



# ÉCOLE DOCTORALE

## SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ENVIRONNEMENT ET PHYSIQUE DE L'UNIVERS, PARIS

[ed560.stepup@u-paris.fr](mailto:ed560.stepup@u-paris.fr)

---

Titre du sujet : **Etude de l'impact des sources de variabilité sur la caractérisation minéralogique des sols par imagerie hyperspectrale**

Directeur : **JACQUEMOUD Stéphane (Pr)** [jacquemoud@ipgp.fr](mailto:jacquemoud@ipgp.fr)

Co-directeurs : **MARION Rodolphe (Dr)** [rodolphe.marion@cea.fr](mailto:rodolphe.marion@cea.fr)

**HONEINE Paul (Pr)** [paul.honeine@univ-rouen.fr](mailto:paul.honeine@univ-rouen.fr)

Equipe d'accueil : **IPGP – Equipe de Planétologie et sciences spatiales – UMR7154**

Financement : **Académie Spatiale d'Ile de France & CEA**

---

### Développement du sujet :

La détection et la quantification des minéraux terrestres sont un enjeu majeur dans divers domaines scientifiques et industriels. La composition minéralogique des sols est en effet une information essentielle pour comprendre les processus géologiques, évaluer les ressources naturelles et surveiller l'impact environnemental des activités humaines sur le milieu. Depuis plusieurs années, le CEA s'intéresse à la cartographie de la composition minéralogique de sous-produits et de résidus industriels, et aux erreurs induites par divers facteurs annexes [1, 2]. Obtenir des informations sur les activités de traitement des usines est un sujet d'intérêt stratégique dans un monde en pleine mutation. La télédétection hyperspectrale s'avère être un outil prometteur pour cartographier depuis l'espace la distribution spatiale de ces minéraux, en mesurant leurs signatures spectrales. Cette thèse a pour but de développer des méthodes avancées pour la détection et la quantification des minéraux à partir de données hyperspectrales, pour des applications industrielles et environnementales.

En télédétection hyperspectrale, les domaines spatial et spectral sont discrétisés de manière plus ou moins résolue selon le système d'acquisition utilisé. Le spectre de réflectance d'un sol est une combinaison des spectres de réflectance des matériaux constitutifs du sol, appelés « endmembers ». Ce phénomène appelé mélange spectral est influencé par différents facteurs qui peuvent être regroupés en trois catégories [3]. La première catégorie de facteurs, dite des paramètres intrinsèques, est liée à la composition et à la morphologie des sols. Un matériau pur présente une variabilité spectrale due à ses propriétés chimiques (oxydation, corrosion, hydratation), métamorphiques et morphologiques (granulométrie, porosité). A cela s'ajoute une deuxième catégorie de facteurs, appelée paramètres extrinsèques, qui correspond au phénomène de mélange spectral et à la quantité de matériaux présent dans le pixel. Dans cette catégorie, on retrouve des paramètres tels que la taille des particules de sols, la concentration ou encore l'épaisseur du matériau. La troisième catégorie correspond aux paramètres environnementaux (géométrie d'éclairage et de mesure, ombres, effets environnementaux). Ces sources de variabilité, qui sont plus ou moins corrélées entre elles, modifient la réponse spectrale des pixels, affectant de manière significative la performance des algorithmes d'extraction d'information [4].

Pour extraire des informations sur la minéralogie des surfaces à partir de données spectrales, deux approches principales sont utilisées : les modèles basés sur la physique et ceux basés sur les données. Les modèles basés sur la physique, tels que les modèles de transfert radiatif développés et utilisés par l'IPGP (modèle de Hapke, MARMIT, DART, RPV, etc.) fournissent une compréhension approfondie des interactions entre la lumière et la matière, permettant une simulation précise des processus de réflexion et d'absorption dans des milieux complexes [5-7]. Cependant, ils peuvent être limités par des hypothèses simplificatrices qui ne tiennent pas pleinement compte de la variabilité inhérente des environnements réels. Une autre approche consiste à tirer parti des vastes ensembles de données disponibles et de la capacité des algorithmes d'apprentissage automatique (PLSR, réseaux de neurones, etc.) à extraire des motifs et des relations à partir

de ces données. Cependant, ces méthodes peuvent manquer de transparence et de robustesse pour une validation permettant de garantir leur fiabilité dans des contextes variés et changeants.

Cette thèse a pour objectif de combiner les avantages des modèles physiques pour la simulation précise des processus radiatifs avec la souplesse et la capacité d'adaptation des techniques d'apprentissage automatique. Cette approche hybride vise à améliorer la précision et la fiabilité des estimations minéralogiques dans un contexte où l'impact des sources de variabilité intrinsèques et extrinsèques est significatif. Nous nous concentrerons spécifiquement sur la teneur en eau et la distribution de la taille des particules (texture), qui sont les deux sources de variabilité les plus impactantes pour l'étude des minéraux.

Des mesures radiométriques sont disponibles ou seront acquises à différentes échelles spatiales sur des sites industriels d'intérêt : en laboratoire et sur le terrain grâce au spectroradiomètre ASD, depuis un avion grâce aux caméras HySpex et APEX, depuis l'espace enfin grâce au capteur hyperspectral EnMap mis en orbite le 1er avril 2022. Des acquisitions satellite peuvent être programmées rapidement et gratuitement (<https://planning.enmap.org/>). Les sites d'intérêt sont situés à Gardanne dans le sud de la France (minerai de bauxite), à Thann dans l'est de la France (résidus de gypse), à Chevanceaux et à Cherves-Richemont dans l'ouest de la France (carrières de kaolinite et de gypse). L'analyse des spectres de réflectance mesurés à différentes échelles spatiales se fera grâce à des algorithmes classiques de démixage spectral, mais aussi grâce à des méthodes d'apprentissage automatique. Les mesures expérimentales seront complétées par des données simulées à l'aide des modèles de transfert radiatif, qui ont récemment atteint un degré de maturité suffisant pour le faire. (Maximum 2 pages)

#### Programme de travail

Etude bibliographique sur les modèles physiques simulant la réflectance d'un sol en fonction de leur teneur en eau et de la distribution de la taille des particules.

Amélioration des méthodes de démixage spectrale par couplage avec ces modèles physiques.

Application de méthodes d'intelligence artificielle pour cartographier les minéraux d'intérêt à différentes échelles spatiales.

Validation des approches sur les sites d'intérêt où la vérité terrain est disponible et analyse de l'impact des facteurs externes.

#### Conditions matérielles

Utilisation des outils de modélisation physique, des logiciels et des ressources informatiques (stations de travail, plateforme S-CAPAD) disponibles à l'IPGP. Accès aux bases de données de télédétection acquises par le CEA-DAM sur des sites industriels. Des projets de recherche seront déposés au Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) de l'INSU et à l'Appel à Propositions de Recherche (APR) du CNES afin de financer des campagnes de mesure sur le terrain, l'achat de matériel et la participation à des colloques ou réunions de travail. L'état d'avancement du travail de thèse sera évalué par un comité de suivi de thèse, en partie commun avec celui mis en place en première année.

#### Références

- [1] Marion & Carrère (2018), <https://doi.org/10.3390/rs10010146>
- [2] Brossard et al. (2016), <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1168946>
- [3] Theiler et al. (2019), <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2890997>
- [4] Borsoi et al. (2021), <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3071158>
- [5] Labarre et al. (2017), <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.02.030>
- [6] Bablet et al. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.031>
- [7] Dupiau et al. (2022), <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112951>