

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

### Intitulé : Modèles génératifs pour l'inversion de panaches d'aérosols industriels à partir d'images satellites multi- et hyperspectrales

Référence : PHY-DOTA-2026-28  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : Octobre 2026 à Janvier 2027  
selon le type de financement

**Date limite de candidature** : 01/06/2026

#### Mots clés :

Apprentissage statistique ; Problèmes inverses ; Télédétection ; Transfert radiatif ; Imagerie hyper-spectrale ; Aérosols.

#### Profil et compétences recherchées :

Diplômé.e d'un master dans l'une des disciplines suivantes : mathématiques appliquées, informatique, apprentissage statistique, traitement du signal, télédétection.

#### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

La caractérisation de panaches d'aérosols émis dans l'atmosphère par des sites industriels (e.g. sites sidérurgiques ou pétroliers) est un enjeu de santé publique et de contrôle des émissions de polluants. La télédétection par imagerie optique permet un suivi à large échelle et régulier dans le temps, en particulier depuis les récents lancements des satellites hyperspectraux PRISMA et ENMAP [1], et des satellites à venir tel que CHIME (ESA) ou BIODIVERSITY (CNES). Si ces outils sont principalement dédiés à l'étude des surfaces continentales, des récents travaux [1] ont permis de montrer que l'imagerie hyperspectrale satellitaire permet d'identifier et de caractériser les « hot-spots » de principaux émissaires de rejets de polluants atmosphériques en particulier concernant les particules. Néanmoins, la principale limitation des méthodes actuelles pour la caractérisation des panaches d'aérosols réside dans le fait que l'estimation conjointe des propriétés optiques du sol sous le panache et des caractéristiques du panache lui-même est un problème inverse sous-déterminé [1]. Pour contraindre le problème, une méthode développée à l'ONERA dans des travaux précédents estime la réflectance sous le panache à l'aide d'une image (ou d'une série temporelle) multi-spectrale sans panache, acquise à une date proche de la date d'acquisition de l'image hyperspectrale [1]. La méthode utilise la décomposition matricielle CNMF (Coupled Non-Negative Matrix Factorization), sous deux hypothèses fortes sur les propriétés optiques des sols : i) chaque pixel est une combinaison linéaire d'un ensemble de pixels caractéristiques issus de l'image hyperspectrale elle-même (on parle de pixels « end-members »), ii) les poids associées à ces « end-members » pixel à pixel peuvent être estimés à partir de l'image sans panache acquises dans un intervalle de temps proche pendant lequel la structure du sol est supposée stable.

L'objectif de la thèse est de dépasser les limitations actuelles induites par ces hypothèses simplificatrices qui ne sont en pratique pas toujours satisfaites sur la réflectance sous le panache. Il s'agit de développer une méthode permettant d'inverser conjointement les propriétés du panache et la réflectance de surface tout en s'affranchissant du besoin d'avoir une image « exogène » ou « sans panache ». A cette fin, le doctorant ou la doctorante étudiera l'apport de modèles génératifs statistiques (e.g. auto-encodeurs variationnels (VAE) [2]) pour contraindre le problème en fournissant un a priori sur la réflectance de la surface sous le panache. Des travaux préliminaires, effectués dans le cadre d'un stage de recherche en collaboration entre le CNES et l'ONERA, ont démontré le potentiel des auto-encodeurs variationnels pour la régularisation du problème inverse. En particulier, il a été montré que l'utilisation du VAE pour approximer la distribution de probabilité des spectres en réflectance permet :

- de mieux estimer la réflectance de surface en présence de panache quand la réflectance n'est pas une combinaison linéaire des « end-members » de l'image,
- de s'affranchir de l'utilisation d'une image sans panache acquise à une date proche de l'image hyperspectrale.

Le premier objectif de la thèse est de consolider et d'étendre les résultats du stage, qui servent de preuve de concept. En particulier, la doctorante ou le doctorant effectuera des expériences numériques de plus grande ampleur, à la fois sur des données simulées et sur des cas d'études réels, en étendant l'inversion à l'ensemble des paramètres du panache et non seulement à l'épaisseur optique des aérosols. Ces travaux s'appuieront sur des outils de transfert radiatif permettant de simuler l'impact des différentes propriétés d'un panache pour tout type de réflectance de sol développés à l'ONERA.

Le deuxième objectif de la thèse est de développer une méthode permettant d'associer des incertitudes au résultat de l'inversion. Dans des thèses précédentes effectuées à l'ONERA, la matrice de covariance des erreurs de reconstructions de la méthode CNMF est utilisée pour calculer l'incertitude liée à l'estimation de la

|   |  |
|---|--|
| <p>réflectance. Cependant ces incertitudes sont estimées sur les reconstructions hors panache et ne reflètent pas toujours les erreurs ou biais de reconstruction sous le panache. Ici, l'objectif est de tirer profit du caractère probabiliste des VAE. En particulier, on prendra inspiration des travaux de Biquard et al. [3] pour reformuler le problème d'inversion comme l'estimation de la distribution a posteriori des paramètres du panache et de la réflectance de surface, plutôt que comme un problème de maximum a posteriori, qui résulte en une estimation ponctuelle des paramètres.</p> <p>Le troisième objectif de la thèse est d'intégrer l'information fournie par des images multispectrales à des dates proches de la date d'acquisition de l'image hyperspectrale dans le but : i) de mieux conditionner les réflectances d'une image à l'instant t en se basant aussi sur les images les plus proches temporellement et ii) d'assurer un suivi temporel plus fin des émissaires industriels. A cette fin, la doctorante ou le doctorant étudiera comment approximer la distribution jointe des spectres en réflectance multi-spectraux et hyperspectraux.</p> <p><b>References :</b></p> <p>[1] Calassou, G., Foucher, P.-Y., and Léon, J.-F.: Quantifying particulate matter optical properties and flow rate in industrial stack plumes from the PRISMA hyperspectral imager, Atmos. Meas. Tech., 17, 57–71, <a href="https://doi.org/10.5194/amt-17-57-2024">https://doi.org/10.5194/amt-17-57-2024</a>, 2024.</p> <p>[2] Kingma, D. P., &amp; Welling, M. (2013). Auto-encoding variational bayes. In Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR), 2014.</p> <p>[3] Biquard, M., Chabert, M., Genin, F., Latry, C., &amp; Oberlin, T. (2025). Variational Bayes image restoration with compressive autoencoders. IEEE Transactions on Image Processing.</p> |  |
| <p><b>Collaborations envisagées :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pierre-Yves Foucher (ONERA)</li> <li>• Romain Thoreau (Agro-ParisTech)</li> </ul>  |  |
| <p><b>Laboratoire d'accueil à l'ONERA :</b></p> <p>Département : Optique et Techniques Associées</p> <p>Lieu (centre ONERA) : Toulouse</p> <p><b>Contact :</b> FOUCHER Pierre-Yves</p> <p>Tél. : 0562252619      Email : <a href="mailto:pierre-yves.foucher@onera.fr">pierre-yves.foucher@onera.fr</a></p>   | <p><b>Directeur de thèse :</b></p> <p>Nom : FOUCHER Pierre-Yves</p> <p>Laboratoire : DOTA-POS</p> <p>Tél. : 0562252619</p> <p>Email : <a href="mailto:pierre-yves.foucher@onera.fr">pierre-yves.foucher@onera.fr</a></p> |

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