9ème colloque scientifique du groupe hyperspectral de la SFPT

SFPT-GH 2024, Rennes, 30-31 Mai 2024

Résumés complets

https://sfpt-gh2024.sciencesconf.org/

Table des matières

DEVELOPING THE IEEE P4001 STANDARD FOR CHARACTERISATION AND CALIBRATION OF HYPERSPECTRAL IMAGING DEVICES, John Gilchrist 4

Hyperspectral Imaging for art heritage applications, John Gilchrist 5

ESA's FLEX Data Innovation and Science Cluster (DISC), Jorge Vicent Servera [et al.] 6

High-spatial resolution imaging spectroscopy: past achievements and future CNES roadmap, Camille Desjardins [et al.] 7

Avancées technologiques dans la télédétection et les applications environnementales avec spectroradiomètres de terrain UV-Vis-NIR, Nicolas Venjean 8

The CHIME Observation Performance Simulator (OPSI) Software System: development and status at Test Readiness Review., Nicolas Lamquin [et al.] 9

A VNIR spectral database of Mars analog rocks to guide future analyses of hyperspectral data, Marie Barthez [et al.] 11

Comment estimer les propriétés de surface de manière robuste pour un cube hyperspectral complet ?, François Andrieu [et al.] 13

Correction atmospherique des donnes hyperspectral avec MAGAC toolbox, Jorge Vicent Servera 14

Optimisation exacte, parcimonie et contraintes avancées pour l'analyse multi-solutions de données hyperspectrales de Mars, Nils Foix-Colonier [et al.] 15

Tests statistiques pour la classification non supervisée d'acquisitions hyperspectrales codées, Trung-Tin Dinh [et al.] 17

Apport de la fusion multi/hyperspectrale en comparaison au pan-sharpening hyperspectral pour les zones hétérogènes, Sacha Neiger [et al.] 18

Methane plumes detection on hyperspectral images with a variant of Generalized Likelihood Ratio Tests, Elyes Ouerghi [et al.] 20

Suivi photogrammétrique d'essais d'érosion destructifs sur digue à l'échelle 1, Pierre Carreaud [et al.] 21

Comparison of atmospheric radiative transfer model simulations with the ALG toolbox, Jorge Vicent Servera 23

Projet SentHyMED : bases de données multi-échelles et simulation de paysages de chênaies méditerranéennes par modélisation directe du transfert radiatif pour des images multi- et hysperspectrales, Karine Adeline [et al.] 25

Prise en compte de l'architecture du couvert végétal à différents stades de développement pour le suivi des cultures par télédétection hyperspectrale : cas d'étude du maïs, Romain Démoulin [et al.] 27

Prédiction des propriétés spectrales du sol forestier à partir de capteurs LiDAR et RSO dans les forêts tempérées et boréales, Audrey Mercier [et al.] 30

Caractérisation des arbres par données LiDAR et hyperspectrales de la forêt boréale, Florent Guiotte [et al.] 32

Caractérisation d'un gradient de succession en forêt tropicale par imagerie hyperspectrale : retours sur la campagne Khao Yai 2024, Jean-Baptiste Feret [et al.] 35

Acquisition de données hyper-spectrales de haute résolution sur très petits échantillons de végétation, Nicolas Venjean [et al.] 37

Caractériser la connectivité hydrologique et le stress hydrique de la végétation des cours d'eau : apport de l'imagerie hyperspectrale., Julien Godfroy [et al.] 38

Cartographie de la montmorillonite par démélange d'images hyperspectrales à l'échelle centimétrique : cas de champs agricoles labourés, Karine Adeline [et al.] 40

The Hyper-Cam Nano a next generation LWIR hyperspectral imaging system, Stephane Boubanga Tombet [et al.] 42

Toulouse Hyperspectral Data Set: a benchmark data set to assess semi-supervised spectral representation learning and pixel-wise classification techniques, Romain Thoreau [et al.] 43

Toward a Femtosecond Laser Written Photonic Integrated Circuit for Hyperspectral Imaging, Sébastien Bourdel [et al.] 45

Caméra hyperspectrale "snapshot" avec interféromètre biréfringent, Matthieu Porte 46

Trajectoire environnementale à travers le prisme croisé de la Géoarchéologie et de l'imagerie : l'exemple des processus d'érosion au sein du bassin versant de la Commerce, (Seine-Maritime)., Manon Charpenay [et al.] 47

Evaluer l'impact de l'environnement sur la santé humaine : l'enjeu du traitement des données de spectrométrie de masse haute-résolution, Jade Chaker [et al.] . . . 49

The Asal-Ghoubbet rift in Republic of Djibouti: a playground for comparative planetary remote sensing., Sylvain Douté [et al.] 52

Potogrammétrie subaquatique en rivière pour l'étude et la compréhension des habitats, Guillaume Forget [et al.] 53

PRISMA and EnMAP radiometric calibration/validation studies at CNES, Camille Desjardins [et al.] 54

Cartographie multi-échelle de l'état de vergers par acquisitions drone multimodales, Nathan Sikora [et al.] 55

EDAPHOS - Utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation et le suivi de sols contaminés phytostabilisés en Europe, Solofoniaina Andriamihajason [et al.] 57

Mapping soil organic carbon content by combining time series of Sentinel-2 and Sentinel-1 with vis-NIR laboratory spectra – Application to study site in Brittany (France), Youssef Fouad [et al.] 59

Projet BioEOS – Estimation et suivi de la biodiversité côtière à large échelle à partir de l'imagerie multi et hyperspectrale, Touria Bajjouk [et al.] 60

Déploiement à large échelle d'imageurs spectraux miniatures de terrain pour le suivi du couvert végétal et des rivières dans TERRA FORMA, Silvère Gousset [et al.] 62

L'imagerie hyperspectrale pour comprendre le passé : application en sédimentologie et en archéologie pariétale, Kévin Jacq [et al.] 65

Détection et caractérisation de la pollution par les plastiques sur la surface continentale, Florian Cavernes [et al.] 67

Apport de la dimension temporelle pour la reconstruction de fonds d'images hyperspectrales en présence de panaches d'aérosols, Armand Veau [et al.] 69

Liste des auteurs **71**

DEVELOPING THE IEEE P4001 STANDARD FOR CHARACTERISATION AND CALIBRATION OF HYPERSPECTRAL IMAGING DEVICES

John Gilchrist * [1]

[1] Clyde Hyperspectral Imanaging Technology Ltd – Royaume-Uni

Hyperspectral imaging has over the last thirty years developed into a power analytical tool for the determination of chemical and other properties. As a result, there has been strong development in both the design of spectral cameras and in the applications for which they are used. This has led to a diversity in the way fundamental instrument performances are characterized, reported, and understood. As a result, this makes it difficult to compare instruments for application- specific needs, or for commercial market needs.

In 2018, the IEEE P4001 group was formed to facilitate the development of a standard to unify the use of terminology, spectral camera characterization methods, and the meta-data structures that are needed to represent spectral camera performance. This talk provides an update on the work to date, and the significant progress made towards the first draft of the standard which wil be published later this year.

Index Terms- hyperspectral, imaging spectroscopy, spectral imaging, pushbroom, spectral scanning, spatio- scanning, snapshot, IEEE, P4001, terminology, data structures, characterization

*Intervenant

Hyperspectral Imaging for art heritage applications

John Gilchrist * [1]

[1] Clyde Hyperspectral Imanaging Technology Ltd – Royaume-Uni

One of the key applications that has emerged in hyperspectral inmaing is its use in art heritage applications and how such merurements can eb related back to the materials and context of the wortk by the artist. In this paper we present the methodologies for scanning large areas at high resolution in both macro and micro-spatial domains along with examples demonstrating the capabilities of hyperspectral mapping across a range of practical examples from Tudor Tapestries to reading "unreadable" documents.

*Intervenant

ESA's FLEX Data Innovation and Science Cluster (DISC)

Jorge Vicent Servera * [1], Roberto Colombo , Gwennael Matot , Lucie Tixier , Beatrice Berthelot , Théo Paccoud *

, Neus Sabater , Pekka Kolmonen , Sergio Cogliati , Matthias Drusch , Marin Tudoroiu

[1] Magellium – Univesidad de Valencia – France

FLEX (FLuorescence EXplorer) is ESA's 8th Earth Explorer mission. The mission aims to provide an insight of the photosynthetic activity of vegetation by characterising its full energy balance (i.e., incoming radiation, reflected light, surface temperature, and fluorescence). Flying in tandem with Sentinel-3, FLEX will provide advanced biophysical products to understand photosynthetic activity with potential applications into stress detection and food productivity. In the last 4 years, several activities have been carried out spanning the development of FLEX core Level-1B (L1B) and Level-2 (L2) mission products, their validation with simulated data generated by an end-to-end mission performance simulator (E2ES), FLEX-related field campaigns, and processing of in-situ data. We recently started the activities for the implementation of FLEX Ground Segment within the so-called Data Innovation and Science Cluster (DISC), a team of scientists and technical experts in various domains related to the FLEX mission that will ensure efficient mission operations to provide the best data quality and will involve potential users of the FLEX data through outreach activities. The activities to be carried out by the FLEX DISC will encompass the following: (1) consolidating the prototype of L2 processor and industrialising it into an Instrument Processing Facility (IPF), (2) developing a collaborative platform that allows to bring FLEX users and algorithms to data, (3) developing tools to monitor the quality of the FLEX data products (Level-0 to L2), (4) design and implement a calibration/validation during commissioning phase and regular operation, (5) monitoring the FLEX data quality and maintaining calibration/validation, and (6) implementing evolutions of the processing algorithms to ensure state-of-the-art data products. The goal of this presentation is twofold: (1) giving an overview of ESA's FLEX mission and products; and (2) describing the DISC project from its objectives to the consortium and on-going activities & results.

*Intervenant

High-spatial resolution imaging spectroscopy: past achievements and future CNES roadmap

Camille Desjardins * [1], Antoine Flipo [1], Damien Rodat [1], Laurie Pistre [1], Laure Oudda [1], Thierry Carlier [1]

[1] CNES – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France

For the last fifteen years, the French Space Agency (CNES) has been actively involved in various studies on hyperspectral spatial missions, driven by the national scientific and defense communities. Through this presentation, the ongoing efforts to push further the imaging spectroscopy technologies will be shared with the national scientific community. The roadmap for future developments in the field will be outlined.
The hyperspectral mission, presented at the last SFPT-GH conference, was stopped at the end of 2023 due to the reallocation of the defense budget to other priorities. Despite this, CNES expresses its desire to continue working in the hyperspectral domain, proposing a roadmap to support ongoing national New Space hyperspectral missions, to extend and secure innovative hyperspectral technologies, and to assess the end-to-end performances of a filter-based instrument concept.

This roadmap targets a high-performance hyperspectral instrument with a ground sampling distance below 10 m over a 10 km swath, as required by the scientific community. Stress will be put on the critical components preparation, with selection and maturation of miniaturized components: SWIR detectors, filters, cryocoolers, and dedicated electronics. This effort will be structured around the design of innovative instrument breadboards, accurately characterized and able to acquire real data so that downstream processing techniques can be developed.
These studies are led to mitigate technical risks and validate the overall system performance with airborne acquisitions. Going from individual components up to data acquisitions enables a complete evaluation of the end-to-end performances and an accurate design of the processing techniques... contributing to get high resolution spectroscopy imagery closer to in-orbit deployment.

*Intervenant

Avancées technologiques dans la télédétection et les applications environnementales avec spectroradiomètres de terrain UV-Vis-NIR

Nicolas Venjean * [1]

[1] Spectral Evolution – États-Unis

L'obtention de données hyperspectrales de qualité sur les campagnes de terrain peut être difficile en raison des conditions environnementales fluctuantes, de l'accessibilité géographique des zones cibles et de la complexité de configuration et d'optimisation des instruments. Grâce aux avancées technologiques des détecteurs InGaAs et aux améliorations de la conception d'instruments, il est désormais possible d'obtenir des données hyperspectrales UV-Vis-NIR de très haute résolution avec des spectroradiomètres portables de terrain. Cette présentation mettra en évidence les innovations de conception et les fonctionnalités des spectroradiomètres NaturaSpec et du logiciel de contrôle. Des exemples illustrant l'amélioration de la qualité, de la fiabilité et de la répétabilité des données de terrain, seront fournis.

*Intervenant

The CHIME Observation Performance Simulator (OPSI) Software System: development and status at Test Readiness Review.

Nicolas Lamquin * [1], Benjamin Finociety *

[1], Romain Sumérot [1], Sinh Khoa Nguyen [1], Clarissa Hamann [2], Johanna Dall'amico [2], Richard Wachter [2], Johannes Schmidt [2], Dimitri Lebedeff [3], Vincent Soulignac [3], Hugo Monchatre [3], Antonio Gabriele [4], Adrian Leonardo Garcia [4], Ignacio Fernández Núñez [4]

[1] ACRI-ST – ACRI-ST – France
[2] OHB System AG – Allemagne
[3] Thales Alenia Space – Thales (France) – France
[4] ESA - ESTEC (Netherlands) – Pays-Bas

The Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (CHIME) is one of the High-Priority Candidate Missions (HPCM) endorsed by ESA for the expansion of the Copernicus Sentinel missions. CHIME will provide routine hyperspectral sampling of Earth surface reflectance over the solar spectral range (400-2500 nm) at a 30 m spatial resolution with a revisit of 22(11) days with one (two) satellite(s). CHIME observations will support EU- and related policies for the management of natural resources and assets providing a major contribution in the domains of raw materials and sustainable agricultural management with a focus on soil properties, sustainable raw materials development and agricultural services, including food security and biodiversity.
Currently under phase C the development of the CHIME mission is performed by a consortium led by Thalès Alenia Space in France (as prime contractor) and OHB System AG in Germany (for the instrument). The Observation Performance Simulator (OPSI), is a software tool being developed by ACRI-ST under the management of the above partners as ATBD providers, to support the development and verification of the space segment as well as the development of the ground segment.

The OPSI is devoted to simulate the instrument acquisition and its different acquisition modes (along with the platform behaviour), to prototype the corroborating ground segment processors which calibrate the payload measurements to TOA radiance (at L1b) and orthorectified TOA reflectance (at L1c) and to assess the instrument performance by comparing true and estimated parameters generated at different stages. In order to accomplish the above objectives OPSI is composed of an Instrument Performance Simulator (IPS), a Ground Processor Prototype (GPP) and a Performance Assessment Module (PAM).
This presentation is dedicated to the status of the OPSI Software System at its Test Readiness Review, at which it offers to the leading consortium and to ESA a software tool able to simulate the radiometric and geometrical aspects as well as to emulate onboard compression and to

*Intervenant

provide mission performance figures to be expected from the instrument design.

A VNIR spectral database of Mars analog rocks to guide future analyses of hyperspectral data

Marie Barthez * [1], Jessica Flahaut [1], Raphaël Pik [1]

[1] Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques – Institut National des Sciences de l'Univers, Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Rock compositions at the surface of Mars are mostly studied with reflectance spectroscopy in the visible near-infrared range (VNIR: 0.4 – 3.0 μm). Spectral imagers like CRISM onboard satellites orbiting the planet acquire VNIR hyperspectral cubes with typical spatial resolutions on the order of tens of meters (e.g., *Murchie et al, 2007*). Analyzing the characteristics of VNIR reflectance spectra (e.g., the position and shape of absorption bands) enables the determination of the mineralogical composition of rocks present on the surface of Mars. To achieve this, Mars remote sensing data are usually compared to reference spectral libraries acquired in laboratory (e.g., USGS spectral library in *Kokaly et al., 2017*; https://crustal.usgs.gov/speclab/). This approach has led to many discoveries regarding the red planet's geological history; for instance, the detection of both hydrated clays and sulfates was interpreted as evidence for a past, warm and wet climate (e.g., *Bibring et al., 2006; Carter et al., 2013*).

In this study, 67 terrestrial magmatic rocks were characterized in the laboratory. Our collection comprises rocks of various nature: volcanic rocks such as basalts and dacites, as well as plutonic rocks including anorthosites and granites. A detailed protocol was established to combine the petrography and geochemistry of the rocks with spectral data (*Barthez et al., 2023*). Initially, the mineralogy and texture of the rocks were determined using optical microscopy. Subsequently, the chemistry of specific minerals was determined using an electron microprobe (plagioclase feldspars especially). Finally, the rocks were characterized spectrally using two instruments: a point-spectrometer, the *ASD Fieldspec 4*, and two hyperspectral cameras, the *HySpex VNIR-300N* and *SWIR-640,* which the CRPG laboratory is equipped with. These instruments operate in the visible near-infrared range: between 0.35 μm and 2.50 μm for the *ASD Fieldspec 4* (at 3 nm/channel for the VNIR detector, and 8 nm/channel for the SWIR1 and SWIR2 detectors), between 0.40 μm and 1.00 μm for the *HySpex VNIR-3000N* (at 2 nm/channel), and between 0.96 μm and 2.50 μm for the *HySpex SWIR-640* (at 4.38 nm/channel). While the point-spectrometer enabled the acquisition of an average VNIR reflectance spectrum of each rock (**Figure 1**), the hyperspectral cameras allowed the acquisition of individual reflectance spectra for all the different grains composing the rocks (with a spatial resolution of 15 μm with the *HySpex VNIR-3000N* and 32 μm with the *HySpex SWIR-640;* **Figure 2**). Using the *ENVI* image processing software, the hyperspectral cubes acquired with the hyperspectral cameras were then processed and analyzed to obtain the VNIR spectral signature (between 0.40 μm and 2.50 μm) of each mineral composing the rocks (**Figure 3**) and analyzed their contribution to the whole rock spectrum.

The numerous VNIR spectra acquired in this study were then compiled into a reference spectral library named *Mirabelle*, available in open access on SSHADE (https://doi.org/10.26302/SSHADE/MIRABELLE This reference spectral library is unique as it is, contrary to most existing libraries (e.g., USGS

*Intervenant

spectral library in *Kokaly et al., 2017*; and RELAB https://sites.brown.edu/relab/) acquired on whole rocks instead of powders of single minerals. The selected range of terrestrial magmatic rocks is broad and can be used for relevant comparison with Martian hyperspectral data acquired from orbit by the CRISM instrument. The diversity of freely available data should contribute to further understanding the mineralogical composition of Martian rocks, as well as their origin and formation mechanisms (*Barthez et al., 2024, in prep.*). The use of hyperspectral cameras coupled with petrologic analyses demonstrated its high potential for identifying rock compositions remotely, and for future spectral unmixing studies.

Acknowledgements: The authors acknowledge the support of the French Agence Nationale de la Recherche (ANR), under Grant ANR-21-CE49-0003 (MARS-Spec).

Comment estimer les propriétés de surface de manière robuste pour un cube hyperspectral complet ?

François Andrieu * [1], Frederic Schmidt , Guillaume Cruz Mermy

[1] Géosciences Paris Saclay – Institut National des Sciences de l'Univers, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8148, Université Paris-Saclay : UMR8148, Institut National des Sciences de l'Univers : UMR8148 – France

Ce travail se place dans le cadre de l'étude de la surface glacée d'Europe, satellite de Jupiter. Sa surface, une des plus jeune du système solaire, est le théâtre de nombreux processus actifs, avec une potentielle exposition de matériel provenant de l'océan global sous la croûte gelée (1). Pour comprendre ces processus, il est nécessaire de bien caractériser la composition chimique de la surface, ainsi que ses propriétés microphysiques (taille de grains, abondance, texture).
La première étape est de déterminer quels composés chimiques sont présents ou non en surface. Une première étude sur un spectre de référence de l'ensemble des combinaisons possibles de 3, 4, et 5 composés nous a d'abord permis de montrer que sur 15 composés chimiques proposées par de précédentes études, au moins 4 sont nécessaires pour reproduire correctement les données : la glace d'eau, l'acide sulfurique octahydrate (SAO), ainsi que deux autres composés tel que des sulfates hydratés ou des sels de chlore qu'il n'est pas possible de distinguer formellement (2).

L'objectif de ce travail est de passer d'un spectre isolé à la totalité d'un cube hyperspectral. Nous avons testé deux méthodes distinctes d'inversions de données (3) : une méthode de descente de gradient (4) et une méthode bayésienne Monte Carlo (5, 6). Nous avons montré que les méthodes classiques de descente de gradient ne permettaient pas d'aboutir à la bonne solution, même en initialisant sur une solution approchée (3). En effet les fortes non-linéarités du transfert radiatif et le nombre important de combinaisons de paramètres permettent de reproduire les données de manière satisfaisante rendent les résultats de l'optimisation quasi-aléatoire (3). En revanche, méthodes bayésiennes MCMC permettent de résoudre ce problème au détriment d'un coût de calcul très important.

L'inversion bayésienne sur l'ensemble d'un cube hyperspectral qui semble s'imposer pose néanmoins un certain nombre de défis : (1) le temps de calcul (2) le stockage des résultats (3) l'exploration et la visualisation des résultats. Nous discuterons des choix possibles pour traiter ces problèmes.
Références : (1) Pappalardo, R. et al. (1999) JGR. (2) Cruz Mermy, G. et al. (2022) Icarus (3) Andrieu, F et al. (2022) EPSC (4) Zhu, C. et al. (1997) ACM Trans. Math. Softw. (5) Cubillos, P. et al. (2016), The Astr. Jour. (6) Braak, C. J. F. T. (2006), Stat & Comp.

*Intervenant

Correction atmospherique des donnes hyperspectral avec MAGAC toolbox

Jorge Vicent Servera * [1]

[1] Magellium – Univesidad de Valencia – France

La correction atmosphérique est l'un des principaux algorithmes lors du traitement des données optiques des satellites. Sa tâche principale est la conversion du signal de radiance au sommet de l'atmosphère (TOA) mesuré par un instrument satellite en réflectance de surface. Après compensation des effets atmosphériques, les données de réflectance de surface dérivées peuvent être utilisées pour récupérer des propriétés géophysiques pour des applications telles que la surveillance de la végétation ou la qualité de l'eau. Au cours des dernières années, des algorithmes atmosphériques basés sur une estimation optimale ont été proposés, avec le potentiel d'obtenir des résultats très précis et une propagation de l'incertitude basée sur la mise en œuvre de principes physiques à travers la chaîne de traitement des données. Dans ce contexte, nous présentons MAGAC (Magellium Atmospheric Correction), une boîte à outils pour traiter les données satellitaires hyperspectrales des missions PRISMA et EnMAP. MAGAC est divisé en deux modules principaux : (1) caractérisation atmosphérique (vapeur d'eau et aérosols) et (2) récupération de la réflectance de surface. La caractérisation de la vapeur d'eau est basée sur l'utilisation des caractéristiques d'absorption de H2O grâce à des techniques d'absorption différentielle. Les aérosols sont récupérés avec un algorithme d'estimation optimale utilisant des informations a priori (provenant de bases de données climatologiques et spectrales) et des émulateurs efficaces de modèles de transfert radiatif atmosphérique (MODTRAN). La récupération de la réflectance de surface inclut la compensation des effets de contiguïté. Dans cette présentation, nous donnerons un aperçu des algorithmes implémentés dans MAGAC et des résultats de validation dans le cadre de l'activité ESA/NASA ACIX-III Land.

*Intervenant

Optimisation exacte, parcimonie et contraintes avancées pour l'analyse multi-solutions de données hyperspectrales de Mars

Nils Foix-Colonier * [1], Sebastien Bourguignon [1], Frederic Schmidt [2]

[1] École Centrale de Nantes – Nantes Université, LS2N UMR6004 – France
[2] Université Paris-Saclay – GEOPS UMR8148 – France

Le démélange spectral sous contrainte de parcimonie consiste à estimer, pour un spectre de réflectance donné, un jeu d'abondances dans un dictionnaire de spectres de référence, en imposant explicitement un nombre de composantes non-nulles. C'est un problème NP-difficile. Il existe cependant des approches qui offrent la possibilité de résoudre exactement ce problème, et ce en un temps convenable. Cela demeure certes plus coûteux par rapport à une résolution approchée ou sans contrainte de parcimonie, mais au regard des puissances de calculs actuellement disponibles et de l'intérêt porté par l'obtention des solutions exactes – notamment dans un contexte de télédétection – il peut être judicieux de s'orienter vers des solutions dont la qualité est la meilleure.

La thèse intitulée "Optimisation exacte, parcimonie et contraintes avancées pour l'analyse multi-solutions de données hyperspectrales de Mars" propose d'étudier la résolution exacte d'un problème (inverse) de démélange spectral sous contrainte de parcimonie, en exploitant au mieux sa structure et ses contraintes, afin de proposer un algorithme sur-mesure permettant sa résolution exacte. Cela est permis par un jeu de reformulations mathématiques du problème, suivi d'une implémentation d'un algorithme de Branch-and-Bound, qui permet de parcourir l'espace de recherche sans pour autant résoudre un à un l'ensemble des problèmes formulés. En effet, un tel algorithme repose sur la création récursive de sous-problèmes, ou nœuds, n'impliquant qu'une partie des variables, et pour lesquels on est en mesure d'évaluer des bornes inférieures et supérieures de la fonction objectif correspondante (erreur quadratique moyenne entre la mesure et le mélange linéaire par exemple).

Ainsi, on peut éviter l'évaluation de sous-problèmes pour lesquels la borne inférieure est plus grande que la plus petite borne supérieure trouvée jusqu'alors : ils ne sont donc pas optimaux.

On dit alors qu'on élague l'arbre de recherche, ce qui diminue la taille de l'espace de recherche, et permet en général d'éviter l'explosion combinatoire inhérente à la résolution exacte de problèmes sous contrainte de parcimonie.

Dans un deuxième temps, un aspect multi-solution sera proposé, afin de conserver l'ensemble des solutions exactes parcimonieuses qui seraient compatibles avec un niveau de bruit donné. Cette information pourra ensuite être combinée avec celle des pixels voisins au travers d'une régularisation spatiale, ce qui permettra – lorsque cela sera appliqué à des données hyperspectrales de Mars – d'effectuer de la détection et de la classification de spectres, afin de produire des cartes d'abondances minéralogiques.

*Intervenant

L'originalité principale de ce sujet, et l'intérêt pour l'application, est de proposer, via de tels algorithmes, une approche multi-solutions, afin de renvoyer l'ensemble exhaustif des solutions parcimonieuses qui sont compatibles avec un niveau de bruit ou une erreur acceptables sur le modèle. Cette information, produite en chaque pixel d'une image hyperspectrale, pourra ensuite être combinée avec celle des pixels voisins au travers d'une régularisation spatiale, ce qui permettra – en application à des données hyperspectrales de Mars – d'effectuer la détection de spectres minéralogiques en tout point et, par une étape de classification, de produire des cartes d'abondances minéralogiques.

Tests statistiques pour la classification non supervisée d'acquisitions hyperspectrales codées

Trung-Tin Dinh * [1,2], Hervé Carfantan [3], Antoine Monmayrant [4], Simon Lacroix [5]

[1] Institut de recherche en astrophysique et planétologie – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Institut National des Sciences de l'Univers, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique – 9 avenue Colonel Roche 31028 Toulouse, France
[2] Équipe Photonique – Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes – 7 Avenue Colonel Roche 31400 Toulouse, France
[3] Institut de recherche en astrophysique et planétologie – Institut National des Sciences de l'Univers : UMR5277, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5277, Institut National des Sciences de l'Univers, Centre National de la Recherche Scientifique – France
[4] Équipe Photonique – Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes – France
[5] Équipe Robotique et InteractionS – Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes – France

(Voir fichiers en pièces jointes)
Participation : présentation orale + poster Les techniques conventionnelles d'imagerie hyperspectrale requièrent un nombre élevé d'acquisitions et nécessitent un balayage spatial ou spectral pour remplir le cube (x, y, λ) de données de l'image hyperspectrale. Dans notre projet, un imageur à masques codés pilotables de type DD-CASSI est utilisé pour analyser la scène hyperspectrale avec typiquement dix fois moins d'acquisitions. Dans cette contribution, nous allons exposer une approche prometteuse pour la classification non supervisée de données hyperspectrales codées sans passer par la reconstruction du cube, en exploitant une hypothèse de séparabilité et des tests statistiques. Nous allons montrer que malgré la disponibilité d'un dixième de l'information, un nombre inconnu de matériaux et l'absence des spectres de référence, nous parvenons à détecter avec succès la plupart des régions homogènes de la scène observée, tout en rejetant efficacement les régions de mélange.

*Intervenant

Apport de la fusion multi/hyperspectrale en comparaison au pan-sharpening hyperspectral pour les zones hétérogènes

Sacha Neiger * , Sophie Fabre [1], Thomas Colin [2], Xavier Briottet [1]

[1] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – ONERA, PRES Université de Toulouse – France
[2] Airbus [France] – Airbus Defense and Space – France

La télédétection optique désigne l'ensemble des méthodes d'analyse et d'observation à distance d'un objet, grâce à ses propriétés d'émission et de réflexion. Elle est utilisée dans des domaines variés tels que le suivi des cultures, la caractérisation des forêts, mais aussi de milieux maritimes et urbains. Ces observations exploitent trois types d'information : la géométrie (c'est-à-dire la forme et la structure des objets de la scène étudiée), le spectre (afin d'étudier les matériaux et leurs états) et la date (afin de comparer et de mettre en valeur une évolution). Ces grandeurs sont complémentaires mais, à ce jour, il n'existe pas d'instrument permettant d'acquérir des images combinant une haute résolution spatiale (de la dizaine de centimètres à quelques mètres) et une haute résolution spectrale (une dizaine de nm) sur un large domaine spectral (0.4 - 2.4 μm).
Fusionner une image panchromatique (PAN) de haute résolution spatiale avec une image hyperspectrale (HS) ou multispectrale (MS) de haute résolution spectrale (mais de résolution spatiale plus faible), grâce au pansharpening, permet de lever partiellement cette barrière.

Une des limitations principales de ces méthodes porte sur la mauvaise restitution des transitions (entre matériaux ou zones éclairées/ombrées) tout particulièrement dans les milieux urbains qui se caractérisent par de très fortes hétérogénéités spatiale et spectrale. La méthode CONDOR fut développée lors de la thèse de Y. Constans en 2022 avec une étape de démélange spectral (1). Cette étape permet de correctement reconstruire une scène dont les pixels HS sont dits "mixtes", c'est-à-dire dont la signature spectrale n'est pas celle d'un unique matériau, en comparaison à une méthode de référence comme Gain (2). La méthode CONDOR a permis d'améliorer les performances de la fusion mais reste limitée en particulier sur les zones de transition (1). Une autre méthode explorée est NNDiffuse, qui est inspirée de la formule de diffusion anisotrope et montre de bons résultats pour des scènes urbaines si l'image PAN est fortement contrastée (3).

Une piste pour améliorer la qualité de l'image fusionnée est de combiner une image multispectrale avec une image hyperspectrale. En effet, l'utilisation de plusieurs bandes spectrales de Haute Résolution spatiale (HR) va permettre une fusion plus fine sur les domaines que chacune recouvre. Pour les domaines non recouverts par les bandes MS, nous pouvons aussi nous attendre à de meilleures performances grâce à la combinaison de bandes plus précises et proches spectralement (utiliser une bande NIR pour le domaine SWIR plutôt que l'image PAN qui correspond généralement au domaine visible ou VNIR).

L'objectif de cette présentation est d'analyser l'amélioration de la qualité des images fusionnées lorsque l'on passe de fusions PAN+HS à MS+HS. Pour cela, la méthode Gain (2) est utilisée et

*Intervenant

modifiée afin d'intégrer en entrée des bandes multispectrales en remplacement de la bande PAN (appelée Gain-MS). Trois méthodes différentes d'intégration sont proposées :

Sur le domaine visible, nous construisons autant de matrices Gain que de bande MS. Nous construisons les domaines d'application de ces matrices en étendant les domaines de chaque bande MS, ce qui implique un choix d'une bande ou une autre là où l'on trouve des superpositions ou des trous entre deux bandes MS (Gain-MS classique).

Une autre possibilité est de calculer le facteur gain comme une somme pondérée des matrices Gain mentionnées précédemment. La pondération suit une interpolation sur les domaines couverts par plusieurs bandes MS ou entre deux bandes (Gain-MS interpolation).

Pour le domaine SWIR nous testons l'utilisation de différentes bandes MS pour calculer le coefficient de Gain.

Nous travaillons sur des images de HR-HS acquises avec l'instrument aéroporté HySpex Odin avec une Résolution Spatiale (RS) 0.5m sur trois zones : Canjuers, Toulon et Gardanne en France (4). En suivant le protocole de Wald et avec les domaines du système Pléiades, nous synthétisons à partir des images HR-HS, une image de Faible Résolution spatiale (LR) HS, une image HR-MS ainsi qu'une image HR-PAN. Plusieurs métriques sont utilisées pour comparer les résultats des fusions : critères spectraux (SAM), spatiaux (CC) et globaux (RMSE, ERGAS, NRMSE, ENM, UIQI) (1).

Les trois méthodes Gain-MS proposées sont comparées aux trois méthodes de référence PAN+MS. Les résultats obtenus montrent des améliorations significatives dans les domaines visibles et proche infrarouge en particulier aux zones de transitions où l'on note jusqu'à un facteur 2 d'amélioration pour des critères tels que RMSE. Pour la méthode Gain MS, l'étude du choix de la bande MS pour appliquer la méthode Gain dans le domaine SWIR montre que la bande verte (0.51 - 0.59 μm) permet de mieux visualiser certains éléments en particulier les routes par rapport à l'utilisation d'une bande NIR (0.775-0,915 μm), comme on peut le remarquer sur la figure 3.

Références

(1) Constans, Yohann. 'Fusion de données hyperspectrales et panchromatiques dans le domaine réflectif'. Université de Toulouse, 2022.

(2) Vivone, Gemine, Luciano Alparone, Jocelyn Chanussot, Mauro Dalla Mura, Andrea Garzelli, Giorgio A. Licciardi, Rocco Restaino, and Lucien Wald. 'A Critical Comparison Among Pansharpening Algorithms'. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53, no. 5 (May 2015): 2565–86. https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734.

(3) Sun, Weihua, Bin Chen, and David Messinger. 'Nearest-Neighbor Diffusion-Based Pan-Sharpening Algorithm for Spectral Images'. *Optical Engineering* 53, no. 1 (January 2014): 013107. https://doi.org/10.1117/1.OE.53.1.013107.

(4) Søren Blaaberg, Trond Løke, Ivar Baarstad, Andrei Fridman et Pesal Koirala. " HySpex ODIN-1024 : a new high-resolution airborne HSI system ". In : *Infrared Technology and Applications XL*. T. 9070. International Society for Optics et Photonics. 2014, p. 90700L (cf. p. 30, 152).

Methane plumes detection on hyperspectral images with a variant of Generalized Likelihood Ratio Tests

Elyes Ouerghi * [1], Thibaud Ehret [1], Gabriele Facciolo [1], Enric Meinhardt [1], Carlo De Franchis [2], Jean-Michel Morel [3]

[1] CB - Centre Borelli - UMR 9010 – Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay – France
[2] Kayrros – Kayrros – France
[3] City University of Hong Kong – Chine

Reducing methane emissions is essential to tackle climate change. In a time lapse of 20 years, a methane (CH4) molecule has a global warming potential 80 times larger than carbon dioxide (CO2). Here, we address the problem of detecting automatically point source methane leaks using high resolution hyperspectral images from the PRISMA satellite. Several methods for the detection of point source methane emissions on PRISMA already exist. A very popular approach for this task is the matched filter (MF) technique. Here we propose an improvement of the matched filter by using a variation of generalized likelihood ratio tests (GLRT). We introduce this new method under the name: Model Adjusted GLRT (MA-GLRT). Our method improves GLRT methods by adding an adjustment coefficient. The adjustment coefficient aims at reducing the number of false positives compared to what can be observed with the matched filter or the standard GLRT. To validate the method, we evaluate our approach on manually-annotated plumes detected in PRISMA satellite images. We also compare our results to the matched filter. The results show that based on a comparison of the F1 score our method outperforms the GLRT and the matched filter.

*Intervenant

Suivi photogrammétrique d'essais d'érosion destructifs sur digue à l'échelle 1

Pierre Carreaud * [1], Hanna Haddad [2], Christophe Picault [2], Hendrik Stoter [2], Dominique Reith [3]

[1] SITES SAS – SITES SAS – France
[2] Compagnie Nationale du Rhône – Compagnie Nationale du Rhône (CNR) – France
[3] SITES SAS – SITES SAS – France

Les digues font partie des éléments clés de l'aménagement des fleuves, pouvant remplir aussi bien des fonctions de sécurité (protection contre les crues) que de canalisation de l'eau. La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) surveille et entretient environ 400 km de digues artificielles le long du Rhône. En raison des dimensions de ces ouvrages linéaires, leur surveillance relève d'un défi particulier, et il est donc nécessaire d'en comprendre au mieux possible le comportement, notamment vis à vis de leurs conditions limites.
Le projet européen OVERCOME (OVERflowing erosion of COarse Material Embankment), cofinancé par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), vise à mieux comprendre les phénomènes de ruptures de digues liée à une érosion par surverse. Dans ce cadre, des essais sont réalisés à différentes échelles, afin d'identifier les paramètres principaux qui pilotent les processus d'érosion et de mieux calibrer des modèles numériques prédictifs.

Un dispositif d'acquisition photogrammétrique a été installé sur un portique au-dessus d'une portion de digue construite à l'échelle 1 (8 m de long d'amont en aval, 4 m et large et de pente 2/1) dans le hall d'essai du CACOH de la CNR (Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques). Durant les essais d'érosion, 6 caméras Reflex synchronisées réalisent une acquisition toutes les 5 secondes. Les caméras sont placées de manière à avoir le recouvrement maximal entre les deux caméras à l'aval, les deux à l'amont et les deux au-dessus du sommet de digue. Un système de filtres polarisants installés sur la source de lumière (flashs de studio) ainsi que sur les objectifs des caméras permet de réduire drastiquement les reflets liés à l'éclairage et au parement sur lequel ruisselle l'eau via une polarisation croisée. Les images sont transférées et nommées automatiquement à chaque déclenchement.

D'autres capteurs équipent la digue comme des capteurs de débit, de niveau d'eau, de vélocité ou des palpeurs de niveau de points particuliers.

Le traitement des données à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie permet le relevé 3D de la digue sous la forme d'un nuage de point dense, d'un maillage de triangle, et surtout d'un modèle numérique de terrain (MNT). La synchronisation des images, les paramètres de prise de vue liés à l'éclairage flash figeant la scène, les filtres anti-reflets, ainsi qu'un traitement semi-automatique permettent de connaitre finement la forme de la digue à tout instant du test, y compris dans les zones humides et ruisselantes. Des opérations manuelles sont indispensables afin d'éliminer les nombreux équipements installés sur la digue, comme les palpeurs, câbles et supports.
Trois essais ont été conduits entre l'été 2023 et début 2024, menant chacun à des vitesses et

*Intervenant

des processus d'érosion distincts. Parmi les exports disponibles, les orthophotographies et les modèles numériques de terrain sont les plus utiles à l'analyse de l'essai. A chaque déclenchement, la comparaison du MNT à l'état initial et à l'état n-1 donne de précieuses informations quant au comportement structurel de la digue lors de sa phase de rupture. Une attention particulière a été apportée sur la colorimétrie des représentations, ombres et représentation des pentes. Les bibliothèques libres GDAL ont un grand intérêt pour ces représentations et le traitement par lot.

Comparison of atmospheric radiative transfer model simulations with the ALG toolbox

Jorge Vicent Servera * [1]

[1] Magellium – Univesidad de Valencia – France

Atmospheric radiative transfer models (RTMs) are physically-based computer models that numerically describe the absorption, emission, and scattering processesof the electromagnetic radiation as it passes through the Earth atmosphere. These models help scientists in understanding the radiation processes occurring in the Earth's atmosphere and are widely used in Earth observation scientific and technological applications, such as (i) satellite mission design, (ii) atmospheric chemistry, (iii) meteorology and climatology, (iv) atmospheric correction, and (v) atmospheric physics . Over time and through continuous improvements, these models have increased in realism from simple semiparametric equations towards advanced RTMs that allow for explicit 3D representations of complex interactions in the atmosphere.

Given the wide use of atmospheric RTMs in remote sensing, their comparison is one of the main tasks used in order to determine their performance and to identify the characteristics that differ between models. The process of comparing various atmospheric RTMs can be a tedious task that requires good knowledge of the model inputs/outputs and the generation of large databases of consistent simulations. Indeed, the evolution of RTMs towards more advanced models has resulted in an increase in complexity and interpretability of these models, which bears implications for practical implementation of intercomparison studies. To overcome this limitation, graphical user interfaces (GUIs) have been developed to facilitate RTM use and execution. A few examples of these GUIs can be found for 6SV, MODTRAN, or libRadtran. These well-documented tools allow complete access to all functionalities and configuration parameters of the models they were designed for, including user support and continuous updates. However, each of these GUIs are customized for their specific RTM; and none can be used to define and run simulations for multiple RTMs in a consistent manner. In addition, they are not designed to easily precompute large databases, which are important due to the high computational burden of performing statistical analysis or running these models in a pixel-per-pixel basis. Altogether, these GUIs are not fully offering practical solutions for the implementation of atmospheric RTMs in Earth observation applications and, in particular, for model intercomparison. Users of atmospheric RTMs are therefore obliged to develop their own specific scripts to create datasets, which are typically (1) limited to a handful input variables and (2) hardly extensible to other RTMs.

In an attempt to facilitate the consistent simulation of databases for a wide range of atmospheric RTMs, we developed the *Atmospheric Look-up table Generator* (ALG). ALG is a MATLAB-compiled software package that allows generating look-up tables (LUTs) based on a suite of atmospheric RTMs. Namely, a LUT consists of a collection of input atmospheric conditions and corresponding generated RTM spectral outputs. ALG provides consistent and intuitive user interaction for defining model configuration and running and storing RTM data for any spectral configuration in the optical domain. The main objectives of this presentation is to (1) describe the ALG tool from a functional and software design perspective to give an overview of the implemented features and generated LUT data; and (2) perform a comparison study between the

*Intervenant

models implemented in ALG: MODTRAN (v5 and v6), 6SV v2.1, libRadtran v2.0.3, ARTDECO, and SBDART.

Projet SentHyMED : bases de données multi-échelles et simulation de paysages de chênaies méditerranéennes par modélisation directe du transfert radiatif pour des images multi- et hysperspectrales

Karine Adeline * [1], Marianne Debue [1,2], Xavier Briottet [1], Jean-Baptiste Feret [3], Florian De Boissieu [3], Samuel Alleaume [3], Josselin Giffard-Carlet [3], Jean-Marc Limousin [4], Jean-Marc Ourcival [4], Florent Mouillot [4], Jean Kempf [4], Damien Longepierre [4], Grégoire Vincent [5], Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry [2]

[1] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – PRES Université de Toulouse – France
[2] Centre d'études spatiales de la biosphère – Université Toulouse III - Paul Sabatier – France
[3] Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France
[4] Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive – Centre National de la Recherche Scientifique – France
[5] Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des Végétations – Institut de Recherche pour le Développement – France

La caractérisation de l'état des forêts méditerranéennes représente un enjeu crucial pour la prévention du risque incendie, et l'évaluation de l'impact de l'accroissement des sécheresses et des changements d'affectation des sols. La télédétection optique permet l'accès à un certain nombre de variables biophysiques et biochimiques de la végétation (ou des variables essentielles de biodiversité) qui permettent d'avoir une meilleure connaissance de la structure et du fonctionnement de ces forêts. Cependant, la précision d'estimation de ces variables dépend fortement de l'échelle d'observation (relative à la résolution spatiale des images), de la richesse spectrale des capteurs de télédétection (nombre de bandes spectrales, échantillonnage et résolution spectrale) et du temps de revisite (important pour le suivi et la prédiction de ces variables).
Un des objectifs du projet SentHyMED est d'évaluer la complémentarité de données multi- et hyperspectrales pour la cartographie de ces traits bio-physico-chimiques à des fins de détermination du stress hydrique de ces forêts. La présentation portera sur la description des jeux de données collectés et les premiers travaux de modélisation directe à partir de ces données, tels qu'explicités ci-dessous.

Huit campagnes ont été réalisées d'avril à octobre 2021, et en juin 2023, sur les deux forêts de Puéchabon et Pic Saint Loup, au nord de Montpellier (1). Les deux espèces de chênes étudiés sont *Quercus Pubescens* (à feuilles caduques) et *Quercus Ilex* (à feuilles persistantes). Sur treize parcelles d'étude, les données collectées sont : inventaires forestiers de la canopée et du sous-couvert, indice de densité de végétation (PAI), mesures spectrales multi-variées (feuille, tronc, herbe, roche, etc.), humidité du sol, mesures leaf-clip SPAD et DUALEX, contenu en eau et matière sèche foliaire et autres traits par inversion des modèles PROSPECT (pigments, contenu azoté, etc.) (2,3). Ces collections de données ont été concomitantes avec des acquisitions

*Intervenant

Sentinel-2, et pour une date avec des acquisitions drone LiDAR et des aéroportées hyperspectrales Aviris-Next Generation à 1 m et 3 m. Des images PRISMA et DESIS sont également disponibles.

Ensuite, une étape préalable à l'estimation des variables de végétation avec des méthodes hybrides (physique & IA) consiste à évaluer l'adéquation de l'emploi du modèle de transfert radiatif DART (4) pour simuler des images de télédétection réalistes pour ces paysages de forêts méditerranéennes. La paramétrisation géométrique des scènes se base sur la reconstruction de maquettes 3D à partir des données LiDAR avec l'aide de la library lidR (traitement nuages de points), du code AMAPVox (voxelisation) (5) et l'usage de DART (transformation surfacique). La paramétrisation optique a été étudiée pour être optimisée pour la modélisation de la scène en évaluant l'impact de la réflectance du sous-couvert, l'impact de la contribution des éléments ligneux et la modélisation abstraite des propriétés optiques foliaires dans la réflectance totale de la canopée. Les simulations se sont faites avec le code pytools4dart (6). La comparaison entre les images simulées et celles mesurées (incluant des images simulées Biodiversity à 10 m à partir des images aéroportées à 1 m) montre les influences de la fraction de canopée, de la variabilité de la composition en espèces au sein des parcelles forestières, et de l'importance de considérer les éléments ligneux dans la modélisation de la scène (7).

(1) K. Adeline, J.B. Féret, H. Clenet, J.M. Limousin, J.M. Ourcival, F. Mouillot, S. Alleaume, A. Jolivot, X. Briottet, L. Bidel, E. Aria, ATM. Defossez, T. Gaubert, J. Giffard-Carlet, J. Kempf, D. Longepierre, F. Lopez, T. Miraglio, J. Vigouroux, M. Debue, Multi-scale datasets for monitoring Mediterranean oak forests from optical remote sensing during the SENTHYMED/MEDOAK experiment in the north of Montpellier (France), Data in Brief, Volume 53, 2024, https://doi.org/10.1016/j.dib.20

(2) J.B. Féret, A .A . Gitelson, S.D. Noble, S. Jacquemoud, PROSPECT-D: towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle, Remote Sens. Environ. 193 (2017), doi: 10.1016/j.rse.2017.03.004

(3) J.-B. Féret, K. Berger, F. De Boissieu, Z. Malenovský, PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents, ArXiv200311961 Q-Bio. (2020).

(4) Gastellu-Etchegorry, J. P., E. Grau, et N. Lauret. 2012. " DART: A 3D Model for Remote Sensing Images and Radiative Budget of Earth Surfaces ". in Modeling and Simulation in Engineering, édité par C. Alexandru. InTech.

(5) Vincent, Gregoire, François Pimont, et Philippe Verley. 2021. " Various PAD/LAD estimators implemented in AMAPVox 1.8 ".

(6) de Boissieu, Florian, Eric Chraibi, Claudia Lavalley, et Jean-Baptiste Féret. 2019. " pytools4dart: Python API to DART Radiative Transfer Simulator ".
(7) M. Debue, G. Vincent, S. Alleaume, F. de Boissieu, X. Briottet, J.-B. Féret, J.-P. Gastellu-Etchegorry, J.-M. Limousin, D. Longepierre, K. Adeline, "Adequacy of Mediterranean forest simulations from DART radiative transfer model and UAV laser scanning data to hyperspectral images," Proc. SPIE 12727, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXV, 127270U (17 October 2023); https://doi.org/10.1117/12.2678531

Prise en compte de l'architecture du couvert végétal à différents stades de développement pour le suivi des cultures par télédétection hyperspectrale : cas d'étude du maïs

Romain Démoulin * [1,2,3], Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry [1], Sidonie Lefebvre [4,5], Xavier Briottet [3], Karine Adeline [3], Zhijun Zhen [1], Matthieu Marionneau , Valerie Le Dantec [1]

[1] CESBIO – Université Toulouse III - Paul Sabatier – France
[2] Université Toulouse III - Paul Sabatier – Université de Toulouse – France
[3] ONERA / DOTA – PRES Université de Toulouse – France
[4] ONERA / DOTA – Université Paris-Saclay, Université Paris-Saclay – France
[5] ONERA / LMA2S – Université Paris-Saclay, Université Paris-Saclay – France

Contexte

Dans la filière céréalière, les agriculteurs décident individuellement quand récolter, si bien que les industriels de l'agroalimentaire doivent prévoir des scénarios de collecte, sans connaître précisément le calendrier de la récolte ainsi que la quantité et qualité du grain. Cette capacité d'anticipation s'avère de plus en plus difficile du fait de sources croissantes d'incertitudes, d'ordre climatique ou endogène à ce secteur d'activité (concurrence internationale, etc.). Un suivi spatial et temporel plus fin permettrait de mieux contrôler la maturité des cultures à l'échelle de la parcelle. La télédétection satellitaire a un fort potentiel pour le suivi des cultures à l'échelle mondiale (couverture globale, coût faible, capacité de revisite). Les prochaines missions hyperspectrales (CHIME, BIODIVERSITY **(1)**, SBG, etc.) permettront l'emploi de nouvelles métriques du développement des cultures. Une approche usuelle consiste à estimer des variables bio-physico-chimiques indicatrices des rendements, par inversion de données satellitaires avec un modèle de transfert radiatif (RTM). En effet, un RTM permet de limiter la collecte de données *in situ*, coûteuse temporellement et financièrement, tout en facilitant la compréhension physique de l'interaction entre le rayonnement solaire et le couvert végétal sur le domaine spectral (0,4 - 2,5) μm, permettant ainsi de développer des méthodes d'inversion applicables à large échelle. Les RTMs les plus utilisés représentent la végétation comme un milieu horizontal homogène (PROSAIL) alors que les parcelles agricoles présentent une hétérogénéité spatiale associée souvent à une situation en pente comme le maïs. D'autres RTMs, comme DART **(2),** utilisent des représentations 3D réalistes des cultures, avec relief.

Ce travail a deux objectifs : **(1)** évaluer avec le RTM DART l'influence de la structure 3D de champs de maïs à différents stades de développement sur leur caractérisation par télédétection, et **(2)** évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour une estimation plus large de variables bio-physico-chimiques des cultures.

Données

Le site d'étude comprend des champs de maïs irrigués, au nord de Grosseto (42◦4947,02N 11◦0410,27E), Italie. Deux images hyperspectrales aéroportées HyPlant-DUAL (7 et 30 juillet

*Intervenant

2018) ont été acquises durant la campagne ESA FLEXSENSE **(3)**. Des réflectances de surface ainsi que des variables bio-physico-chimiques du maïs ont été mesurées sur le terrain durant les vols. Certaines de ces variables sont des paramètres du RTM : indice de surface foliaire (**LAI**), contenu foliaire en chlorophylle (**Cab**), en caroténoïdes (**Car**), en matière sèche (**Cm**), en protéines (**Cp**), en eau (**Cw**) et réflectance du sol.

Méthodes et résultats
Une analyse globale de sensibilité (GSA) a permis de quantifier l'influence de la géométrie du couvert (pente, orientation des rangées) et des conditions d'éclairement aux configurations du capteur HyPlant (domaine spectral, résolution spatiale). Elle a utilisé 3 Look-Up Tables (LUT) de 5000 simulations DART de champs de maïs 3D du site d'étude simulés à 3 stades de développement (LAI : 0.46, 1.21 et 3.11 m2/m2), et la méthode du critère d'indépendance de Hilbert-Schmitt (HSIC) **(4)** qui évalue la dépendance entre les paramètres du RTM et le signal hyperspectral simulé. Cette méthode non-paramétrique a été choisie du fait de sa polyvalence, sans connaissances à priori sur les distributions des variables tout en nécessitant une quantité moindre de données.

Les résultats montrent que l'orientation des rangées par rapport à la direction d'éclairement solaire a un impact modéré quand le couvert est peu développé (LAI = 0.46 m2/m2), avec une contribution spectrale de 2.2% à 1320 nm. Cet impact est maximal quand le couvert est intermédiaire (LAI = 1.21 m2/m2; Fig. 1.) avec une contribution de 4.9% à 1314 nm. Pour ces stades, l'humidité du sol est le paramètre qui joue le plus sur la réflectance du couvert et doit donc être considéré pour le suivi précoce des cultures. L'impact de la pente est faible si l'angle de pente est inférieur à 10∘ ; il est quasi nul pour une direction solaire parallèle aux rangées et maximal pour une direction solaire perpendiculaire. Une analyse plus approfondie des effets de pente est prévue. D'autre part, la réflectance du couvert ne dépend de Cp que si le couvert est assez développé (LAI = 3.11 m2/m2), avec une contribution maximale de 0.26% à 1699 nm, très faible par rapport aux effets de structure. Cela souligne la nécessité de maquettes réalistes (ex : orientation des rangées, agrégation du feuillage, topographie, etc.) pour pouvoir estimer Cp par inversion d'images satellites.

***
voir pièce jointe
**

Figure 1 : Résultats d'analyse globale de sensibilité sur le domaine 400 - 2500 nm pour LAI = 1.21 m2 / m2

Une méthode d'inversion a été développée via une étape d'apprentissage d'algorithme de machine learning (ML) à partir d'une LUT DART afin de lier les variables de végétation aux spectres hyperspectraux simulés. Cette méthode a ensuite été appliquée à des images HyPlant pour générer des cartes de variables bio-physico-chimiques qui ont été comparées aux mesures terrain. Ainsi, une LUT de 5000 simulations, représentative des stades de développement et des conditions d'éclairement du site d'étude, a été créée. L'algorithme d'apprentissage automatique utilisé est la Kernel Ridge Regression (KRR), adaptée aux données à grande dimension liées par des relations non-linéaires tout en restant facilement interprétable avec peu d'hyperparamètres. Les premiers résultats d'inversion avec cette méthode feront également l'objet de cette présentation.

(1) X. Briottet et al., "BIODIVERSITY - A new space mission to monitor Earth ecosystems at fine scale", RFPT, vol. 224, n 1, p. 33-58, déc. 2022.

(2) J. Gastellu-Etchegorry, "Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies", RSE, vol. 58, n 2, Art. n 2, nov. 1996.

(3) G. Candiani et al., " Evaluation of Hybrid Models to Estimate Chlorophyll and Nitrogen Content of Maize Crops in the Framework of the Future CHIME Mission ", Remote Sensing, vol. 14, n 8, Art. n 8, avr. 2022
(4) A. Marrel et V. Chabridon, " Statistical developments for target and conditional sensitivity analysis: Application on safety studies for nuclear reactor ", Reliability Engineering & System Safety, vol. 214, p. 107711, oct. 2021

Prédiction des propriétés spectrales du sol forestier à partir de capteurs LiDAR et RSO dans les forêts tempérées et boréales

Audrey Mercier * [1], Mari Myllymäki [2], Aarne Hovi [1], Daniel Schraik [1,2], Miina Rautiainen [1]

[1] School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland – Finlande
[2] Natural Resources Institute Finland (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, Finland – Finlande

Introduction

La végétation des sols joue un rôle essentiel dans les écosystèmes forestiers. La télédétection est un outil précieux pour caractériser et surveiller le sol forestier à grande échelle. Bien que des données optiques passives aéroportées et satellitaires aient été utilisées pour cartographier les propriétés spectrales du sol dans les forêts boréales, ces capteurs sont limités par la couverture nuageuse fréquente dans les zones de haute latitude. Les données LiDAR et radar à synthèse d'ouverture (RSO) dépendent moins des conditions d'illumination et fournissent des informations sur la structure du couvert végétal. L'extraction des caractéristiques des sols forestiers à partir de données de télédétection active reste inexplorée, malgré les interconnexions écologiques déjà signalées entre les caractéristiques des sols forestiers, la disponibilité en lumière au sol et la structure des forêts. Compte tenu des liens entre les propriétés spectrales du sol forestier et la structure forestière, telles que la disponibilité de la lumière au sol et la couverture de la canopée, nous avons étudié le potentiel des capteurs de télédétection active pour prédire les propriétés spectrales du sol forestier.

Méthodologie

Cette étude est basée sur un ensemble de données unique couplant des spectres de réflectance des sols forestiers (mesurés entre 350 et 2500 nm avec un spectromètre ASD FieldSpec4), du LiDAR aéroporté (ALS), du LiDAR terrestre (TLS) et des données RSO Sentinel-1 acquises dans 37 peuplements situés dans des forêts tempérées, hémiboréales et boréales en Finlande, République tchèque et Estonie. La première partie exploratoire s'intéressait aux questions suivantes : Quelles métriques de structure forestière sont liées aux propriétés spectrales du sol forestier ? Nous nous sommes concentrés sur les 12 bandes spectrales du satellite Sentinel-2 et avons analysé leurs relations avec des métriques de structure forestière dérivées des capteurs TLS, ALS et RSO au moyen de modèles linéaires à effets mixtes. Ensuite, la partie prédictive s'est concentrée sur : Quel est le potentiel 1) des données TLS, 2) des données ALS, 3) des données satellite RSO, et 4) de ces sources de données combinées pour prédire les propriétés spectrales du sol forestier ? Nous avons prédit le spectre complet du sol forestier entre 350 et 2500 nm à partir de chaque configuration d'ensemble de données en utilisant des modèles mixtes linéaires avec un effet de site aléatoire et une régularisation LASSO. Nous avons testé les modèles prédictifs à l'aide d'une validation hors échantillon (c'est-à-dire des ensembles d'apprentissage, de validation et de test distincts).

Résultats

*Intervenant

Nous avons mis en évidence pour la première fois le potentiel prometteur des technologies de télédétection active pour prédire les facteurs de réflectance du sol forestier dans la lisière rouge, le proche-infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes. Nos analyses ont révélé que l'indice d'agrégation (i.e. un paramètre de structure relatif à la distribution spatiale des feuilles dans la canopée) dérivé du TLS et le coefficient de rétrodiffusion VV dérivé du RSO étaient significativement liés aux propriétés spectrales du sol forestier à certaines longueurs d'onde. En revanche, les métriques de hauteur (moyenne et écart-type) dérivées des capteurs TLS et ALS n'étaient pas liées aux propriétés spectrales du sol forestier. Le meilleur modèle prédictif sur l'ensemble du spectre de réflectance du sol forestier a été obtenu en combinant les métriques de structure forestière provenant des trois capteurs TLS, ALS et RSO. Lorsque les capteurs ont été examinés un par un, le RSO seul avait le potentiel le plus élevé pour les bandes proche-infrarouges, atteignant des performances similaires à celles de la combinaison des données TLS, ALS et RSO. Le TLS seul était plus approprié que l'ALS et le RSO seuls pour prédire les facteurs de réfléctances dans les bandes infrarouge à ondes courtes entre 1504 et 1781 nm, tandis que le RSO et le TLS produisaient tous deux les meilleurs résultats pour les longueurs d'onde entre 2094 et 2316 nm.

Perspectives

Les données hyperspectrales fournissent des informations détaillées sur les caractéristiques de la végétation au sol. Par conséquent, l'estimation des facteurs de réflectance au sol à grande échelle pourrait aider à améliorer la cartographie et le suivi des écosystèmes forestiers, et être directement utilisée en tant que données d'entrée dans les modèles climatiques et de surface terrestre. À l'avenir, la précision des prévisions de réflectance des sols forestiers pourrait bénéficier d'une synergie entre les technologies passives et actives.

Caractérisation des arbres par données LiDAR et hyperspectrales de la forêt boréale

Florent Guiotte * [1], Jorma Laaksonen [1]

[1] Department of Computer Science [Aalto] – Finlande

Dans ce travail, nous présentons une étude des espèces d'arbres de la forêt boréale en utilisant des images hyperspectrales aériennes et une segmentation d'arbres à partir de nuages de points LiDAR. Nous utilisons des annotations d'espèces provenant de relevés terrain forestier et effectuons une validation qualitative en utilisant une bibliothèque spectrale pour comparer nos résultats et évaluer des modèles simples.

Données

La zone d'étude couvre une zone forestière à Hyytiälä, dans le sud de la Finlande. Les principales espèces d'arbres de la zone sont le pin sylvestre (pinus sylvestris), l'épicéa commun (picea abies) et le bouleau verruqueux (betula pendula).

Les données utilisées dans cette étude se composent d'images hyperspectrales aériennes et de nuages de points LiDAR, ainsi que de relevés terrain et d'une bibliothèque de spectres de réflectance des feuilles et des aiguilles.

Les images hyperspectrales ont été acquises par un avion survolant la zone d'étude. L'image finale est un composite de deux capteurs qui produisent ensemble une image hyperspectrale avec 140 bandes dans la plage de longueurs d'onde de 380 nm à 2 450 nm, avec une résolution pixel de 125 cm.

Les données LiDAR ont été acquises par un système laser aéroporté et post-traitées pour produire des fichiers de nuages de points avec une densité d'environ 50 points par mètre carré.

Les relevés terrain forestier se composent d'annotations couvrant 20 parcelles de référence d'environ 600 m^2 chacune. Chaque parcelle possède un inventaire d'arbres individuels. L'ensemble de données annoté se compose d'un total de 1 342 arbres. Chaque arbre est annoté avec une étiquette pour son espèce et ses coordonnées X et Y, qui sont utilisées pour établir une correspondance dans le nuage de points LiDAR. De plus, chaque parcelle est annoté avec une étiquette pour indiquer l'espèce d'arbre principale la composant.

*Intervenant

Enfin, la bibliothèque spectrale contient des mesures hyperspectrales de feuilles et d'aiguilles d'espèces d'arbres de forêt boréale. Les mesures ont été effectuées avec un spectroradiomètre dans un environnement de laboratoire. Les quantités mesurées sont la réflectance hémisphérique directionnelle dans la plage de longueurs d'onde de 350 à 2 500 nm. La résolution spectrale du spectromètre est de 3 nm dans les longueurs d'onde du visible à l'infrarouge proche ($\leq$ 1 000 nm) et de 10 nm dans les longueurs d'onde de l'infrarouge à ondes courtes ($>$ 1 000 nm). Les spectres ont été interpolés par intervalles de 1 nm (Hovi, Raitio, and Rautiainen 2017).

Segmentation d'instances d'arbres

Notre étude utilise une nouvelle méthode pour la détection et la segmentation individuelle d'arbres à partir de nuages de points LiDAR.

Cette méthode se base sur un maillage triangulaire pour connecter les points, puis applique un filtrage simple pour obtenir un modèle de surface avant d'utiliser un filtrage morphologique sur les composantes connexes pour détecter les arbres individuels, et enfin effectuer la segmentation d'instances d'arbres. La méthode proposée est efficace d'un point de vue computationnel et ne nécessite que d'un seul paramètre pour régler la sensibilité de la détection. À notre connaissance, cette approche est la première méthode qui utilise un filtrage par composantes connexes dans un nuage de points LiDAR sans avoir recours à une rastérisation intermédiaire. Cette approche non pixelisée conduit à plusieurs améliorations significatives, dont celle d'être multi-échelle et de s'adapter aux densités irrégulières des nuages de points LiDAR tout en maintenant le plus haut niveau de précision pour la détection et la segmentation (Guiotte, Kostensalo, and Laaksonen 2024).

Après la segmentation, un algorithme glouton simple est utilisé pour faire correspondre les arbres annotés des relevés terrain aux arbres détectés par LiDAR.

Agrégation de données hyperspectrales

Les segmentations d'instances d'arbres à partir du LiDAR sont ensuite projetées des points en 3D à des polygones en 2D. Nous utilisons les polygones pour masquer l'image hyperspectrale et agréger les spectres (c'est-à-dire les pixels) par arbre. Nous étudions la moyenne et l'écart type des spectres à la fois par parcelle de référence et par arbre en fonction de leur espèce.

Validation avec la bibliothèque spectrale

Enfin, nous utilisons la bibliothèque spectrale comme validation qualitative de ces travaux. Les données de la bibliothèque spectrale contiennent des niveaux de réflectance beaucoup plus détaillés et contrôlés provenant uniquement des feuilles, tandis que les pixels de l'image hyperspectrale agrègent beaucoup plus de flux diffus autour des

arbres. Cela étant dit, et bien que les niveaux de réflectance soient significativement plus bas dans l'image hyperspectrale, nos expériences montrent des distributions spectrales similaires des espèces d'arbres, en particulier dans la plage de 1 500 nm à 2 000 nm. Dans cette plage spectrale, les trois espèces d'arbres (pin, épicéa et bouleau) sont clairement distinctes les unes des autres, à la fois dans la bibliothèque spectrale et dans nos données provenant de l'image hyperspectrale. Nous démontrons en outre que l'on peut transférer certaines connaissances spectrales acquises en laboratoire sur le terrain en utilisant des modèles simples tels que le k plus proche voisins et la normalisation des données.

Références

Guiotte, Florent, Joel Kostensalo, and Jorma Laaksonen. 2024. "Mesh Surface and Morphological Hierarchies for Individual Tree Detection and Segmentation from LiDAR Data." In IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium.

Hovi, Aarne, Pekka Raitio, and Miina Rautiainen. 2017. "A Spectral Analysis of 25 Boreal Tree Species." Silva Fennica 51 (4). https://www.silvafennica.fi/article/7753.

Caractérisation d'un gradient de succession en forêt tropicale par imagerie hyperspectrale : retours sur la campagne Khao Yai 2024

Jean-Baptiste Feret * [1], Wirong Chanthorn [2], Giovanni Frati [3], Nidhi Jha [4], Thantiyaporn Kemrugka [5], Pierre Le Coz [3], Noppawan Lomwong [2], Anuttara Nathalang [5], Pornwiwan Pothasin [6], Sissades Tongsima [5], Grégoire Vincent [3], Maxime Réjou-Méchain [3]

[1] Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, AgroParisTech, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France
[2] Kasetsart University [Bangkok, Thailand] – Thaïlande
[3] Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des Végétations – Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Recherche pour le Développement, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Université de Montpellier – France
[4] Oregon State University – États-Unis
[5] National Science and Technology Development Agency [Bangkok] – Thaïlande
[6] Mahidol University – Bangkok, Thaïlande

L'imagerie hyperspectrale permet d'accéder à un ensemble de propriétés de la végétation associées notamment aux traits biochimiques foliaires et à la structure de la canopée. Ces propriétés peuvent à leur tour contribuer à l'estimation d'indicateurs écologiques associés à la biodiversité et au fonctionnement de la végétation. Dans le cas des écosystèmes forestiers, l'information hyperspectrale est le plus souvent utilisée pour discriminer les espèces d'arbre dans la canopée, estimer des traits fonctionnels ou encore des indicateurs de biodiversité.
En Mars 2024, une campagne d'acquisition aéroportée hyperspectrale VSWIR et LiDAR a été réalisée sur la réserve nationale de Khao Yai, Thaïlande, sur une superficie d'environ 60 km2. L'analyse de ces données de télédétection vise à obtenir des informations d'intérêt écologique pour la caractérisation et le suivi des écosystèmes forestiers. Plusieurs types d'informations *in situ* viennent compléter ces données de télédétection. Des inventaires forestiers effectués sur plus de 33 ha de forêt tropicale humide, comprenant une zone de forêt ancienne et un réseau de parcelles couvrant un gradient de régénération forestière suite à déforestation, sont complétés par une base de données de plus de 2000 couronnes délinéées et appareillées depuis le sol aux données terrain en utilisant des données d'imagerie drone. Durant la campagne aéroportée, des feuilles d'arbre de la canopée ou émergeants ont été échantillonnées par une équipe de grimpeurs professionnels, puis leurs propriétés optiques ont été mesurées en laboratoire et analysées pour en déduire différentes caractéristiques physicochimiques, comme la masse surfacique foliaire (LMA), la teneur en pigments et en eau. Ces mesures optiques ont été complétées par des mesures directes de traits foliaires (teneur en eau, LMA, épaisseur foliaire). Plus de 1000 échantillons foliaires correspondant à plus de 200 arbres et près de 100 espèces ont ainsi été collectés et analysés de manière concomitante aux acquisitions VSWIR.
L'ensemble des données collectées sera mobilisé pour permettre la cartographie des espèces de

*Intervenant

la canopée par classification supervisée, l'estimation de traits foliaires par analyse statistique et modélisation physique, et la cartographie d'indicateurs de biodiversité. Ces informations seront alors utilisées pour aider à caractériser le gradient de régénération forestière présent sur le site d'étude. Enfin, le passage à l'échelle des données aéroportées vers des données satellite sera explorée à l'aide d'acquisitions EnMAP et Sentinel-2.

Acquisition de données hyper-spectrales de haute résolution sur très petits échantillons de végétation

Nicolas Venjean * [1], Mckenzie Woodman [1]

[1] Spectral Evolution – États-Unis

L'acquisition de données hyper-spectrales sur des petits échantillons de végétation tels que des aiguilles de pin, des brins d'herbe et de minuscules feuilles peut s'avérer difficile. Le très petit champ de vision nécessaire à la mesure, ainsi que la haute sensibilité requise du spectromètre peuvent constituer des obstacles à l'obtention de données de qualité.
En guise de compromis, les chercheurs ont pris l'habitude de mesurer le spectre combiné de nombreux petits échantillons regroupés. Cependant, le spectre résultant représente une moyenne des caractéristiques spectrales de tous les échantillons, mais pas nécessairement le trait individuel de chaque échantillon.
Cette étude présente une nouvelle approche pour capturer le spectre individuel d'un seul petit échantillon. Une analyse sera présentée des résultats obtenus avec un adaptateur innovant pour petits échantillons, couplé à un spectromètre UV-Vis-NIR à haute sensibilité et résolution spectrale. Les données ont été mesurées sur la plage spectrale de 350 à 2500 nm.

*Intervenant

Caractériser la connectivité hydrologique et le stress hydrique de la végétation des cours d'eau : apport de l'imagerie hyperspectrale.

Julien Godfroy * [1,2], Jérôme Lejot [3], Hervé Piegay [2]

[1] Laboratoire des EcoSystèmes et des Sociétés en Montagne – Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France
[2] Environnement Ville Société – Centre National de la Recherche Scientifique – France
[3] Environnement Ville Société – Université Lumière - Lyon 2 – France

Introduction.
Les forêts riveraines sont des milieux fragiles faisant face à des pressions qui s'intensifient. Parmi les principales menaces figure une perte de la connectivité hydrologique entre la rivière et ses marges terrestres, ce qui assèche le milieu et peut conduire à une modification des communautés au détriment des espèces pionnières typiques (1). Les pressions anthropiques déjà exercées sur l'hydrologie et l'accès à la ressource en eau sont aggravées par le changement climatique. Cartographier la connectivité des forêts riveraines en lien avec les aménagements fluviaux et identifier les secteurs qui souffrent de stress hydrique en situation de sécheresse est donc un enjeu important pour la gestion des cours d'eau.

Afin de répondre à ces enjeux, nous présenterons des résultats issus de deux cas d'étude exploitant l'imagerie hyperspectrale sur la forêt riveraine de la basse vallée de l'Ain : (i) une approche à l'échelle des communautés cartographiant la connectivité de la forêt à la nappe sur un linéaire de 20 km (2) et (ii) une approche à l'échelle des individus pour caractériser le jaunissement des feuilles des pionniers suite à un épisode de sécheresse sur un site plus restreint.

Méthodes.

(i) Caractérisation de la connectivité.

Le couplage de données de télédétection aéroportée (LiDAR, hyperspectral entre 380 et 2500 nm) avec des relevés forestiers effectués par l'ONF nous a permis de caractériser les conditions stationnelles de placettes forestières afin d'extraire des indicateurs structurels et physiologiques (hauteur des peuplements, teneur en eau de la canopée). Des proxys de la connectivité des placettes forestières ont pu être identifiés en comparant des secteurs d'âge similaire affectés ou non par une incision du chenal causée par un déficit sédimentaire en lien avec les aménagements hydroélectriques. Les conditions stationnelles humides ou sèches ont ensuite pu être prédites grâce à une classification par forêts aléatoires à partir des données hyperspectrales.

(ii) Cartographie du jaunissement.

Sur un site identifié en (1) comme bien connecté à la nappe et où des espèces pionnières se côtoient à plusieurs stades de croissance, un jaunissement des feuilles de certains pionniers jeunes a été observé sur le terrain au cours de l'été 2022. Afin de mieux caractériser spatialement

*Intervenant

le phénomène, une acquisition hyperspectrale par drone (380 - 1230 nm) a été couplée à un relevé *in situ* de végétation. Ces données ont été exploitées pour produire une cartographie de la végétation riveraine par forêts aléatoires, mettre en évidence les espèces pionnières typiques et localiser les secteurs affectés par le jaunissement.

Résultats et discussion.

La prédiction des conditions stationnelles de connectivité au chenal repose sur notamment les bandes spectrales associée à la verdeur de la canopée et à sa teneur en eau de la canopée ainsi que les indices associés (ex : Red Edge Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Infrared Index). Elle permet de proposer une cartographie de cette connectivité (Figure 1a) basée sur la réponse de la végétation à un stress hydrique potentiel qu'elle rencontre sur les placettes les plus déconnectées de la rivière. Un gradient de connectivité amont-aval est ainsi observé et permet de visualiser les effets de l'incision du chenal et du ralentissement de la mobilité en plan de la rivière résultant de la propagation aval de l'impact des barrages amont sur l'état de santé de la forêt alluviale.

À l'échelle des individus, le jaunissement des feuilles a conduit à une augmentation de la réflectance des individus stressés dans le visible entre 500 et 700 nm ainsi que dans le proche infrarouge entre 1100 et 1200 nm. La cartographie des espèces et du jaunissement (Classe " Stressed ", Figure 1b) permet de mettre en évidence que ce dernier est principalement localisé sur les communautés pionnières jeunes (nord), notamment la saulaie, et que les individus matures sont moins affectés (sud). Cependant, s'il affecte essentiellement les communautés pionnières, le jaunissement des feuilles est variable au sein de celles-ci ce qui suggère qu'il est dépendant des conditions stationnelles contrastées.

Bibliographie.

(1) Janssen, P., Stella, J.C., Räpple, B., Gruel, C.-R., Seignemartin, G., Pont, B., Dufour, S., Piégay, H., 2021. Long-term river management legacies strongly alter riparian forest attributes and constrain restoration strategies along a large, multi-use river. Journal of Environmental Management 279, 111630. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111630
(2) Godfroy, J., Lejot, J., Demarchi, L., Bizzi, S., Michel, K., Piégay, H., 2023. Combining Hyperspectral, LiDAR, and Forestry Data to Characterize Riparian Forests along Age and Hydrological Gradients. Remote Sensing 15, 17. https://doi.org/10.3390/rs15010017

Cartographie de la montmorillonite par démélange d'images hyperspectrales à l'échelle centimétrique : cas de champs agricoles labourés

Karine Adeline * [1], Etienne Ducasse [2,3], Audrey Hohmann [4], Véronique Achard [3], Anne Bourguignon [4], Gilles Grandjean [5], Xavier Briottet *

3

[1] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – PRES Université de Toulouse – France
[2] Université Fédérale Toulouse – Midi-Pyrénées – France
[3] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – PRES Université de Toulouse – France
[4] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – DRP – France
[5] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) – DRP – France

L'estimation de la montmorillonite est un facteur clé pour quantifier le phénomène de retrait-gonflement des argiles qui occasionne chaque année de nombreux dommages infrastructurels et qui peut perturber la traficabilité des véhicules sur le terrain. Par télédétection optique, déterminer l'abondance de la montmorillonite dans les sols est une tâche complexe car (i) les minéraux de la famille des argiles ont des signatures spectrales très proches autour de 2,2 μm, (ii) le sol est un mélange intime de différents types de minéraux, de matière organique et est sensible à l'humidité, ce qui conduit à plusieurs combinaisons spectrales. A l'échelle centimétrique, de nombreux autres facteurs viennent s'ajouter tels que la rugosité fine de surface et le mélange surfacique du fait de la présence d'autres éléments dans la scène observée (affleurement de roches, végétation, litière, etc.). Des travaux précédents menés à l'échelle laboratoire avec des échantillons préparés et composés de calcite, quartz et trois argiles minéralogiques (montmorillonite, kaolinite et illite) et des images hyperspectrales SWIR (1 – 2.5 μm) ont montré des performances encourageantes pour l'estimation de la montmorillonite (RMSE entre 8,8% et 13,9%) avec des mélanges sans quartz et des méthodes de démélange linéaire et non linéaire (1).
Dans cette présentation, nous présentons une étude d'estimation de la montmorillonite, cette fois-ci en conditions extérieures, pour des sols réels de champs agricoles labourés. Trois sites localisés au nord-est d'Orléans soumis à différents aléas de retrait-gonflement argileux ont été sélectionnés. Des acquisitions hyperspectrales Vis-NIR-SWIR (0,4 - 2,5 μm) à partir d'une nacelle ont été effectuées à la résolution spatiale de 1,5 cm. Un premier masquage a consisté à identifier les pixels purs de sols en s'affranchissant des contributions de la végétation (verte et sénescente) et des ombres. Plusieurs analyses laboratoires ont été faites sur des échantillons de sol afin de connaître la composition minéralogique, granulométrique et en matière organique, ainsi que des mesures d'humidité du sol. Une première étape avant le démélange a consisté à évaluer deux stratégies : soit on connaît les minéraux présents dans le sol et donc on s'appuie sur des librairies spectrales existantes, soit on ne les connaît pas et on teste des algorithmes de détection automatique. La deuxième stratégie ne s'est pas révélée concluante et par conséquent nous nous sommes appuyés sur les librairies USGS et provenant de (1). Plusieurs pré-traitements

*Intervenant

spectraux ont été étudiés, ainsi que quatre méthodes de démélange, deux linéaires (FCLS et MESMA) et deux non linéaires (GBM et MLM). Les résultats montrent que seule la méthode non linéaire MLM sans pré-traitement (réflectance) ou avec l'application de la dérivée première Savitzky-Golay montrent des estimations satisfaisantes pour la librairie USGS (RMSE entre 2.2 et 19.7%).

(1) Ducasse, E., Adeline, K., Briottet, X., Hohmann, A., Bourguignon, A., & Grandjean, G. (2020). Montmorillonite estimation in clay–quartz–calcite samples from laboratory SWIR imaging spectroscopy: A comparative study of spectral preprocessings and unmixing methods. Remote Sensing, 12(11), 1723. (2) J.B. Féret, A .A . Gitelson, S.D. Noble, S. Jacquemoud, PROSPECT-D: towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle, Remote Sens. Environ. 193 (2017), doi: 10.1016/j.rse.2017.03.004

The Hyper-Cam Nano a next generation LWIR hyperspectral imaging system

Stephane Boubanga Tombet * [1], Eric Guyot , Martin Chamberland

[1] Telops – avenue St.-Jean-Baptiste, Québec (Québec) Canada G2E 6J5, Canada

Telops has a 20-year history in the design, integration, and deployment of infrared hyperspectral imaging systems through the legacy Hyper-Cam line. Now, advances in critical subsystem technologies have allowed Telops to develop the next-generation of ground and airborne hyperspectral imaging systems with significant reductions in Size, Weight, and Power (SWaP) requirements while maintaining imaging and data quality performance. This reduction in SWaP requirements yields a significant increase in deployment flexibility, allowing for increased capability for collecting actionable hyperspectral data of remote or difficult-to-access targets. This presentation will serve as an overview of the system architecture and analysis capabilities of the next-generation Hyper-Cam Nano hyperspectral imaging system. The Hyper-Cam Nano platform includes a miniaturized (172 x 172 x 181 mm) Fourier Transform Spectrometer (FTS) mounted on a gimbal, which can be deployed in a ground configuration, or easily affixed to an octocopter drone. Benefiting from state-of-the-art electronics and computer systems, the real-time data analysis capabilities embedded in the Hyper-Cam Nano enables unprecedented ease of use without compromise to performance. Additionally, utilizing advanced Telops processing algorithms, the Nano provides an ability to simultaneously resolve multiple spectral signatures within a scene for the detection and identification of gases and solids, and even quantification for gases. This novel instrument will offer new capabilities in gas detection and identification applications for the defense, industrial, and environmental sectors.

*Intervenant

Toulouse Hyperspectral Data Set: a benchmark data set to assess semi-supervised spectral representation learning and pixel-wise classification techniques

Romain Thoreau * [1], Laurent Risser [2], Véronique Achard [3], Beatrice Berthelot [4], Xavier Briottet [3]

[1] Centre National d´tudes Spatiales [Toulouse] – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France
[2] Institut de Mathématiques de Toulouse UMR5219 – Université Toulouse Capitole, Institut National des Sciences Appliquées - Toulouse, Université Toulouse - Jean Jaurès, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Centre National de la Recherche Scientifique – France
[3] ONERA, Université de Toulouse [Toulouse] – PRES Université de Toulouse, ONERA – France
[4] Magellium – Magellium, Ramonville Saint-Agne, France – France

Airborne hyperspectral images can be used to map the land cover in large urban areas, thanks to their very high spatial and spectral resolutions on a wide spectral domain. While the spectral dimension of hyperspectral images is highly informative of the chemical composition of the land surface, the use of state-of-the-art machine learning algorithms to map the land cover has been dramatically limited by the availability of training data. To cope with the scarcity of annotations, semi-supervised and self-supervised techniques have lately raised a lot of interest in the community. Yet, the publicly available hyperspectral data sets commonly used to benchmark machine learning models are not totally suited to evaluate their generalization performances due to one or several of the following properties: a limited geographical coverage (which does not reflect the spectral diversity in metropolitan areas), a small number of land cover classes and a lack of appropriate standard train / test splits for semi-supervised and self-supervised learning. Therefore, we release in this paper the Toulouse Hyperspectral Data Set that stands out from other data sets in the above-mentioned respects in order to meet key issues in spectral representation learning and classification over large-scale hyperspectral images with very few labeled pixels. The Toulouse Hyperspectral Data Set is the combination of 1) an airborne hyperspectral image acquired by the AisaFENIX sensor over Toulouse, France, during the CAMCATT-AI4GEO campaign (Roupioz et al., 2023) and of 2) a land cover ground truth, provided with standard train / test splits to foster fair and reproducible benchmarks. The image is provided in ground-level reflectance with a very high spatial resolution (1m ground sampling distance) and spectral resolution ($<$ 8 nm) from 0.4 μm to 2.5 μm (310 channels). More than 380,000 pixels are sparsely labeled over an area of 90 km2 . The land cover nomenclature contains 32 classes hierarchically organized into 16 impermeable surfaces and 16 permeable surfaces. As much as intra-class spectral shifts are correlated to the geographical location of pixels, we fostered the statistical independence of the training, validation and test sets by separating them geographically.
We discuss the differences between the Toulouse data set and other public hyperspectral data sets, showing its interest for the evaluation of machine learning models generalizability. In particular, we perform a qualitative comparison of the Toulouse data set with Pavia University and Houston University data sets, based on a hand-crafted representation technique. The qualitative

*Intervenant

comparison illustrates the larger spectral variability of the Toulouse data set, that is more representative of large urban areas. Finally, we discuss and experiment several self-supervised learning techniques and establish a baseline for pixel-wise classification. The Toulouse Hyperspectral Data Set is publicly available at www.toulouse-hyperspectral-data-set.com.

Toward a Femtosecond Laser Written Photonic Integrated Circuit for Hyperspectral Imaging

Sébastien Bourdel [1,2], Olivier Gazzano * [1], Maxime Cavillon [2], Guillaume Druart [1], Matthieu Lancry [2]

[1] DOTA, ONERA, Université Paris Saclay [Palaiseau] – Université Paris-Saclay, ONERA – France
[2] Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay – Institut de Chimie - CNRS Chimie, Université Paris-Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Hyperspectral cameras collect and process spectral information for each pixel over a given field of view. Therefore, they can extract more information about the scene than ordinary cameras. Hyperspectral imaging has a wide field of applications such as in agriculture, climate changes, biology, biomedical imaging, astronomy, geosciences, and for surveillance. One of the technological challenges of hyperspectral cameras is to create a compact architecture that is also robust and stable, delivering high quality images and with advanced functions.
A photonic integrated circuit (PIC) is a chip with optical inputs and outputs linked by photonic waveguides. PICs can be more compact than equivalent free space optical systems. The waveguides of the PIC are also more mechanically stable than kinetic mirror mounts and allow a better control over the field propagation. From an industrial point of view, the realization of 2-dimensional PICs is already mastered, mainly with lithography techniques. However, for imaging applications, 3D PICs are more suitable. Stacking 2D PICs would be a solution but the scalability would be limited.

Our approach is to use ultrafast laser inscriptions to write the 3D circuit inside a glass chip. The laser beam is focused inside the sample and depending on the inscription parameters, the non-linear light-matter interactions can lead to a local increase of the refractive index of the glass. Then, we can write the waveguides by moving the sample (Figure 1a).

The first technological step of this project was to find the right set of laser parameters to minimize losses and ensure to have single-mode waveguides (at a wavelength around 1.5 μm) with quite circular mode profile. We are now able to realize PIC components such as straight and curve waveguides and beam splitters (Figure 1b-c). We will present those initial results, including the experimental setups we developed to study the 3D waveguides (measurements of mode field diameter, of the numerical aperture, transmission rates...). The next experimental step is to realize the spectral components of the hyperspectral imaging system using an array of waveguide-based Mach-Zehnder interferometers.

We will also present our numerical study based on a beam propagation method to estimate the compacity of the waveguides and the expected spectral performances of the hyperspectral system considering the losses induced by curved waveguides. We also use numerical finite-difference time-domain (FDTD) simulations to estimate parameters ahead of the fabrication with the laser (Figure 1d).
Finally, we will discuss on our perspectives to realize a full proof of principle of the 3D PIC based hyperspectral system by progressively fabricating and characterizing the different sub-parts of the system and by comparing these results with the numerical modeling expectations.

*Intervenant

Caméra hyperspectrale ”snapshot” avec interféromètre biréfringent

Matthieu Porte * [1]

[1] ONERA – DOTA – France

Une camera hyperspectrale est dite "snapshot" quand elle acquiert l'ensemble du cube hyperspectral (c'est-à-dire, une image à deux dimensions résolue spectralement) avec une seule trame. Un tel dispositive est requis quand il s'agit d'observer des scènes évoluant rapidement, comme un panache de gaz, mais est aussi très utile car il évite un mécanisme de balayage parfois encombrant. La contrepartie est évidemment un compromis au niveau de la répartition du nombre de pixels total de la matrice de détection, entre le nombre de points résolus dans le champ de vue et le nombre de bandes spectrales, particulièrement si on souhaite mesurer toute l'information, et donc éviter le " compressed sensing ". Toutefois, la disponibilité de capteurs méga-pixels, y compris dans l'infrarouge thermique, rend possible des systèmes snapshot avec par exemple une image de 100x100 pixels et une centaine de bandes spectrales.
Cependant, plus la résolution spectrale est fine, et moins il y a de photons disponibles dans une bande : il est alors souhaitable d'avoir un système qui collecte efficacement la lumière, comme les spectromètres à transformée de Fourier, grâce à l'avantage multiplex (dit aussi de Fellgett). Nous avons développé un tel système, fondé sur une matrice de minilentilles et un interféromètre en coin d'air comme décrit par Hirai(1) et avec un interféromètre biréfringent, suivant en cela Kudenov(2). Cette caméra est sensible dans l'intervalle (500-850) nm : comme il est plus petit qu'une octave, nous avons sous-échantillonner l'interférogramme pour tirer parti au mieux des pixels disponibles. Nous avons en outre utilisé une caméra sensible à la polarisation (3), où les polariseurs sont déposés au niveau des pixels individuels, ce qui permet de réduire la taille du cœur interférométrique. Cela donne un système pouvant acquérir des images hyperspectrales de taille 116x116 pixels avec une résolution spectrale de 70 cm-1 (4 nm at 750 nm), à une cadence vidéo.

Nous présenterons plus en détail ce concept de caméra hyperspectrale " snapshot ", les évolutions possibles, ainsi que des images expérimentales obtenues avec notre dispositif.

Références:

1. Hirai, A.; Inoue, T.; Itoh, K. and Ichioka, Y., *Optical Review* **1994**, *1* (2), 205-207

2. Kudenov, M. and Dereniak, E., *Optics Express* **2012**, *20* (16), 17973-17986
3. https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=CS505MUP1

*Intervenant

Trajectoire environnementale à travers le prisme croisé de la Géoarchéologie et de l'imagerie : l'exemple des processus d'érosion au sein du bassin versant de la Commerce, (Seine-Maritime).

Manon Charpenay * [1,2], Léa Mairaville *

[1], Damase Mouralis [1], Dominique Todisco [1], Brian Chaize [1], Stoil Chapkanski [1,3]

[1] Identité et Différenciation de l'Espace, de l'Environnement et des Sociétés – Université de Caen Normandie, Université Le Havre Normandie, Université de Rouen Normandie, Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Recherche Interdisciplinaire Homme et Société – France
[2] Université de Rennes 2 - UFR Sciences humaines – Université de Rennes 2 – France
[3] Laboratoire de géographie physique : Environnements Quaternaires et Actuels – Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12 : UMR8591, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR8591 – France

Depuis 10 000 ans, l'estuaire de la Seine et ses paysages ont considérablement évolué (Genuite et al, 2021), avec une intensification de l'influence humaine à partir depuis l'époque industrielle et des projets d'endiguement et de chenalisation de la Seine (Foussard et al, 2010). Ces transformations anthropiques se manifestent également dans les vallées affluentes, à une échelle plus réduite.

L'une d'elles, la vallée du Commerce est un terrain d'étude privilégié car l'implantation anthropique y est particulière ancienne avec la création d'une capitale romaine, Juliobona, au Ier siècle de notre ère.

La communication va s'attacher à présenter un travail pluridisciplinaire, faisant le lien entre une thèse de géoarchéologie et un stage de Master 2 en Télédétection. La problématique concerne la mise à profit de la télédétection appliquée à des modèles d'érosion des sols, du type RUSLE-SDR (Renard et al, 1997; Ferro & Minacapilli, 1995). En d'autres termes, l'objectif principal de ce travail pluridisciplinaire consiste à privilégier l'apport des données multi/hyperspectrales afin d'enrichir les cartographies disponibles et de pouvoir estimer l'intensité du processus d'érosion des sols et des transferts sédimentaires.

Grâce aux images satellites Pleiades, il sera possible d'entraîner un algorithme de classification supervisée (Machine Learning) et d'obtenir une carte d'occupation du sol actuelle (espaces agricoles, forestiers, urbains, zones humides...).

Les données de pluviométrie seront complétées par l'exploitation des images infrarouges CHIRPS, sur un pas de temps d'une année pour connaître les lames d'eau moyennes (ruissellement sur les

*Intervenant

pentes).

La topographie est approchée par une acquisition LiDAR locale d'un MNT de très haute résolution. Les images Pléiades ont, quant à elles, permis de générer un MNE par photogrammétrie à l'échelle du bassin versant de la Commerce. L'accent est mis sur l'accès à des données de grande qualité et de précision pour soutenir les recherches géoarchéologiques.

Enfin, la végétation est considérée principalement par le calcul de l'indice NDVI à partir des bandes spectrales RED/NIR.
Ce travail sera comparé à un autre modèle d'érosion des sols dans le passé (deuxième moitié du XIXème siècle), en estimant certains paramètres non existants, comme les classes d'occupation des sols. Ce travail est appréhendé principalement par interprétation visuelle de la carte d'

Evaluer l'impact de l'environnement sur la santé humaine : l'enjeu du traitement des données de spectrométrie de masse haute-résolution

Jade Chaker * [1], Erwann Gilles , Sophie Lefevre-Arbogast , Cécilia Samieri , Sarah Lennon , Arthur David

[1] Univ Rennes, Inserm, EHESP, Irset (Institut de recherche en santé, environnement et travail) - UMR$_S$1085, $F-35000 Rennes, France--UnivRennes--France$

La définition du concept d'exposome par Wild en 2005(1) a marqué le début d'un intérêt croissant de la communauté scientifique pour la caractérisation des liens entre les facteurs environnementaux et la santé humaine. Parmi ces facteurs, l'exposition aux contaminants chimiques environnementaux est fortement soupçonnée de contribuer à la survenue d'événements de santé défavorables, tels que le vieillissement cérébral et les pathologies associées, en particulier la maladie d'Alzheimer. Dans ce contexte, l'objectif du projet Eglantine est de caractériser l'exposome chimique humain par le biais d'échantillons sanguins de 500 individus de plus de 65 ans, avec un suivi de 100 individus sur 10 ans, pour établir des liens entre expositions chimiques environnementales et vieillissement cérébral.
Les analyses utilisées pour évaluer l'exposition humaine aux contaminants environnementaux sont, pour la plupart, ciblées. En d'autres termes, elles sont axées sur la détection et la quantification de composés préalablement définis dans un échantillon. Les méthodes ciblées sont hautement sélectives et sensibles, permettant une mesure précise des composés d'intérêt. Pour complémenter ces approches, il est possible d'avoir recours à la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (SMHR) pour effectuer des analyses plus exploratoires, dites non ciblées. Ces dernières visent à détecter et à caractériser tous les composés présents dans un échantillon, sans préjuger de leur identité, qui est déterminée dans un second temps à l'aide d'algorithmes d'annotation(2). Ces approches offrent une vision plus globale de la composition chimique d'un échantillon, mais produisent des données spectrales massives et complexes (jusqu'à 100,000 composés/ions détectés par analyse, avec pour chacun un rapport masse-sur-charge, un temps de rétention, et une aire pour chaque échantillon), nécessitant un traitement spécifique.

La première étape du traitement des données non-ciblées consiste à la production d'une matrice regroupant la liste des ions détectés, ainsi que l'aire du signal correspondant dans chaque échantillon. L'intégration des données spectrales issues de la SMHR est un enjeu particulièrement critique, puisque les niveaux de réponse des composés sont utilisés pour parvenir à établir des corrélations avec la survenue de l'événement de santé étudié. Il est donc crucial de s'assurer de la pertinence de l'algorithme et du paramétrage utilisé pour produire cette matrice d'ions en limitant le nombre de faux positifs (i.e. " détection " d'un signal non-existant) et surtout le nombre de faux négatifs (i.e. non-détection d'un signal existant). De plus, les échantillons sanguins sont complexes par nature, et contiennent des composés présentant des concentrations s'étendant sur jusqu'à 8 ordres de grandeur, les marqueurs d'exposition environnementale étant

*Intervenant

majoritairement parmi les moins abondants(3). Il est donc également nécessaire de s'assurer que l'algorithme de détection et d'intégration des pics soit robuste face à cette variation importante de caractéristiques de pics.

Lors de ce travail, quatre algorithmes ont été évalués : l'algorithme vendeur MarkerViewTM1.3 (AB SCIEX), l'algorithme vendeur Progenesis QI for MetabolomicsTM (Waters), l'algorithme open-source Continuous Wavelet Transformation (CWT) (implémenté dans le package R *xcms*(4) et dans le logiciel MZMine2(5)), et l'algorithme open-source Automated Data Analysis Pipeline (ADAP) (implémenté dans le logiciel MZMine2). Ce travail d'optimisation et de comparaison a été effectué en utilisant les données issues du dopage à 10 ng/mL d'échantillons de 4 échantillons de plasma et de sérum avec une solution contenant 45 molécules (4 échantillons de chaque matrice ont été analysés sans dopage pour servir de référence). Chaque algorithme a tout d'abord été optimisé individuellement, manuellement et automatiquement si possible (i.e. paramétrage automatisée de CWT dans *xcms* par IPO(6) et Autotuner(7)). Les résultats obtenus suite à ces paramétrages optimisés ont été comparés entre eux. Cette comparaison a été effectuée sur cinq critères : la fréquence de détection, le temps de calcul, la facilité d'implémentation, la répétabilité de l'intégration automatique, et la significativité de la détection (i.e. résultat du t-test comparant les aires associées aux composés dopants entre les échantillons dopés et non-dopés).

Dans un premier temps, il a été démontré que l'utilisation d'outils automatisés de paramétrage des algorithmes de détection et intégration des pics, initialement développés pour la métabolomique (i.e. caractérisation de marqueurs biologiques endogènes, souvent plus abondants), n'était pas adaptée aux applications en exposomique (i.e. caractérisation de marqueurs issus d'exposition environnementale, souvent peu abondants). Ainsi, le paramétrage suggéré par IPO, basé sur les pics jugés " fiables " a résulté en une largeur de pic trop élevée (30.7 s), car il base sa notion de fiabilité sur les composés les plus abondants. Ce paramétrage a mené à une détection de moins de 30% des composés dopés dans les deux matrices. A l'inverse, l'outil Autotuner a suggéré une largeur de pic trop faible ($<$ 10 s), menant ainsi à une scission excessive des pics détectés, et donc à une mauvaise performance en répétabilité ($<$ 20% des composés avec une répétabilité satisfaisante). L'optimisation manuelle a donc été préférée dans le cadre de l'application considérée. Il a, dans un second temps, été constaté que l'optimisation individuelle des outils permettait d'augmenter la fréquence de détection des composés de 25 à 85% (*xcms*). En effet, certains paramètres comme la largeur de pic et le niveau de bruit généralement proposés par défaut ne sont pas optimisés pour les pics moins abondants, et doivent donc être réduits. De plus, bien que les outils open source permettent d'avoir plus de visibilité et de maîtrise sur le choix des algorithmes et des paramètres utilisés, ils nécessitent une meilleure connaissance technique et présentent des temps de calcul 4 à 16 fois plus long que les logiciels vendeurs. L'algorithme ADAP, décrit comme étant particulièrement efficace pour éliminer les faux positifs comparé à l'algorithme CWT(8), a en effet permis d'obtenir les meilleurs résultats en fréquence de détection des composés dopés (98%), répétabilité de l'intégration automatique (98%), et significativité de la détection (p-value $<$ 10-4), mais le moins bon résultat en temps de calcul (18h contre une dizaine de minutes pour Markerview).

En conclusion, tous les algorithmes ont permis d'obtenir des performances satisfaisantes en termes de fréquence de détection, de répétabilité et de significativité de détection après optimisation. Il demeure cependant nécessaire de continuer à optimiser ces outils de traitement des données issues de la SMHR, car aucun algorithme n'a permis de détecter tous les composés dopés identifiés manuellement. La compréhension des limites de l'étape de production de la matrice d'ions est cruciale pour envisager d'appliquer les méthodes non-ciblées à large échelle comme c'est le cas pour le projet Eglantine, pour parvenir à une quantification relative fiable des composés corrélés au vieillissement cérébral.

(1) C. P. Wild, " Complementing the Genome with an "Exposome": The Outstanding Challenge of Environmental Exposure Measurement in Molecular Epidemiology ", *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 14, no 8, p. 1847-1850, août 2005, doi: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0456.

(2) J. Chaker, E. Gilles, C. Monfort, C. Chevrier, S. Lennon, et A. David, " Scannotation: A Suspect Screening Tool for the Rapid Pre-Annotation of the Human LC-HRMS-Based Chemical Exposome ", *Environ. Sci. Technol.*, nov. 2023, doi: 10.1021/acs.est.3c04764.

(3) A. David *et al.*, " Towards a comprehensive characterisation of the human internal chemical exposome: Challenges and perspectives ", *Environment International*, vol. 156, p. 106630, nov. 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106630.

(4) C. A. Smith, E. J. Want, G. O'Maille, R. Abagyan, et G. Siuzdak, " XCMS: Processing Mass Spectrometry Data for Metabolite Profiling Using Nonlinear Peak Alignment, Matching, and Identification ", *Anal. Chem.*, vol. 78, no 3, p. 779-787, févr. 2006, doi: 10.1021/ac051437y.

(5) T. Pluskal, S. Castillo, A. Villar-Briones, et M. Orešič, " MZmine 2: Modular framework for processing, visualizing, and analyzing mass spectrometry-based molecular profile data ", *BMC Bioinformatics*, vol. 11, no 1, p. 395, juill. 2010, doi: 10.1186/1471-2105-11-395.

(6) G. Libiseller *et al.*, " IPO: a tool for automated optimization of XCMS parameters ", *BMC Bioinformatics*, vol. 16, no 1, p. 118, avr. 2015, doi: 10.1186/s12859-015-0562-8.

(7) C. McLean et E. B. Kujawinski, " AutoTuner: High Fidelity and Robust Parameter Selection for Metabolomics Data Processing ", *Anal. Chem.*, vol. 92, no 8, p. 5724-5732, avr. 2020, doi: 10.1021/acs.analchem.9b04804.
(8) X. Du, A. Smirnov, T. Pluskal, W. Jia, et S. Sumner, " Metabolomics Data Preprocessing Using ADAP and MZmine 2 ", *Methods Mol Biol*, vol. 2104, p. 25-48, 2020, doi: 10.1007/978-1-0716-0239-3_3.

The Asal-Ghoubbet rift in Republic of Djibouti: a playground for comparative planetary remote sensing.

Sylvain Douté * [1], Stéphane Jacquemoud [2], Dung Nguyen Tri [2], Antoine Lucas [2], Cécile Ferrari [2]

[1] Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble – France
[2] Institut de Physique du Globe de Paris – Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France – France

Le rift Asal-Ghoubbet est une région désertique d'intérêt planétaire en Afrique pour sa lithologie ignée (coulées basaltiques et rhyolitiques), son altération hydrothermale, ses dépôts évaporitiques holocènes (gypse et halite) et son lac salé. Les environnements géologiques de ce site sont analogues à ceux de Mars et, dans une moindre mesure, de Mercure et de la Lune. Notre étude s'appuie sur des images hyperspectrales EnMAP de la province physiographique d'Asal-Ghoubbet, mais également sur une séquence de 21 images multi-angulaires acquises par le satellite Pléiades-1B et des données acquises lors d'une campagne expérimentale de terrain au cours de laquelle des paramètres physiques et photométriques ont été mesurés in situ sur 20 sites. Cette étude vise à mieux comprendre la capacité de la télédétection à extraire les paramètres compositionnels et physiques des environnements basaltiques ignés sujets à une activité d'altération dans des conditions très sèches. Elle ouvre également la voie à la recherche en télédétection comparée des surfaces minérales terrestres et martiennes.

*Intervenant

Potogrammétrie subaquatique en rivière pour l'étude et la compréhension des habitats

Guillaume Forget * [1], Olivier Dezerald , Alan Bazin

[1] INRA (INRA) – Institut National de la Recherche Agronomique - INRA – UMR ESE, 65 rue de Saint-Brieuc Bât. 33, CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France, France

La photogrammétrie est une technique de plus en plus utilisée en écologie car elle permet d'obtenir à moindre cout des informations très précises sur la topologie des écosystèmes étudiées. Très utilisée en milieu terrestre, son utilisation sub-aquatique est plus rare et très généralement réalisée en milieux marins ou en milieu très peu turbide. Au sein de l'unité DECOD, nous avons travaillé sur un projet visant à développer la photogrammétrie en rivière afin d'étudier les habitats immergés spécifiques de lamproies. En effet, les connaissances sur l'utilisation du substrat par les juvéniles des migrateurs, en particulier celles de lamproies (ammocètes), restent parcellaires. Ces habitats sont le plus souvent situés dans des zones d'accumulation de sédiments, dans des zones de faibles profondeurs ($<$ 30cm) et assez turbides. Nous avons mis au point un support flottant équipé de 5 caméras synchronisées prenant des photos à pas de temps régulier sur les patchs étudiés. Nos résultats montrent que la technique de photogrammétrie a été déployée avec un taux de réussite de 63%. Ce pourcentage de réussite, tout comme les densités des lamproies au sein des banquettes et la composition des communautés de macroinvertébrés benthiques étaient variables dans l'espace (i.e., différents cours d'eau) et dans le temps (i.e., différentes périodes d'échantillonnage). La photogrammétrie a permis de générer, avec une précision millimétrique, des descripteurs statistiques et empiriques des variations surfaciques des banquettes. Ces résultats sont intégrés dans un modèle prédictif de présence de lamproies dans un patch. Nous montrons que l'utilisation de la photogrammétrie peut permettre une meilleure compréhension de ces habitats et présente l'avantage d'être non destructive contrairement aux méthodes classiques utilisées actuellement pour le suivi de ces populations.

*Intervenant

PRISMA and EnMAP radiometric calibration/validation studies at CNES

Camille Desjardins * [1], Damien Rodat [1], Robin Marron [1], Thierry Erudel [2], Aimé Meygret [1]

[1] CNES – Centre National d'Etudes Spatiales - CNES (Toulouse, France) – France
[2] CS GROUP – CS Group - SI Toulouse [France] – France

Radiometric calibration is crucial for providing a physical meaning to the digital values acquired by a satellite. Only values converted into radiances can be easily used downstream because radiances values are independent from the acquisition mean. The calibration activities contribute to the data quality obtained through optical remote sensing and make it possible to combine measurements from various instruments. Radiometric calibration and validation of hyperspectral imaging instruments raise significant challenges due to their numerous bands and wide spectral range.
Over the last two decades, using the SADE/MUSCLE calibration system (1), CNES has calibrated and cross-calibrated a wide range of multispectral imagers, including SPOT1 to 7, MERIS, Pleiades, Pleiades-Neo, POLDER, VENμS, Sentinel-2 MSI, Sentinel-3 OLCI & SLSTR, ... Additionally, CNES is involved in the radiometric validation of various systems through its multispectral photometers (2) located at La Crau and Gobabeb as part of the RadCalNet network (3).

This poster will showcase the main radiometric calibration/validation results obtained by CNES on current hyperspectral imaging systems. A cross-calibration exercise was performed on desert targets (4), comparing PRISMA and EnMAP hyperspectral imagers with widely used reference sensors such as Sentinel-2 and Sentinel-3. These results are also complemented by the analysis of satellite measurements over the La Crau and Gobabeb sites where the in-situ instrumentation gives reference radiances for radiometric validation purposes.

References :

(1) Cabot F., O. Hagolle, C. Ruffel, P. Henry, Remote Sensing Data Repository for In-Flight Calibration of Optical Sensors over Terrestrial Targets, Proceedings of SPIE, 3750, Denver, 1999.

(2) Meygret, A.; Santer, R.; Berthelot, B. ROSAS: A robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration. In Proceedings of the Earth Observing Systems XVI, San Diego, CA, USA, 13 September 2011.

(3) Bouvet, et al. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range. Remote Sens. 2019, 11, 2401
(4) Lacherade, S. & al, Cross Calibration Over Desert Sites : Description, Methodology, and Operational Implementation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol51, no. 3, pp. 1098 – 1113, 2013

*Intervenant

Cartographie multi-échelle de l'état de vergers par acquisitions drone multimodales

Nathan Sikora * [1], Sylvain Jay [2], Karine Adeline *

1

[1] DOTA, ONERA [Toulouse] – ONERA – France
[2] Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes – Avignon Université, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement – France

Mots clés : Vergers, drone, hyperspectral, LiDAR, polarisation

Face à la croissance démographique mondiale, l'un des enjeux cruciaux de notre époque est l'approvisionnement alimentaire. Ce défi implique de concilier une production suffisante et de qualité, des pratiques durables et une économie viable, et ce, dans un contexte de réchauffement climatique. Dans les vergers, les pratiques agroécologiques telles que l'optimisation de la gestion des intrants (fertilisation, pesticides, irrigation) et la sélection de variétés résilientes apportent des réponses à ce défi en permettant de mieux faire face aux stresses biotiques (maladies et ravageurs) et abiotiques (stress hydrique, stress azoté).
Afin d'évaluer l'état et le fonctionnement des vergers de manière non destructive et à haute répétitivité temporelle, une solution est le recours à des données de télédétection optique accessibles à différentes échelles spatiales, de l'individu à la parcelle. En effet, elles permettent de remonter aux propriétés biochimiques (pigments, contenu en eau...) et structurelles qui sont reliées à l'activité physiologique (photosynthèse, transpiration). À partir d'acquisitions aéroportées/satellitaires, ayant des résolutions spatiales (déca)métriques, l'échelle de l'arbre individuel n'est pas toujours atteignable, mais si c'est le cas, il est possible d'étudier la variabilité inter-individus au sein d'un verger. Avec l'essor d'acquisitions drone à l'échelle centimétrique voire millimétrique, on a maintenant accès à une richesse d'informations à l'échelle feuille qui nous permet de passer à la variabilité intra-individu, ce qui peut permettre des traitements spatialisés plus adaptés à chaque arbre. Certaines problématiques qui en découlent sont : l'efficacité des post-traitements pour faire de la fusion de données à partir d'acquisitions provenant de différents capteurs, la prise en compte des effets directionnels (anisotropie des propriétés optiques foliaires, répartition angulaire des feuilles et des autres éléments de la couronne d'un arbre), et la construction de modèles pertinents entre les métriques optiques de télédétection et les variables de végétation observées.

L'objectif de cette nouvelle thèse est d'évaluer l'apport de données multimodales drone pour une meilleure caractérisation de l'état sanitaire et nutritionnel des arbres en verger. Des vergers de pêchers et d'abricotiers seront survolés par des drones à voilure tournante équipés d'une caméra hyperspectrale, d'une caméra multispectrale polarisée et d'un LiDAR-3D. La démarche se déroule en trois étapes pour affiner la précision d'estimation des propriétés biochimiques foliaires :

• Évaluation avec des données hyperspectrales : appui sur des méthodes d'inversion avec des approches empiriques (type machine learning) et hybrides (en utilisant des codes de transfert radiatif à l'échelle de la feuille), ces résultats serviront de référence puisqu'ils ne corrigent pas

*Intervenant

des effets directionnels.
• Évaluation de l'apport de données LiDAR : prise en compte de métriques angulaires pour corriger les effets directionnels dans les deux approches d'inversion précédentes.
• Évaluation de l'apport de données polarimétriques : calcul du degré linéaire de polarisation (DOLP) et de la réflectance non polarisée pour une meilleure prise en compte des effets directionnels et ainsi potentiellement, une meilleure estimation des traits en s'affranchissant des effets directionnels de surface.

Préalablement à l'échelle terrain, des travaux sont en cours de réalisation en conditions maîtrisées afin d'obtenir une première calibration des méthodes d'inversion, tant empiriques que hybrides, à partir de données hyperspectrales acquises en laboratoire. Un jeu de données a été constitué à partir de 155 feuilles prélevées sur 39 rameaux en vergers d'abricotiers (INRAE Bellegarde) et de pêchers (INRAE Avignon). La réflectance et transmittance directionnelle-hémisphérique des feuilles ont été mesurées à l'aide d'un spectroradiomètre Perkin Elmer (400-2500 nm). Ces données ont été complétées de mesures de certains traits biochimiques (SPAD, contenu en eau et matière sèche, ...). A l'échelle du rameau, les teneurs pigmentaires (chrolophylles, caroténoïdes, composés phénoliques) et le contenu azoté ont été également mesurés. Ensuite à partir de ce jeu de données, la méthodologie pour estimer les différentes variables biochimiques s'appuiera sur (1) et se déclinera selon : (i) une méthode empirique basée sur la *Partial Least Square Regression* (PLSR), (ii) une méthode physique via l'inversion itérative des modèles de transfert radiatif foliaire PROSPECT-D (2) et PROSPECT-PRO (3), et (iii) une méthode hybride qui combine les deux précédentes. Les premiers résultats seront présentés dans ce poster.

La mise à l'échelle de ces travaux en conditions extérieures viendra à partir des futures acquisitions drone prévues cette année. D'autres types de données pourront alors être évalués en complément de celles hyperspectrales. Ces travaux sont financés par l'ANR CANOP (ANR-22-CE04-0002).

(1) Gaubert, T.; Adeline, K.; Huesca, M.; Ustin, S.; Briottet, X. Estimation of Oak Leaf Functional Traits for California Woodland Savannas and Mixed Forests: Comparison between Statistical, Physical, and Hybrid Methods Using Spectroscopy. Remote Sens. 2024, 16, 29. https://doi.org/10.3390/rs16010029

(2) Féret, J. B., Gitelson, A. A., Noble, S. D., & Jacquemoud, S. (2017). PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. Remote Sensing of Environment, 193, 204-215.
(3) Féret, J. B., Berger, K., De Boissieu, F., & Malenovský, Z. (2021). PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents. Remote Sensing of Environment, 252, 112173.

EDAPHOS - Utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation et le suivi de sols contaminés phytostabilisés en Europe

Solofoniaina Andriamihajason * [1,2], Sophie Fabre [1], Colette Badourdine [1], Guillaume Bertrand [2], Julien Parelle [2], Michel Chalot [2,3,4]

[1] Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales – ONERA (DOTA) – France
[2] Laboratoire Chrono-environnement (UMR 6249) – Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Franche-Comté – France
[3] Université de Franche-Comté – Université Bourgogne Franche-Comté – France
[4] Université de Lorraine – Université de Lorraine – France

Coordonné par l'Université de Bourgogne Franche-Comté, le projet Horizon-Europe EDAPHOS (2023-2027) a pour objectif de mettre en œuvre des technologies innovantes de suivi des sols pollués et de restauration basée sur la Nature associée à une stratégie de valorisation commerciale (1). Ce projet entre ainsi dans la perspective de l'Union Européenne d'avoir des sols sains d'ici 2050 avec des actions concrètes à l'horizon 2030. Le projet rassemble un consortium européen formé de 2 partenaires académiques (FR, IT), 5 instituts de recherche (GR, ES, FR, PO), 4 PME (FR, DE, GR) et une grande entreprise (ES) (2).

EDAPHOS s'articule autour de 2 grands axes de travail :

> Mise en œuvre du phytomanagement sur 7 sites d'étude en Europe (ES, FR, GR, IT, PO). Le phytomanagement est un cortège de solutions basées sur la nature (phytostabilisation, phytoextraction, etc.) qui consiste à implanter une végétation spécifique pour maitriser et/ou de limiter le flux de contaminants afin de les immobiliser dans le sol ou de les accumuler dans la biomasse. Dans ce cadre, le peuplier (*Populus sp.*) tolérant aux ETM (Eléments Traces Métalliques) a été choisi pour la phytoextraction des différents sites (3).Optimisation du suivi des sols contaminés et de la végétation en développement par télédétection optique en combinant des informations multi-échelles, hyper-(multi-)spectrales et multitemporelles.

Dans le cadre de ce projet, des images hyperspectrales aéroportées seront acquises, sur 3 des 7 sites en 2024 et 2025, compte tenu de leur fort potentiel pour la caractérisation de la pollution du sol de surfaces végétalisées (4) ; en particulier sur des sites industriels et miniers (5-7). Ces acquisitions de l'ordre de 50 cm de résolution spatiale seront réalisées sur :

- Le site de Vieux-Charmont dans la Région Bourgogne-Franche-Comté (FR) contaminé par des métaux lourds (Zn, Pb, Cd, As, Cu, Ni, Cr, Hg) et des hydrocarbures aromatiques

*Intervenant

polycycliques (8) (Figure 1 (a)). Sur ce site, des travaux de thèse ont démarré fin 2023 dans le but de mettre en place une méthode de quantification à l'échelle infra-individu et de suivi de la contamination à l'échelle locale de friches industrielles à partir de données de télédétection optique passive multi-échelles à très hautes résolutions spatiales (50 cm pour les images hyperspectrales et de 10 cm à 20 m pour les images multispectrales). Au préalable, les traits des peupliers sensibles à la contamination du sol et corrélés à la réponse spectrale seront évalués dans le cadre d'une expérimentation ;

- La mine de Riotinto dans le Sud-Est de la péninsule ibérique (ES), zone fortement contaminée aux métaux lourds (Pb, As, Zn, Cd, Cu, Mn, Hg) liés aux drainages miniers acides (Figure 1 (b)) ;
- La mine péri-urbaine de Kozani en (GR), zone qui présente notamment une concentration de Ni vingt fois supérieure à la normale.

Ces données seront complétées par des mesures contextuelles des sols et de la végétation en lien avec la contamination (niveaux de contamination des sols et de la végétation, texture du sol, pigments foliaires...). De plus, des acquisitions avec une caméra multispectrale VIS-NIR à très haute résolution spatiale (centimétrique) seront réalisées et des images hyperspectrales satellitaires (PRISMA, EnMAP) seront exploitées.

Sur la base de ces suivis, EDAPHOS propose, grâce à l'intelligence artificielle, une méthodologie d'analyse systématique des sites contaminés aux ETM et de leur phytostabilisation dans un modèle de planification spatiale.

Mapping soil organic carbon content by combining time series of Sentinel-2 and Sentinel-1 with vis-NIR laboratory spectra – Application to study site in Brittany (France)

Youssef Fouad * [1], Hayfa Zayani [1,2,3], Didier Michot [1], Emmanuelle Vaudour [4], Nicolas Baghdadi [5], Zeineb Kassouk [3], Zohra Lili-Chabaane [3], Christian Walter [1]

[1] SAS, Institut Agro, INRAE, 65 Rue de St Brieuc, 35000, Rennes, France – Institut Agro INRAE – France
[2] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR EcoSys, 91120 Palaiseau, France – Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech – France
[3] Université de Carthage,Institut National Agronomique de Tunisie,LR GREEN-TEAM, 43 Avenue Charles Nicolle, Tunis 1082, Tunisia – Tunisie
[4] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR EcoSys, 91120 Palaiseau, France – Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech – France
[5] CIRAD, CNRS, INRAE, TETIS, Université de Montpellier, AgroParisTech, CEDEX 5, 34093 Montpellier, France – CIRAD, CNRS, INRAE, TETIS, Université de Montpellier, AgroParisTech – France

Mapping Soil organic carbon (SOC) is essential for continuous monitoring of its spatial and temporal dynamics. In this study, we developed a method using time series of Sentinel-2 (S2) data combined with Sentinel-1 (S1) and vis-NIR laboratory spectra to map SOC content of agricultural soils. The study site, located in Brittany (northwest France), is an agricultural area of 1.5 km^2. Soil samples were collected from agricultural fields within this site, their SOC content measured and their spectra recorded under laboratory conditions. The SOC content ranged from 15.2 to 49.4 g.kg-1. Deep neural network algorithms were implemented after dividing the data set built up from the time series of S2 and S1 images into calibration (70%) and validation (30%) sets. Three random draws of the validation sets were performed to assess model robustness. Four approaches were tested: (1) models developed using S2 bands as a single input, (2) applying multiple factor analysis (MFA) to select 12 of 40 indices calculated from S2 data and adding them to the S2 bands, (3) adding soil moisture derived from the time series of S1 (SM1), and (4) gradually adding five indices calculated from laboratory spectra, in descending order of their correlation with SOC. Model performance was compared based on validation results, and semi-variograms for observed and predicted SOC were then used to analyze the maps generated. Results showed that only models using approach 4 were validated (RPIQ = 1.78±0.19 - 3.07±0.6). The addition of SM1 improved model robustness since predictive performance remained stable over the 3 random draws of the validation sets. In approach 4, laboratory indices showed significant correlations with SOC content. Thus, we were able to validate our models once we added the two indices with the highest correlation. Semivariograms of the predicted values showed lower sill-to-nugget ratios but similar shapes to the observed values. Finally, the developed method allowed us to map 70% of the area of the study site.

*Intervenant

Projet BioEOS – Estimation et suivi de la biodiversité côtière à large échelle à partir de l'imagerie multi et hyperspectrale

Touria Bajjouk * [1], Théodore Bloch [1], Malik Chami [2], Mauro Dalla Mura [3], Lucas Drumetz [4], Jean-Baptiste Feret [5], Thomas Germain [6], Antoine Huguet [7], Antoine Lavrard-Meyer [1], Sophie Loyer [8], Audrey Minghelli [9], Pascal Mouquet [6]

[1] Dynamiques des Ecosystèmes Côtiers (DYNECO), Laboratoire d'Ecologie Benthique Côtière (LEBCO) – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) – France
[2] Laboratoire Lagrange, Université Cote d'Azur, Observatoire Cote d'Azur, CNRS – Sorbonne Universités, UPMC, CNRS – France
[3] Gipsa Lab, Grenoble INP, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – Université de Grenoble-Alpes – France
[4] Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (Lab-STICC), IMT Atlantique – Université Bretagne Loire (UBL) – France
[5] UMR TETIS – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) – France
[6] Espace-Dev, IRD – Université de La Réunion, Université de Montepellier, Université de Guyane, Université des Antilles, Université de la Nouvelle Calédonie – France
[7] Service Valorisation de l'Information pour la Gestion Intégrée et la Surveillance (VIGIES) – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) – France
[8] Shom – Ministère des Armées – France
[9] Laboratoire d'Informatique et Système (LIS) – Université de Toulon – France

La biodiversité est un capital naturel agissant sur les fonctions des écosystèmes et qui fournit des services et des avantages importants, allant des besoins alimentaires au patrimoine culturel. Cependant, les espèces disparaissent actuellement à un rythme 100 à 1000 fois supérieur au rythme naturel.
Bénéficiant du label SCO (Space Climate Observatory), le projet BioEOS propose de développer un outil d'observation permettant de fournir des données (i) d'une part pour caractériser, via des proxys, la dynamique spatio-temporelle de la biodiversité côtière en analysant les séries temporelles d'images satellitaires multi-capteurs (multi et hyperspectraux) et (ii) d'autre part, pour cartographier les changements et produire des indicateurs pour rendre compte de l'impact des changements globaux sur l'état de la biodiversité côtière.

Une stratégie de développement pour optimiser l'extraction de l'information recherchée a été mise en place pour l'élaboration d'un démonstrateur sur les territoires du sud-ouest de l'Océan Indien. Nous présenterons les premiers résultats qui concernent les volets suivants :

- Fusion de données satellitaires issues des différents systèmes exploités pour augmenter le potentiel de discrimination spectrale en utilisant des approches basées sur les algorithmes de pan-sharpening (Gram-Schmidt, Gram-Schmidt Adaptatif, PCA et Brovey).
- Traitements réalisés sur la base des algorithmes déjà éprouvés par la communauté scientifique (inversion d'un modèle de transfert radiatif, segmentation par apprentissage profond, démélange

*Intervenant

et indices spectraux) permettant de générer des informations sur la bathymétrie, les types de fond et la qualité des masses d'eau.

Déploiement à large échelle d'imageurs spectraux miniatures de terrain pour le suivi du couvert végétal et des rivières dans TERRA FORMA

Silvère Gousset * [1], Philippe Choler [2], Cédric Legout [3], Sylvain Douté [4]

[1] Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble, Université Grenoble Alpes – France
[2] Laboratoire d'Ecologie Alpine – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes – France
[3] Institut des Géosciences de l'Environnement – Centre National de la Recherche Scientifique, Université Grenoble Alpes – France
[4] Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble – France

TERRA FORMA est un programme national de l'ANR (https://terra-forma-web.osug.fr/) qui a pour ambition d'équiper avec des instruments de nouvelle génération les observatoires in situ de l'environnement des réseaux et infrastructures de recherche RZA et OZCAR (*Réseau Zones Ateliers* et *Observatoires de la Zone Critique*). Une partie conséquente du projet est dédiée au développement et au déploiement à large échelle d'instruments innovants sur des disciplines très variées et complémentaires, allant de l'écologie à l'hydrologie, en passant par l'éthologie et la biologie.
Technologie clef pour l'étude de la dynamique des surfaces, l'imagerie spectrale est l'objet d'un de ces développements instrumentaux. Elle est indispensable pour contraindre et paramétrer les modèles de surface et les modèles hydrologiques. Les enjeux scientifiques ainsi considérés sont i) la caractérisation du manteau neigeux ou des surfaces glacées, ii) l'étude du transport sédimentaire dans les bassins versant par la caractérisation spectro-colorimétrique déportée des rivières, iii) l'étude des propriétés fonctionnelles des couverts végétaux (phénologie, teneur en eau, en azote et activité pigmentaire), et iv) la caractérisation de la dynamique des assemblages d'espèces.

TERRA FORMA prévoit à l'horizon 2029 le déploiement à large échelle de 15 à 20 de ces imageurs sur les observatoires identifiés. Ce déploiement in situ doit venir complémenter les mesures satellitaires en apportant une résolution spatiale plus importante (jusqu'à une résolution centimétrique), sur des aires plus restreintes tels que des petits bassins versants, des cours d'eau, ou encore des placettes d'étude de la biodiversité. Il doit permettre en outre une couverture temporelle plus dense des mesures, moins dépendante de la couverture nuageuse, sur des horizons temporels inter-saisonnier et interannuel. Enfin, conçu comme un observatoire de l'environnement, TERRA FORMA ouvre la possibilité d'intégrer ces mesures dans un réseau d'instruments complémentaires, permettant de renforcer les connaissances sur la phénologie des milieux observés et leurs propriétés fonctionnelles.

Les imageurs développés doivent pouvoir être opérés sur le terrain par un utilisateur nomade pour des mesures ponctuelles, mais également sous drone pour réaliser des mesures cartographiques, ou

*Intervenant

encore depuis une station fixe pour des suivis long terme. Ces contraintes opératoires requièrent donc des instruments à la fois une compacité et une robustesse importante, mais également une haute cadence d'acquisition et un processus d'acquisition compatible avec le défilement d'un drone. L'opération en station fixe autonome introduit quant à elle la nécessité d'automatiser la chaine d'acquisition, de traiter localement une partie des données, et d'assurer une certaine frugalité dans la consommation électrique et le volume de données générées.

L'IPAG développe ainsi dans le cadre de TERRA FORMA une caméra hyper-spectrale compacte et snapshot, adaptée à la mesure de signatures spectrales en réflectance dans les domaines visibles à proche infra-rouge (400-1000 nm). Cette caméra repose sur un principe imageur à division d'ouverture, qui a été exploré pour la thématique du sondage atmosphérique des gaz à effet de serre sur l'instrument NanoCarb (1), mais également pour la surveillance de l'activité solaire depuis l'espace (2). Le concept d'échantillonnage interférométrique de NanoCarb a été ici mis de côté, au profil d'un filtrage spectral à plus basse résolution, afin d'assurer la précision radiométrique sur les spectres large bande restitués. La caméra est ainsi constituée de l'association d'une matrice de mini-lentilles et de mini-baffles internes à des filtres, montées directement sur le détecteur. Il en résulte un instrument très simple optiquement, modulable en bande spectrale et résolution, mais également robuste, compact ($<$ 500 g) et snapshot, sans partie mobile ou nécessité de balayer la scène. Un premier prototype a été réalisé en 2021 sur un détecteur CMOS de Pyxalis de 3 Mpixels, permettant d'obtenir 319 canaux spectraux de 440 à 800 nm, avec une résolution spectrale de 5 à 10 nm, pour un champ de vue de 12$\circ$ sur une image de 96 pixels de côté. Un nouveau prototype est en cours d'intégration, favorisant les caractéristiques spatiales de l'image, et permettant d'avoir 365 par 200 pixels dans l'image sur 22 par 12$\circ$ de champ, sur 42 canaux spectraux de 440 à 800 nm. Des développements sont également en cours sur un détecteur de plus de 20 Mpixels, permettant d'envisager des images de 500 par 500 pixels, avec une résolution nanométrique.

Plusieurs problématiques liées au traitement et à l'exploitation des données sont actuellement explorées dans le cadre de ce développement instrumental, des niveaux les plus bas jusqu'aux données élaborées.

- Premièrement, le multiplexage de l'information spectro-spatiale sur le détecteur en une acquisition unique nécessite une recombinaison des canaux spectraux sur le champ de vue, afin de reconstruire un cube hyper-spectral. Il en résulte plusieurs contraintes sur la calibration de la réponse spectrale et géométrique de l'instrument et sur la connaissance de la radiométrie du détecteur, tel que cela a par exemple été exploré pour des concepts interférométriques dans (3).

- Ensuite, la normalisation des mesures par le flux solaire incident pour remonter à une réflectance, nécessite l'intégration à la chaine d'acquisition de radiomètres additionnels ou de cibles de référence. Il apparait également dans certain cas la nécessité de pouvoir distinguer les réflexions directes de la contribution diffuse de l'atmosphère. Cette distinction se complique en cas de couverture nuageuse importante.

- Enfin, la restitution de paramètres d'intérêt scientifique nécessite l'intégration de modèles physiques à la chaine de traitement. Un modèle tel que Prosail (4) semble adapté à la résolution spectrale des instruments développés, donnant accès à une quantification de la concentration pigmentaire des couverts végétaux, ou encore à des paramètres d'activité tel que le LAI. Ce modèle est par ailleurs léger et peut être embarqué sur le terrain. Ce type de modèle est moins répandu pour l'étude colorimétrique déportée des rivières, et plus compliqué à mettre en œuvre. Il s'agit alors plutôt dans un premier temps d'appliquer des modèles de mélanges (5) à l'imagerie spectrale, qui vient alors complémenter les relevés in situ.

L'intégration du prototype de terrain présenté ci-dessus est actuellement en cours, réalisée parallèlement au développement du logiciel de pilotage/acquisition/traitement embarqué. Des tests terrains sont prévus pour l'été 2024 au Lautaret (station ICOS) et sur la station hydrologique Isère-Campus. Une intégration en station fixe sur ces deux plateformes est a priori possible dès la fin 2024.

Références :

(1) Gousset, S., Croizé, L., Le Coarer, E., Ferrec, Y., Rodrigo-Rodrigo, J., Brooker, L., & SCARBO consortium http://scarbo-h2020. eu/. (2019). NanoCarb hyperspectral sensor: on performance optimization and analysis for greenhouse gas monitoring from a constellation of small satellites. *CEAS Space Journal*, *11*, 507-524.

(2) Le Coarer, E. P., Richard, L., Robert, E., Rodrigo, J., Sequies, T., Martin, F., .. & Lacipière, J. (2021, June). Optimization of a compact static interferometer based on ImSPOC technology for a wide field polar lights monitoring. In *International Conference on Space Optics-ICSO 2020* (Vol. 11852, pp. 595-608). SPIE.

(3) Picone, D., Gousset, S., Dalla Mura, M., Ferrec, Y., & le Coarer, E. (2023). Interferometer response characterization algorithm for multi-aperture Fabry-Perot imaging spectrometers. *Optics Express*, *31*(14), 23066-23085.

(4) Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada PJ, Asner GP, François C & Ustin SL, 2009. PROSPECT+ SAIL models: A review of use for vegetation characterization. Remote Sensing of Environment, 113:S56–S66. https://doi.org/doi:10.1016/j.rse.2008.01.026

(5) Legout, C., Poulenard, J., Nemery, J. et al. Quantifying suspended sediment sources during runoff events in headwater catchments using spectrocolorimetry. J Soils Sediments 13, 1478–1492 (2013). https://doi-org.sid2nomade-1.grenet.fr/10.1007/s11368-013-0728-9

L'imagerie hyperspectrale pour comprendre le passé : application en sédimentologie et en archéologie pariétale

Kévin Jacq * [1], Maxime Debret [2], Claudia Defrasne [3], Bernard Schmitt [4], Marion Masse [5], Manuel Giraud [5], Damien Fligiel [6], Stéphane Le Mouélic [5], Bernard Fanget [3], Didier Coquin [7], Pierre Sabatier [3], Emilie Chalmin [3], Yves Perrette [3]

[1] SpecSolE – Université Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France, Université Savoie Mont Blanc, LISTIC, F- 74944 Annecy-le-Vieux, France, Envisol, 2-4 Rue Hector Berlioz, 38110 La Tour du Pin, France – France

[2] M2C – Normandie Univ, UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C 76000 ROUEN, France – France

[3] Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne – Université Savoie Mont Blanc, Centre National de la Recherche Scientifique – France

[4] Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble – Centre National d'Études Spatiales [Toulouse], Centre National de la Recherche Scientifique, observatoire des sciences de l'univers de Grenoble – France

[5] Laboratoire de Planétologie et Géosciences [UMR$_C$6112] – $-LeMansUniversit, Universitd'Angers, InstitutNationaldesSciencesdel'Univers, CentreNationaldelaRechercheScie$ $UFRdesSciencesetdesTechniques - -France$

[6] Observatoire des sciences de l'univers Nantes Atlantique – Université d'Angers, Institut National des Sciences de l'Univers, Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM], Centre National de la Recherche Scientifique, IMT Atlantique, Université Gustave Eiffel, Nantes Université – France

[7] Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance – Université Savoie Mont Blanc – France

L'imagerie hyperspectrale est une technologie récente qui gagne en popularité en laboratoire depuis les années 2000 pour les géosciences, ainsi que pour les études patrimoniales et l'histoire de l'art. Pour autant, son utilisation en sédimentologie ou en archéologie de l'art rupestre ne date que des années 2010 pour la première, 2020 pour la seconde, et est encore restreinte à quelques groupes de recherche.

Deux objets de ces deux disciplines seront utilisés pour dresser un état des lieux des avancées dans ces domaines. Une carotte sédimentaire du lac du Bourget (France) de 55 cm permet de couvrir 200 ans de sédimentation et donc de variabilités climatiques et environnementales (Jacq et al., 2022). L'abri sous roche d'Otello (Saint-Rémy-de-Provence, France), qui regroupe plus de 300 figures caractérisées par une apparente diversité de matières picturales et de nombreuses superpositions, témoigne d'une fréquentation néolithique du massif des Alpilles (Ve-IIIe millénaire av. J.-C.) (Defrasne et al., 2023; Schmitt et al., 2023).

Des imageurs VNIR (Visible and Near Infrared) et SWIR (Short Wave Infrared) de Specim Ltd. (Finland, sédiments) et de NEO (Nork Elektro Optikk, Norway, abri sous roche) ont été utilisés et permettent de couvrir les gammes spectrales du visible et proche infrarouge. Les dispositifs expérimentaux ont été adaptés notamment pour les illuminants pour tenir compte des spécificités d'acquisition de ces 2 types d'objet (en laboratoire, en extérieur).

*Intervenant

De nombreuses méthodologies d'intelligence artificielle ont été employées sur ce type de données et dépendent des objectifs visés, ainsi que des données complémentaires à disposition dans certains cas. Les approches de modélisation des absorptions caractéristiques avec des indices reposant sur des équations simples (ratio, différence...) sont très utilisées et permettent d'obtenir rapidement des informations qualitatives et généralement bien caractérisées grâce aux longueurs d'onde choisies. L'analyse en composantes indépendantes (ACI) est une méthode qui a fait ses preuves pour démélanger une image en ses sources indépendantes et détecter les caractéristiques majoritaires ainsi que les signatures faibles. Les approches de classification et de régression sont aussi performantes mais nécessitent des données labélisées connues pour l'apprentissage de ces méthodes en vue de leur généralisation à l'ensemble de l'image.

Grace à toutes ces méthodes, différentes problématiques ont pu être traitées pour les carottes sédimentaires et elles peuvent être rassemblées en cinq grandes thématiques : l'état trophique des lacs et des masses d'eau grâce à l'analyse des pigments organiques, les approches source-puits pour le traçages de l'origine des sédiments, les études de la matière organique et de la minéralogie, et la caractérisation des dépôts sédimentaires avec la classification des dépôts événementiels (crues, séismes...) ou saisonniers (lamines). Pour le cas de l'art rupestre, ces méthodes ont permis la découverte de nombreuses nouvelles figures invisibles à l'œil nu, de séparer des figures au sein de superpositions complexes, de découvrir des figures recouvertes par des produits d'altération. De plus, grâce aux classifications des pigments à l'échelle de la paroi, il est possible d'isoler automatiquement différentes peintures et d'envisager la réalisation d'une cartographie des matières picturales permettant d'identifier des regroupements de figures de matières semblables. Ceci constitue une information essentielle à la compréhension des syntaxes graphiques.

A travers ces deux exemples, on voit que l'imagerie hyperspectrale est encore un outil émergent et qu'elle offre de nombreuses possibilités pour affiner la compréhension des processus environnementaux en sédimentologie, ainsi que des systèmes graphiques anciens. Malgré l'application de la méthode à des objets différents, il existe de nombreuses passerelles entre ces disciplines pour mobiliser l'imagerie hyperspectrale dans une compréhension accrue des environnements et sociétés passés.
Ces travaux sont au centre de plusieurs projets, notamment DESTOX pour l'étude des polluants dans les sédiments de la Seine, ou encore MITI SEMIOTIC et ANR SCHEMA pour la caractérisation des parois d'abris ornés.

Détection et caractérisation de la pollution par les plastiques sur la surface continentale

Florian Cavernes * [1], Véronique Achard , Pierre-Yves Foucher , Romain Jatiault , Wolfgang Ludwig , Anne-Leila Meistertzheim

[1] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – ONERA, Université de Perpignan Via Domitia, CEFREM – France

Ces travaux s'inscrivent dans une dynamique de lutte pour la conservation des écosystèmes et de la biodiversité des sols et des océans mises en péril par la pollution des déchets plastiques et autres dérivés pétroliers. Depuis 2015, 6,9 milliards de tonnes de déchets plastiques ont été produits parmi lesquels 79% ne sont pas recyclés et s'accumulent dans des décharges ou dans l'environnement (1). De plus, 80% des plastiques observés dans les océans provient des continents (1). Il est ainsi crucial de pouvoir collecter les plastiques sur terre avant qu'ils n'atteignent les océans en faisant des cartographies des micro (dimension comprise entre 100μm et 5mm) et macroplastiques, en particulier dans les zones d'accumulation. Or, peu d'études sont consacrées à la cartographie des déchets plastiques sur la surface continentale par des moyens de télédétection optique offrant pourtant la possibilité de couvrir de larges zones avec une haute résolution spatiale. Ce manque de littérature s'explique en partie par le fait que les plastiques peuvent être de taille sub-pixellique dans un environnement hétérogène (contrairement aux océans) ce qui complexifie la chaine de traitement.
L'objectif à long terme est de développer une approche multi-échelles permettant de cartographier (détection, quantification, discrimination) la pollution par les micro et macroplastiques sur les surfaces continentales. La méthode de détection s'appuiera sur des données d'imagerie hyperspectrale permettant l'acquisition d'une scène dans un grand nombre de bandes spectrales à haute résolution spatiale. A l'aide de cette technique, il est possible de caractériser les différents types de plastiques de par leurs signatures spectrales respectives liées à leur composition chimique (2, 3). Le choix de l'imagerie hyperspectrale s'appuie sur la diversité des tailles de plastiques (notamment les microplastiques de très petite taille) et sur la diversité des types de plastiques qui ont des spectres similaires à première vue mais qui différent lorsque la résolution spectrale est assez fine (4).

Ce papier s'intéresse à la séparabilité spectrale des différents types de plastique ainsi qu'à la séparabilité des plastiques avec le fond de scène. Pour cela, nous nous sommes basés sur des données spectrales issues de la littérature (3, 5) et acquises à l'ONERA. De plus, de nouvelles données provenant d'acquisitions en imagerie hyperspectrale en laboratoire sont analysées et présentées. Elles sont acquises à l'aide des deux caméras hyperspectrales HySpex VNIR 1600 et SWIR 320 M-E (Figure 1a) permettant d'avoir des images hyperspectrales avec une résolution spatiale de l'ordre du millimètre et une résolution spectrale de 6nm sur la gamme 0,4 – 2,5 μm. Les paramètres variables de l'expérience sont le type de plastique, leur taille et le fond de scène.

Sur la Figure 1, trois types de plastique (polyéthylène PE, polystyrène PS et polypropylène PP) sont étudiés. Ils sont découpés en carré de trois tailles différentes, 1mm, 2mm et 4mm. Les

*Intervenant

échantillons sont espacés de 2,5cm les uns des autres et disposés par taille en carré de 3 par 3 sur du gravier. Afin de tenir compte des effets de bord, ils sont placés de manière diagonale (Figure 1b). Comme le montre la Figure 1c, les réponses spectrales des types de plastique diffèrent visuellement par la forme des continuums spectraux et la localisation des bandes d'absorptions. L'analyse de ces données hyperspectrales acquises doit permettre d'estimer la séparabilité entre deux types de plastique. De plus, ces données, avec ou sans dégradation spatiale permettront de quantifier la taille minimale de plastique détectable pour une résolution spatiale donnée. On cherchera également à estimer l'abondance de plastique dans chaque pixel. Ces travaux s'appuient sur différents outils d'extraction d'informations comme les méthodes d'indices spectraux, de détection de cibles, d'apprentissage automatique et de démélange spectral.

Références :

(1) Atlas du plastique | Heinrich Böll Stiftung | Bureau Paris-France. (s. d.). https://fr.boell.org/fr/atlas-du-plastique

(2) Kühn, F. et al. (2004). Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. International Journal of Remote Sensing, 25(12), 2467-2473. https://doi.org/10.1080/0143116031000

(3) Garaba, S. P., & Dierssen, H. M. (2018). An airborne remote sensing case study of synthetic hydrocarbon detection using short wave infrared absorption features identified from marine-harvested macro- and microplastics. *Remote Sensing of Environment*, *205*, 224-235. https://doi.org/10.1016/j.rs

(4) Masoumi, H., Safavi, S. M., & Khani, Z. (2012). Identification and classification of plastic resins using near infrared reflectance spectroscopy. https://doi.org/10.5281/zenodo.1076916
(5) Knaeps, E., Sterckx, S., Strackx, G., Mijnendonckx, J., Moshtaghi, M., Garaba, S. P., & Meire, D. (2021). Hyperspectral-reflectance dataset of dry, wet and submerged marine litter. Earth System Science Data, 13(2), 713-730. https://doi.org/10.5194/essd-13-713-2021

Apport de la dimension temporelle pour la reconstruction de fonds d'images hyperspectrales en présence de panaches d'aérosols

Armand Veau * [1], Pierre-Yves Foucher [2], Rodolphe Marion [3], Jean François Leon [4]

[1] CEA/DAM [Arpajon] – Université Paul Sabatier - Toulouse III – France
[2] ONERA / DOTA, Université de Toulouse [Toulouse] – ONERA, PRES Université de Toulouse – France
[3] CEA/DAM [Arpajon] – CEA-LIST – France
[4] Laboratoire d'aérologie – Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, Centre National de la Recherche Scientifique – France

Cette thèse se concentre sur l'analyse des aérosols industriels, qui constituent une part notable des polluants atmosphériques. L'évolution et la diversification des imageurs hyperspectraux et multispectraux satellitaires, comme PRISMA, EnMap et Sentinel-2, améliorent la surveillance globale de ces émissions, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur impact environnemental et sanitaire. La problématique principale est d'établir une méthodologie de traitement d'images satellitaires à haute résolution spatiale (10m) pour évaluer quantitativement les émissions de particules provenant de sources industrielles, ainsi que leurs variations temporelles et les incertitudes associées. L'efficacité des mesures hyperspectrales pour déterminer certaines propriétés des aérosols, telles que l'épaisseur optique des aérosols (AOT) et la distribution en taille, a été démontrée par plusieurs recherches (1), (2), (3). Bien que ces études aient été initialement limitées à des observations aéroportées, la thèse de Gabriel Calassou (4) a élargi cette approche en démontrant la faisabilité d'obtenir ces mêmes propriétés à l'aide d'images satellites hyperspectrale (PRISMA) (5),(6),(7) . Néanmoins, ces travaux se sont limités à un nombre de site (3) et ne prennent pas en compte les aspects temporel sur les sites étudiés . De plus le bilan d'erreur montre une très forte dépendance des résultats à la maîtrise des réflectances de surface sous le panache.

Les travaux présentés ici se focalisent ainsi sur l'analyse de séries multi-temporelles sentinel-2 et PRISMA afin (i) améliorer la reconstruction de la reflectance hyperspectrale de fond (hors panache), (ii) améliorer la détection des panaches et (iii) évaluer la variabilité temporelle des propriétés des panaches. Notre étude se concentre sur le site de la centrale à charbon de Malta (Afrique du Sud, -26.28025 29.14222) , reconnue pour son activité importante. Nous nous appuyons à ce stade sur un jeu réduit de données sans nuages : s'étalant du 26 septembre au 18 octobre 2023, et comprenant quatre images de Sentinel-2 et deux de PRISMA (figure 1-a). Les produits de Sentinel-2 disponibles sont les images en luminance, mais aussi en réflectance corrigées à l'aide de Sen2Cor, contrairement aux images PRISMA disponibles uniquement en luminance. La registration géométrique entre l'ensemble de ces acquisitions hétérogènes sur une même grille régulière de 10 m est ensuite réalisée à partir de l'outil de registration Gefolki (8). . La correction atmosphérique des images PRISMA et Sentinel-2 en luminance a été réalisé par l'outil COCHISE (9). L'accès aux données Sentinel-2 corrigées par Sen2Cor permet d'initialiser

*Intervenant

le modèle d'aérosol de fond utilisé par COCHISE lors de la correction atmosphérique. En se basant sur la méthodologie proposée par Calassou et al (4), la correction atmosphérique via COCHISE est optimisée afin d'obtenir de proche en proche une bonne continuité dans les niveaux de réflectances (tant hyperspectrales que mutlispectrales). Nous montrons alors que la segmentation des zones contaminées par le panache dans les différentes images est alors possible.

La reconstruction du fond se base sur une approche d'unmixing spectral et via l'utilisation la méthode CNMF. Les pôles de mélange sont obtenus en combinant une série temporelle afin en particulier d'exclure les pixels contaminés par le panache comme pôles de mélange hyperspectraux et/ou multispectraux et la méthode VCA (Vertex Component Analysis). Cette méthode permet extraire les pôle de mélanges d'une image multispectrale en trouvant les points extrêmes dans l'espace des données spectrales, qui sont considérés comme des spectres purs de ces pôles. Les poids associés à ces pôles sont estimés pour chaque pixel sous le panache sur la base des images sans panache (pour le pixel considéré) de la série images pour les 2 instruments. Cette méthode permet artificiellement de reconstruire des images en réflectance à haute résolution spatiale (10m) sans panache pour l'ensemble de la série temporelle Sentinel-2 et PRISMA (figure 1-b). Les erreurs de reconstruction sont analysées sur les zones sans panaches.

(1) Deschamps, A. (2012). Caractérisation de panaches industriels par imagerie hyperspectrale (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).

(2) Foucher, P. Y., Déliot, P., Poutier, L., Duclaux, O., Raffort, V., Roustan, Y., ... & Wortham, H. (2019). Aerosol plume characterization from multitemporal hyperspectral analysis. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(7), 2429-2438.

(3) Philippets, Y., Foucher, P. Y., Marion, R., & Briottet, X. (2019). Anthropogenic aerosol emissions mapping and characterization by imaging spectroscopy–application to a metallurgical industry and a petrochemical complex. International journal of remote sensing, 40(1), 364-406.*

(4) Calassou, G. (2022). Télédétection par imagerie hyperspectrale pour la cartographie des émissions de particules d'aérosols dans l'atmosphère (Doctoral dissertation, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)).

(5) Calassou, G., Foucher, P. Y., & Léon, J. F. (2023). Quantifying particulate matter optical properties and flow rate in industrial stack plumes from PRISMA hyperspectral imager. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2023, 1-26.

(6) Calassou, G., Foucher, P. Y., & Léon, J. F. (2021). Industrial plume properties retrieved by optimal estimation using combined hyperspectral and sentinel-2 data. Remote Sensing, 13(10), 1865.

(7) Calassou, G., Foucher, P. Y., & Léon, J. F. (2020). Aerosol plumes characterization by hyperspectral images coupled with sentinel-2 products. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 791-797.

(8) Guillaume Brigot, Elise Colin-Koeniguer, Aurélien Plyer, Fabrice Janez, "Adaptation and Evaluation of an Optical Flow Method Applied to Coregistration of Forest Remote Sensing Images", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations ans Remote Sensing, Volume 9, Issue 7, July 2016

(9) Poutier, L., Miesch, C., Lenot, X., Achard, V., & Boucher, Y. (2002, March). COMANCHE

and COCHISE: two reciprocal atmospheric codes for hyperspectral remote sensing. In 2002 AVIRIS Earth Science and Applications Workshop Proceedings (pp. 1059-0889). Pasadena, CA, USA: Jet Propulsion Laboratory.

Liste des auteurs

Achard, Véronique, 38, 41, 65
Adeline, Karine, 23, 25, 38, 53
Alleaume, Samuel, 23
Andriamihajason, Solofoniaina, 55
Andrieu, François, 11

Badourdine, Colette, 55
Baghdadi, Nicolas, 57
Bajjouk, Touria, 58
Barthez, Marie, 9
Bazin, Alan, 51
Berthelot, Beatrice, 4, 41
Bertrand, Guillaume, 55
BLOCH, Théodore, 58
BOUBANGA TOMBET, STEPHANE, 40
BOURDEL, Sébastien, 43
Bourguignon, Anne, 38
Bourguignon, Sebastien, 13
BRIOTTET, Xavier, 16, 23, 25, 38, 41

Carfantan, Hervé, 15
CARLIER, Thierry, 5
Carreaud, Pierre, 19
Cavernes, Florian, 65
Cavillon, Maxime, 43
Chaize, Brian, 45
Chaker, Jade, 47
Chalmin, Emilie, 63
Chalot, Michel, 55
CHAMBERLAND, Martin, 40
Chami, Malik, 58
Chanthorn, Wirong, 33
Chapkanski, Stoil, 45
Charpenay, Manon, 45
Choler, Philippe, 60
Cogliati, Sergio, 4
Colin, Thomas, 16
Colombo, Roberto, 4
Coquin, Didier, 63
Cruz Mermy, Guillaume, 11

Dall'Amico, Johanna, 7
Dalla Mura, Mauro, 58
David, Arthur, 47
De Boissieu, Florian, 23
de Franchis, Carlo, 18
Debret, Maxime, 63
Debue, Marianne, 23
Defrasne, Claudia, 63
Desjardins, Camille, 5, 52
Dezerald, Olivier, 51
DINH, Trung-Tin, 15
Douté, Sylvain, 50, 60
Druart, Guillaume, 43
Drumetz, Lucas, 58
Drusch, Matthias, 4
Ducasse, Etienne, 38
Démoulin, Romain, 25

Ehret, Thibaud, 18
ERUDEL, Thierry, 52

Fabre, Sophie, 16, 55
Facciolo, Gabriele, 18
Fanget, Bernard, 63
FERET, Jean-Baptiste, 33
Feret, Jean-Baptiste, 23, 58
Fernández Núñez, Ignacio, 7
Ferrari, Cécile, 50
Finociety, Benjamin, 7
flahaut, jessica, 9
Fligiel, Damien, 63
FLIPO, Antoine, 5
Foix-Colonier, Nils, 13
Forget, Guillaume, 51
Fouad, Youssef, 57
Foucher, Pierre-Yves, 65, 67
Frati, Giovanni, 33

Gabriele, Antonio, 7
Garcia, Adrian Leonardo, 7
Gastellu-Etchegorry, Jean-Philippe, 23, 25
Gazzano, Olivier, 43
Germain, Thomas, 58
Giffard-Carlet, Josselin, 23
GILCHRIST, John, 2, 3
Gilles, Erwann, 47
Giraud, Manuel, 63
Godfroy, Julien, 36
Gousset, Silvère, 60

GRANDJEAN, Gilles, 38
Guiotte, Florent, 30
Guyot, Eric, 40

HADDAD, Hanna, 19
Hamann, Clarissa, 7
Hohmann, Audrey, 38
Hovi, Aarne, 28
Huguet, Antoine, 58

Jacq, Kévin, 63
Jacquemoud, Stéphane, 50
Jatiault, Romain, 65
Jay, Sylvain, 53
Jha, Nidhi, 33

Kassouk, Zeineb, 57
Kempf, Jean, 23
Kemrugka, Thantiyaporn, 33
Kolmonen, Pekka, 4

Laaksonen, Jorma, 30
Lacroix, Simon, 15
Lamquin, Nicolas, 7
Lancry, Matthieu, 43
Lavrard-Meyer, Antoine, 58
Le Coz, Pierre, 33
Le Dantec, Valerie, 25
Le Mouélic, Stéphane, 63
Lebedeff, Dimitri, 7
LEFEBVRE, SIDONIE, 25
LEFEVRE-ARBOGAST, Sophie, 47
Legout, Cédric, 60
Lejot, jérôme, 36
Lennon, Sarah, 47
LEON, Jean françois, 67
Lili-Chabaane, Zohra, 57
Limousin, Jean-Marc, 23
Lomwong, Noppawan, 33
Longepierre, Damien, 23
Loyer, Sophie, 58
Lucas, Antoine, 50
Ludwig, Wolfgang, 65

Mairaville, Léa, 45
MARION, Rodolphe, 67
Marionneau, Matthieu, 25
MARRON, Robin, 52
MASSE, Marion, 63
MATOT, Gwennael, 4
Meinhardt, Enric, 18
Meistertzheim, Anne-Leila, 65
Mercier, Audrey, 28
MEYGRET, Aimé, 52
Michot, Didier, 57
Minghelli, Audrey, 58
Monchatre, Hugo, 7
Monmayrant, Antoine, 15
Morel, Jean-Michel, 18
MOUILLOT, FLORENT, 23
Mouquet, Pascal, 58
Mouralis, Damase, 45
Myllymäki, Mari, 28

Nathalang, Anuttara, 33
Neiger, Sacha, 16
NGUYEN Tri, Dung, 50
Nguyen, Sinh Khoa, 7

OUDDA, Laure, 5
Ouerghi, Elyes, 18
Ourcival, Jean-Marc, 23

Paccoud, Théo, 4
Parelle, Julien, 55
Perrette, Yves, 63
PICAULT, Christophe, 19
Piegay, Hervé, 36
Pik, Raphaël, 9
PISTRE, Laurie, 5
PORTE, Matthieu, 44
Pothasin, Pornwiwan, 33

Rautiainen, Miina, 28
Reith, Dominique, 19
Risser, Laurent, 41
RODAT, Damien, 5, 52
Réjou-Méchain, Maxime, 33

Sabater, Neus, 4
Sabatier, Pierre, 63
Samieri, Cécilia, 47
Schmidt, Frederic, 11, 13
Schmidt, Johannes, 7
schmitt, bernard, 63
Schraik, Daniel, 28
Sikora, Nathan, 53
Soulignac, Vincent, 7
STOTER, Hendrik, 19
Sumérot, Romain, 7

Thoreau, Romain, 41
Tixier, Lucie, 4
Todisco, Dominique, 45
Tongsima, Sissades, 33
Tudoroiu, Marin, 4

Vaudour, Emmanuelle, 57
Veau, Armand, 67
Venjean, Nicolas, 6, 35
Vicent Servera, Jorge, 4, 12, 21
Vincent, Grégoire, 23, 33

Wachter, Richard, 7
Walter, Christian, 57
Woodman, McKenzie, 35

Zayani, Hayfa, 57
Zhen, Zhijun, 25

Merci à nos partenaires pour l'aide apportée