francois.leon@aero.obs-mip.fr](mailto:jean-francois.leon@aero.obs-mip.fr), Laboratoire d'Aérologie – Observatoire Midi-Pyrénées)

Sujet :

L'émission de particules fines, ou aérosols, dans l'atmosphère par les activités industrielles est un problème environnemental et sanitaire majeur en raison de la dégradation de la qualité de l'air qu'elles entraînent. La variabilité spatiale et temporelle de ces émissions de panaches industriels à l'échelle mondiale reste encore mal appréhendée en raison du manque d'observations globales. L'augmentation actuelle du nombre d'instruments imageurs hyperspectraux et multispectraux satellitaires (PRISMA, EnMap, future mission du CNES, Sentinel 2, etc.) ouvre des perspectives nouvelles pour le suivi des rejets industriels dans l'atmosphère sur une longue période temporelle afin de fournir des éléments quantitatifs en lien avec les besoins des cadastres d'émissions.

Plusieurs travaux menés en partie par l'ONERA, le Laboratoire d'Aérologie et le CEA/DAM ont permis de montrer la sensibilité de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine réflectif [0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ] pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques des particules émises par les sources industrielles par moyen aéroporté et par satellite. De plus, la forte disponibilité d'images multispectrales satellitaires à haute résolution spatiale pourrait, de manière complémentaire, permettre un suivi temporel fin de ces émissions. L'objectif des travaux de thèse proposés ici est de mettre en place une méthodologie de traitement en télédétection satellitaire à haute résolution spatiale (typiquement 10 à 100 m) permettant de fournir des bilans d'émission de particules de sources industrielles ainsi que leurs variabilités temporelles et incertitudes associées.

Ces travaux pourront se baser sur les approches récemment développées lors d'une précédente thèse (G. Calassou, 2022). Les verrous scientifiques identifiés portent sur :

- (i) L'optimisation du coût numérique des calculs de transfert radiatif. Les travaux sont basés sur la physique des interactions électromagnétiques dans le domaine réflectif [0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ] entre les photons solaires incident, l'atmosphère plus ou moins chargée en particules et la surface. Or, ces calculs radiatifs sont extrêmement coûteux en temps de calcul en raison notamment du couplage entre la diffusion par les particules du panache et par les aérosols de fond, limitant de ce fait l'intérêt opérationnel de la méthode. Aussi, des solutions d'apprentissage basées sur l'intelligence artificielle sont à envisager pour assurer le traitement d'une série conséquente d'images ;
- (ii) La représentation du fond de scène. Les approches actuelles qui visent à estimer les réflectances de surface sous le panache se basent sur l'utilisation d'une image multispectrale (Sentinel-2 par exemple) co-registree à l'image hyperspectrale. Cette technique est la principale source de bruit et de biais dans la restitution des propriétés physico-chimiques des panaches en particulier dans les zones urbaines et structurées. Une nouvelle approche tirant profit de l'ensemble de la série temporelle et de la haute résolution spatiale des images multispectrales est ainsi à envisager ;
- (iii) L'estimation réaliste du débit de particules à partir de la modélisation dynamique du panache. Le passage d'une carte en concentrations massiques d'aérosols au débit d'une source est fortement lié à la dynamique de transport du panache. A ce stade, les hypothèses simplificatrices considérées dans la

méthode constituent une source de biais non maîtrisée. Une meilleure prise en compte notamment des effets de turbulence lors de la diffusion du panache dans l'atmosphère est à envisager.

Plusieurs pistes sont envisagées pour initier les réflexions du doctorant. La première consiste, dans la continuité des travaux de G. Calassou portant sur des outils d'inversion sous contrainte, à introduire une dimension multi-temporelle exploitant le fort taux de revisite des satellites multispectraux (environ 5 jours pour Sentinel-2) couplé à plusieurs images hyperspectrales de la même zone (taux de revisite d'environ 15 jours). Cela permettra de contraindre les réflectances de surface et d'assurer une continuité temporelle dans les facteurs d'émission estimés. Une deuxième piste est l'introduction de modèles numériques de dynamique atmosphérique à même de reproduire des dispersions réalistes des panaches observés (turbulence). Des outils de simulation de type Large Eddy Simulations (LES) peuvent être utilisés pour caractériser statistiquement par des techniques d'intelligence artificielle les lois de passage entre carte de concentrations massiques et débit. Enfin, les produits actuels se limitent à certaines propriétés des particules comme la granulométrie fine et le taux d'absorption ; ils peuvent être étendus aux gouttelettes et à la vapeur d'eau pour permettre en particulier l'étude des panaches d'eau émis par les systèmes de refroidissement industriels.

Le doctorant pourra s'appuyer sur les outils développés à l'ONERA pour la modélisation radiative des aérosols, l'apprentissage et la restitution des propriétés optiques des aérosols par imagerie hyperspectrale. Il disposera aussi d'outils de simulations LES disponibles au CEA. Les données utilisées dans cette thèse seront principalement des données en libre accès PRISMA et Sentinel-2, l'utilisation de données EnMap est à envisager. Le calendrier initial proposé est le suivant :

- Sept. 2023 – Dec. 2024 : état de l'art. Prise en main des outils existants. Développements méthodologiques multi-temporel et multi-capteurs. Préparation des sites d'étude (recueil de données in situ et d'images satellitaires). Durant cette période, le doctorant sera basé dans les locaux de l'ONERA sur le site de Toulouse.
- Jan. 2025 – Sept. 2026 : introduction de modélisations numériques de dispersion dans la méthodologie d'inversion de flux de particules. Application des méthodes sur les différents sites d'étude et analyse des résultats en lien avec les connaissances actuelles sur les sources d'émission des sites étudiés. Durant cette période, des séjours sont à prévoir au CEA/DAM notamment pour l'accès aux outils LES et aux supercalculateurs nécessaires à ces simulations.

## Références

- Calassou, Gabriel, Pierre-Yves Foucher, and Jean-François Léon. "Industrial Plume Properties Retrieved by Optimal Estimation Using Combined Hyperspectral and Sentinel-2 Data". *Remote Sensing* 13, n° 10 (2021): 1865. <https://doi.org/10.3390/rs13101865>.
- Foucher, Pierre-Yves, Philippe Déliot, Laurent Poutier, Olivier Duclaux, Valentin Raffort, Yelva Roustan, Brice Temime-Roussel, Amandine Durand, and Henri Wortham. "Aerosol Plume Characterization From Multitemporal Hyperspectral Analysis". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12, n° 7 (2019): 2429-38. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2905052>.
- Philippets, Yannick, Pierre-Yves Foucher, Rodolphe Marion, and Xavier Briottet. "Anthropogenic aerosol emissions mapping and characterization by imaging spectroscopy – application to a metallurgical industry and a petrochemical complex". *International Journal of Remote Sensing* 40, n° 1 (2019): 364-406. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1513665>.
- Deschamps, Adrien, Rodolphe Marion, Xavier Briottet, and Pierre-Yves Foucher. "Simultaneous retrieval of CO<sub>2</sub> and aerosols in a plume from hyperspectral imagery: application to the characterization of forest fire smoke using AVIRIS data". *International Journal of Remote Sensing* 34, n° 19 (2013): 6837-64. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.809499>.