

Soutenance de thèse

Etienne DUCASSE soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA OLIMPES et intitulée «*Cartographie fine de l'argile minéralogique par démélange d'images hyperspectrales à très haute résolution spatiale*»

Le 3 avril 2019 à 14H00 à l'Auditorium ONERA-centre de Toulouse

devant le jury composé de

M. Xavier BRIOTTET	Directeur de Recherche ONERA	Directeur de thèse
M. Bas VAN WESEMAEL	Professeur Université Catholique de Louvain	Rapporteur
M. Sylvain DOUTE	Directeur de Recherche IPAG	Rapporteur
Mme Cécile GOMEZ	Chargée de Recherche LISAH	
M. Nicolas DOBIGEON	Professeur INP Toulouse	
M. Gilles GRANDJEAN	Ingénieur Bureau de Recherche Géologique et Minier (BRGM)	
Mme Karine ADELINÉ	Ingénieure ONERA	
Mme Emmanuelle VAUDOUR-DUPUIS	Maître de Conférences AgroParisTech	

Résumé :

L'étude des sols argileux fait l'objet de nombreux travaux motivés par leur rôle dans les processus d'érosion, les catastrophes naturelles et l'agriculture de précision. La caractérisation du contenu en argiles gonflantes du sol est aussi nécessaire pour évaluer la traficabilité d'une région ou le risque de retrait-gonflement des sols, responsable d'engendrer des dégâts sur le bâti. En effet, les argiles gonflantes sont des smectites qu'il faut différencier des autres types d'argiles telles que l'illite ou la kaolinite, en milieu tempéré. Les techniques traditionnelles pour réaliser la cartographie des minéraux argileux des sols sont en général coûteuses, financièrement et en temps et sont basées sur des campagnes terrain intensives simultanément à des acquisitions photographiques afin de spatialiser l'information qui reste qualitative. La télédétection hyperspectrale est une technique potentiellement intéressante pour obtenir des cartes d'argile plus précises et à moindre coût. Néanmoins, elle est limitée par le fait que (i) les minéraux sont mélangés de manière intime dans les sols avec d'autres composants; mais aussi que (ii) à l'échelle aéroportée, le signal réfléchi au sein d'un pixel (résolution spatiale de l'ordre du mètre) comprend de la végétation en plus du sol nu. Ces phénomènes de mélange, aux échelles microscopique et macroscopique, rendent difficile l'estimation du contenu en argiles minéralogiques. Le développement des drones ainsi que leur possibilité d'embarquer de nouvelles caméras hyperspectrales couvrant l'ensemble du spectre [0,4 - 2,5 μm] avec une haute résolution spatiale (environ 10 cm) et un signal à bruit élevé ouvrent la voie à un inventaire plus précis des argiles. L'objectif de cette thèse est de montrer l'intérêt de l'utilisation de méthodes de démélange sur des données hyperspectrales à très haute résolution spatiale pour estimer le contenu en minéraux argileux du sol, et plus précisément des argiles responsables du retrait-gonflement, les smectites. Dans un premier temps, les méthodes existantes de détection, de caractérisation des différents types d'argile et d'estimation de leur abondance sont présentées. Les potentialités des méthodes de démélange existantes dans la littérature pour l'estimation du contenu en minéraux argileux des sols sont mises en avant. Dans un second temps, les méthodes de démélange sont utilisées sur une base de données d'images hyperspectrale acquises en laboratoire de mélanges contrôlés minéraux contenant des argiles (montmorillonite, illite, kaolinite) et d'autres minéraux présents dans les sols (quartz, calcite). Comme les minéraux sont mélangés de manière intime, des méthodes de démélange, linéaires et non-linéaires sont décrites et comparées. Néanmoins, les algorithmes non-linéaires ont des performances

similaires aux algorithmes linéaires. De plus, l'effet de la variabilité des données sur la précision de l'estimation des abondances a pu être réduit en utilisant des prétraitements spectraux. Dans une dernière étape, la comparaison des méthodes de démixage sont étendues à des mesures en environnement extérieur. Cette analyse repose sur une campagne de mesure en extérieur réalisée pour la mesure d'images hyperspectrales acquises depuis une nacelle (12 m de hauteur environ, 1,5 cm de résolution spatiale), et l'acquisition d'échantillons prélevés et analysés par DRX (données quantitatives des abondances des minéraux) pour validation. Cette dernière phase permet d'analyser l'impact d'un sol naturel (composé d'un mélange minéralogique, des matières carbonées telles que la cellulose, et ayant une rugosité de surface...) sur les méthodes de démixage. Les performances obtenues (moins de 15% RMSE sur l'estimation de la montmorillonite) permettent d'ouvrir des perspectives quant à l'application de ces méthodes sur des capteurs embarqués par drone, pour la cartographie de la traficabilité et de l'aléa de retrait-gonflement des sols.

Mots-clés : argile, télédétection hyperspectrale, minéralogie, spectroradiométrie, pédologie

Summary:

Clayey soils are studied because of the importance of soils in erosion processes, natural disasters and precision agriculture. Mapping of clay mineralogy is essential for surveying and predicting trafficability and ground instability hazards, such as shrink-swelling, in order to cope with damages caused by expansive soils on infrastructures. Clay minerals in temperate zone soils are mainly divided in smectites, which highly contribute to soil swelling, illite and kaolinite. Geotechnical engineering practice for clayey soils mapping are expensive and time-consuming. Indeed, it is based on field and extensive laboratory studies. In addition, spatial distribution of clay is assessed using aerial photographs and low-scale geological maps. Thereby, small heterogeneities in geological features are rarely detected, and spatial information remains qualitative. Hyperspectral remote sensing could be an alternative to conventional methods for clay mapping. However, this method is limited by two facts: (i) soils are an intimate mixture of minerals, and (ii) vegetation is mixed with bare soil within airborne sensors pixels (meter range of spatial resolution). Those mixtures (at microscopic and macroscopic scales) mask clays specific spectral signatures and limit clay mineral quantification. Recent development in UAV offers new possibilities for carrying hyperspectral cameras in the reflective domain [0.4 – 2.5 μm], and obtaining data with higher SNR and resolution (10 cm). These advances open new perspectives for accurate and less expensive clay maps. This PhD thesis aims to present the potentiality of clay mapping in soils using very-high spatial resolution hyperspectral data, and more specifically, to estimate swelling clay minerals (smectite) abundances. First, existing methods of detection, and abundance estimation of clay minerals are presented. Second, unmixing methods are used on a database of hyperspectral images of controlled mixtures with different abundances of clay minerals, (illite, montmorillonite and kaolinite) and other minerals existing in soils (quartz, calcite). Due to the intimate nature of mixtures, linear and non-linear unmixing methods are described and compared. However, linear and nonlinear algorithms exhibit similar performances. Moreover, the accuracy of estimation of abundances of mineral clay increased using spectral preprocessings. Regarding the third step, field measurements are used to assess clay unmixing methods. This study is based on an outdoor experiment which acquired hyperspectral images from a bucket truck (12 m elevation, 1.5 cm ground sampling distance), and a sampling collection analyzed by XRD (quantitative analysis of mineral abundances) for validation. This step analyzed effects of a natural soil, (with organic matter, a larger diversity of mineralogical components and with surface roughness) on unmixing methods tested with laboratory data. Obtained performances (less than 15% RMSE for montmorillonite estimation) allow perspectives to apply these methods on data obtained with UAV sensors, for trafficability or expansive soils mapping purposes.

Keywords: clay, hyperspectral remote sensing, mineralogy, spectroradiometry, pedology