



10^e colloque scientifique du Groupe Hyperspectral de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection

Grasse, 5-7 mai 2025



EDITO

Au cours des dernières décennies, la télédétection hyperspectrale a connu un essor considérable dans des domaines aussi variés que l'observation de la Terre, la planétologie ou l'industrie. Les avancées méthodologiques permettent d'accéder à de nombreux paramètres géophysiques, géochimiques ou biochimiques par l'étude des spectres de réflectance continus caractéristiques des surfaces et objets observés dans le domaine optique. En parallèle, les avancées technologiques ont permis le développement de capteurs allant du visible à l'infrarouge thermique ou miniaturisés permettant l'utilisation de drones. Plusieurs missions spatiales sont d'ores et déjà en orbite ou en préparation dans les agences spatiales, permettant de diversifier et d'étendre les applications, tout en lançant de nouveaux défis.

La communauté hyperspectrale française s'est structurée au sein du Groupe Hyperspectral de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (<https://www.sfpt.fr/hyperspectral/>), dont les objectifs sont de fédérer cette communauté à l'échelle nationale, d'assurer sa visibilité sur le plan international et de faciliter les échanges scientifiques. Elle se réunit régulièrement depuis 2011 pour faire le point sur les avancées de l'ensemble de la filière : futurs projets spatiaux nationaux et internationaux, nouveautés en matière d'instruments et de capteurs, progrès des méthodes et des algorithmes pour l'exploitation des données, et validité des résultats.

Après Paris (2011, 2023), Toulouse (2012, 2019), Porquerolles (2014), Grenoble (2016), Brest (2017), Montpellier (2018) et Rennes (2024), nous sommes heureux d'accueillir la 10^e édition du colloque SFPT-GH du 5 au 7 mai 2025 à Grasse dans les locaux du CERGA d'ACRI-ST. Nous remercions chaleureusement nos sponsors institutionnels (CNES, SFPT) et les exposants pour leur soutien financier, ainsi que la société ACRI-ST qui nous accueille dans ses locaux et qui nous a permis d'organiser cet événement dans des conditions optimales.

Le comité d'organisation

Comité d'organisation

Sandrine Mathieu, ACRI-ST

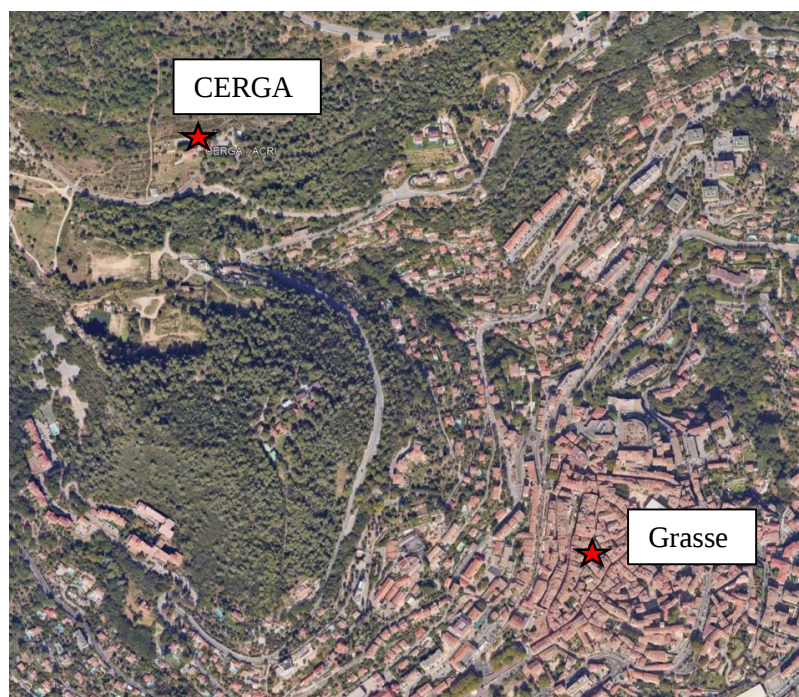
Karine Adeline, ONERA
Camille Desjardins, CNES
Stéphane Jacquemoud, IPGP-UPC

Xavier Briottet, ONERA
Jean-Baptiste Féret, INRAE
Rodolphe Marion, CEA

Accès au colloque

ACRI-ST/CERGA
10 avenue Copernic
06130 GRASSE
<https://www.acri-st.fr/>

Le site n'est pas desservi par les transports en commun. Le comité d'organisation du colloque conseille aux participants de prévoir un véhicule personnel et encourage le covoiturage.



Pour faciliter votre séjour, voici une sélection d'hôtels à proximité :

La Bellaudière	Hôtel du Bosque	Auberge des Toqués
Hôtel Le Flore	Aux Charmes de Grasse	Auberge du Vieux Château
Best Western Plus Elixir		

N'hésitez pas à réserver votre hébergement à l'avance pour garantir votre place.

Sponsors institutionnels



Exposants et sponsors industriels



<https://www.bonsaiadvanced.com/>



Programme court

Lundi 5 mai 2025

13h00-14h00 Accueil-café

14h00 **Discours de bienvenue**

Odile Fanton d'Andon (Directrice d'ACRI-ST)

14h05 **Ouverture du colloque**

Comité d'organisation

Session 1 : Institutionnels et Exposants

14h15 **Présentation de la SFPT et du Groupe Hyperspectral**

Jean-Baptiste Féret (INRAE-Montpellier)

14h25 **Présentation du PNTS**

Karine Adeline (ONERA-Toulouse)

14h35 **L'hyperspectral dans le paysage programmatique du CNES après le SPS2024**

Philippe Maisongrande (CNES-Toulouse)

14h50 **Présentations des exposants (8 min/exposant)**

16h10-16h40 Pause-café

Session 2 : Missions spatiales

Animatrice : Camille Desjardins

16h40 **Présentation invitée**

The Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment: CHIME

Ferran Gascon (ESA/ESRIN-Frascati) & Dimitri Lebedeff (Thales Aliena Space)

17h20 **TRUTHS, a hyperspectral imager and absolute calibration anchor for Earth Observation, in support to Climate action**

Thomas August (ESA/ESTEC-Noordwijk)

17h40 **Planet's Tanager-1 Imaging Spectrometer System Description, Performance Evaluation and Applications**

Pierre Guillevic (Planet Labs-Berlin)

18h00 **The CHIME Observation Performance Simulator (OPSI) Software System**

Nicolas Lamquin (ACRI ST-Grasse)

18h20 **FLEX L2 Processor Prototype : protocole de validation scientifique et premiers résultats**

Théo Paccoud (Magellium-Ramonville-Saint-Agne)

18h40 **MAJIS/JUICE: Instrument description and first in-flight performances**

François Poulet (IAS-Orsay)

19h00-21h00 Visite de l'observatoire ACRISTELLAR et du supercalculateur - Cocktail d'înatoire

Mardi 6 mai 2025

Session 3 : Instrumentation-Méthodologie

Animateur : Karine Adeline

- 9h00 **Classification non supervisée de données hyperspectrales codées**
Trung-Tin Dinh^(e) (IRAP-Toulouse)
- 9h20 **Impact de la qualité du modèle numérique de surface pour la correction géométrique d'images hyperspectrales à très haute résolution spatiale**
Hugo Tardy (ONERA-Toulouse)
- 9h40 **Fast inversion of hyperspectral observations using Gaussian Locally Linear Mapping**
Eric Tatulli (IPAG-Grenoble)
- 10h00 **Mesures radiométriques hyper-spectrales in-situ en Mer Méditerranée et validation automatisé des produits satellitaires PACE-OCI**
Denis Pailler (LOV-Villefranche)

10h20 Présentation orale des posters (3 min/poster)

10h35-11h00 Pause-café

Session 4 : Atmosphère

Animateur : Rodolphe Marion

- 11h00 **Atmospheric Interferogram based retrieval: a new paradigm. A use case of CO vertical column with IASI space interferometer**
Nejla Eco (LATMOS-Paris)
- 11h20 **Airborne Infrared Hyperspectral Methane Detection Limits and Results**
Stéphane Boubanga (Telops-Québec City)
- 11h40 **Methane emission quantification in EnMAP images with deep learning**
Elyes Ouerghi (Centre Borelli-Orsay / CEA-Arpajon)
- 12h00 **Synergie des données multispectrales et hyperspectrales pour la quantification des émissions industrielles d'aérosols**
Armand Veau^(e) (ONERA-Toulouse / CEA-Arpajon)
- 12h20 **Modélisation de panaches de méthane à haute résolution à partir d'images hyperspectrales**
Rakesh Yuvaraj (GSMA-Reims)

12h40-14h00 Déjeuner (buffet)

Session 5 : Milieux littoraux

Animateur : Antoine Mangin

- 14h00 **Approche géométrique de l'inversion du modèle de transfert radiatif par petits fonds**
Mounadi Abdillahi Ali Toihiri (Lab-STICC-Brest)
- 14h20 **Radiométrie hyperspectrale dans l'océan hauturier : de nouveaux robots au service de la validation satellitaire**
Lou Andrès^(e) (LOV-Villefranche-sur-Mer)
- 14h40 **Bathymétrie des petits fonds par couplage hyperspectral/profileur LASER aérien**
Josselin Aval (Hytech-imaging-Brest)
- 15h00 **Atmospheric correction of hyperspectral high-resolution satellite images for inland and coastal waters monitoring: from top-of-atmosphere to phytoplankton identification**
Tristan Harmel (Magellium-Ramonville-Saint-Agne)
- 15h20 **Estimation de l'abondance des habitats benthiques et de la bathymétrie à partir des données hyperspectrales DESIS en eaux peu profondes**
Audrey Minghelli (LIS-Toulon)

15h40-16h20 Pause-café

Session 6 : Posters et rencontre avec les exposants

14h00 – 17h30

Fusion multi-résolution et classification d'images de télédétection hyperspectrales et panchromatiques

Martina Pastorino (Université de Gênes-Gênes)

Modèles génératifs profonds pour la régularisation de l'inversion de panaches à partir d'images satellite

Camille Desjardins (CNES-Toulouse)

Introduction d'un spectroradiomètre de terrain UV-Vis-NIR permettant d'éliminer les incertitudes associées aux calculs du champ de vision et au ciblage d'échantillons

Nicolas Venjean (Spectral Evolution-Haverhill)

18h00-21h00 Parcours pédestre dans Grasse & Visite du musée international de la parfumerie
(Repas sur place)

Mercredi 7 mai 2025

Session 7 : Zone critique

Animateur : Jean-Baptiste Féret

9h00 **An inter-comparison exercise between spectrometers and handheld sensors to assess biochemical traits of orchard tree leaves**

Karine Adeline (ONERA-Toulouse)

9h20 **Détection et caractérisation de la pollution par les plastiques sur les surfaces continentales**

Florian Cavernes ^(e) (ONERA-Toulouse)

9h40 **EDAPHOS - Utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation et le suivi de sols contaminés phytostabilisés en Europe**

Hugo Dorbes (ONERA-Toulouse)

10h00-10h30 Pause-café

10h30 **Etude de l'impact des sources de variabilité sur la caractérisation minéralogique des sols par imagerie hyperspectrale**

Corentin Feray ^(e) (IPGP/CEA-Arpajon)

10h50 **Détection minéralogique et quantification d'argile dans les sols par spectroscopie UV-VIS-NIR**

McKenzie Woodman (Spectral Evolution-Haverhill)

11h10 **Clôture du colloque**

Comité d'organisation

Missions spatiales

TRUTHS, a hyperspectral imager and absolute calibration anchor for Earth Observation, in support to climate action

Thomas AUGUST^{1*}, Nigel FOX², Andrea MARINI¹, John REMEDIOS³

¹ ESA/ESTEC, Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk, The Netherlands, thomas.august@esa.int, andrea.marini@esa.int

² National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington TW11 0LW, UK, nigel.fox@npl.co.uk

³ National Centre for Earth Observation / University of Leicester, Leicester LE4 5SP, UK, jir8@le.ac.uk

Mots-clés : Métrologie, Climat, Calibration

The future ESA Earth Watch mission TRUTHS is establishing an operational 'metrology laboratory in space' for the first time. It will provide benchmark SI-traceable observations in the UV-VIS-SWIR with an order of magnitude higher accuracy than current operational optical missions, enabling institutional and commercial Earth Observation missions to perform and monitor their own calibration.

The TRUTHS versatile dataset and sensor-to-sensor calibration demonstration suit address the needs of Earth Observation systems that cannot embark advanced on-board calibration facilities. The mission is hence perfectly suited for small-satellite constellations that, beyond absolute radiometric accuracy at single-sensor level, do require inter-sensor consistency within their fleets.

TRUTHS will perform spectrally resolved observations of the Earth in the 320-2400 nm range with 2-6 nm spectral sampling, with a maximum spatial resolution of 50 m at an unprecedented radiometric accuracy of 0.3 % ($k=2$). It is explicitly designed to re-calibrate itself in-orbit with direct observations of the Solar irradiance, with the so-called Cryogenic Solar Absolute Radiometer (CSAR). The mission will also acquire Lunar reflected spectra, further establishing lunar calibration models with unparalleled accuracy. All products, incl. Earth, Solar and Lunar data will be made publicly available to the user communities as part of ESA open data policy. The calibration references and the direct measurements of the incoming and reflected energy will be instrumental to Climate monitoring, to shorten the time-to-detect trends in the Earth system, which is another fundamental objective of the mission.

TRUTHS will fly a push-broom high-resolution (50 m) hyperspectral nadir imager (HIS) in a polar non-Sun-synchronous orbit with a 61-day repeat cycle. This orbit will guarantee regular simultaneous nadir observations with Low Earth Orbit (LEO) sensors. TRUTHS can slew in orbit which will also enable simultaneous slanted observations and will allow the characterisation of the top-of-atmosphere radiance and BRDF of invariant natural targets. The cross-calibration of other sensors at SI-standards with TRUTHS fiducial reference data can hence be achieved through direct intercalibration with simultaneous acquisitions as well as by vicarious calibration.

TRUTHS is an ESA Earth Watch mission developed by a large scientific team and an industrial consortium led by Airbus UK, with contributions in Switzerland, Czech Republic, Greece, Romania and Spain. The mission was inceptioned at NPL (UK) in response to challenges highlighted through bodies such as CEOS to address observational needs of GCOS and satellite interoperability. The mission has a target launch date of 2030 and minimal operations lifetime of 5 years with a goal of 8 years.

We will present the mission status and design, the data products as well as the unique sensor-to-sensor calibration opportunities and methodological tools for institutional and commercial user communities.

Planet's Tanager-1 imaging spectrometer system description, performance evaluation and applications

Pierre C. GUILLEVIC^{1*}, Keely L. ROTH², Piers HOLDEN¹, Lexy Ratering ARNTZ¹, Maddie GRADY¹, Caglar SERANAS¹, Geert BARENTSEN², Justin HAAG², Adrian GONZALES¹, Norberto Hernández CASTILLA¹, Venkataraman KRISHNASWAMI¹, Eric PETERS², Saif AATI², Mark KEREMEDJIEV², Annett WANIA¹

¹ Planet Labs Germany GmbH, Kurfürstendamm 22, 10719 Berlin, Germany, pierre@planet.com, piers@planet.com, maddie.grady@planet.com, caglar.senaras@planet.com, adrian.gonzalez@planet.com, norberto@planet.com, venkat@planet.com, annett@planet.com

² Planet Labs PBC, San Francisco, CA 94107, USA, keely.roth@planet.com, geert@planet.com, justinhaag@gmail.com, eric.l.peters@planet.com, saif.aati@planet.com, mark.keremedjiev@federal.planet.com

Mots-clés : Tanager, Instrument performance, Surface reflectance retrieval, Soil characterization

In August 2024, Planet launched Tanager-1, a Visible to ShortWave InfraRed (VSWIR) imaging spectrometer designed by NASA's Jet Propulsion Laboratory and coupled to Planet's common smallsat bus. The hyperspectral system is the first in a constellation planned by the Carbon Mapper Coalition, a public-private partnership aimed at detecting large methane and carbon dioxide plumes. Tanager-1 is a Dyson-type spectrometer designed to measure radiance from 380 to 2500 nm with 5 nm sampling. The target signal-to-noise ratio is 300-600 in the methane absorption feature near 2350 nm using the maximum sensitivity mode under reference conditions. The target ground sampling distance and swath width are 30-35 m and 18 km, respectively. The mission is a tasking constellation, i.e., areas of interest and acquisition dates are determined by the user. We will present the results of on-orbit calibration validation efforts and the assessment of the system performance and surface reflectance retrieval algorithm.

While the flagship use case for the mission is methane plume detection, data will be available for the broad range of applications that hyperspectral remote sensing data support, such as mapping minerals, soil and vegetation characterization, water quality, and urban mapping. As part of the Horizon Europe AI4SoilHealth project, we are evaluating the ability of Tanager-1 to map agricultural soil properties (e.g. soil texture, soil organic carbon, hydrological properties). The methodology is based on (1) laboratory spectroscopy measurements from the pan-European LUCAS dataset and the coupling of radiative transfer models and the sensor noise function to simulate Tanager-derived surface reflectance for different atmospheric and vegetation conditions, and (2) the use of artificial intelligence to link the surface spectra to field-based soil physical and chemical properties. Eleven pilot sites across Europe covering a wide range of soil properties are used to assess the scalability of the soil model and its limitations. Comparison with models based on multispectral data from Sentinel-2 and PlanetScope clearly demonstrates the value of hyperspectral data.

The CHIME Observation Performance Simulator (OPSI) software system

Nicolas LAMQUIN^{1*}, Benjamin FINOCIETY¹, Romain SUMEROT¹, Sinh Khoa NGUYEN¹, Meriem CHAKROUN¹, Eric JEANSOU¹, Véronique BRUNIQUEL¹, Clarissa HAMANN², Marco SPAGNOLLI², Isabell KRISCH², Richard WACHTER², Johannes SCHMIDT², Stefano BALDACCI², Dimitri LEBEDEFF³, Vincent SOULIGNAC³, Hugo MONCHATRE³, Yves BOBICHON³, Antonio GABRIELE⁴, Adrian Leonardo GARCIA⁴, Ignacio Fernández NUÑEZ⁴, Claudia ISOLA⁴, S. ADRIAENSEN⁵, W. DIERCKX⁵

¹ ACRI-ST, 260 route du Pin Montard, 06904 Sophia-Antipolis, France, nicolas.lamquin@acri-st.fr

² OHB System AG, Germany

³ Thales Alenia Space, 5 allée des Gabians, 06150 Cannes, France

⁴ ESA/ESTEC, Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk, The Netherlands

⁵ VITO, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgium

Mots-clés : Simulator, Performance, Ground Segment, Processors

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.

The development of the CHIME mission is performed by a consortium led by Thales 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 geometrically-refined 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 provides an overview of the OPSI Software System offering 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 provide mission performance figures to be expected from the instrument and system design.

FLEX Level-2 Processor Prototype : protocole de validation scientifique et premiers résultats

Théo PACCOUD¹, Jorge VICENT SERVERA^{1,7}, Pekka KOLMONEN², Neus SABATER², Sergio COGLIATI³, Pietro CHIERICHETTI³, Christiaan VAN DER TOL⁴, Gwennaël MATOT¹, Ornella NANUSHI¹, Marco CELESTI⁵, Marin TURIDORIU⁶

¹ Magellium, 1 rue Ariane, Ramonville-Saint-Agne, France, theo.paccoud@magellium.fr, jorge.vicent-servera@magellium.fr, gwennaël.matot@magellium.fr, ornella.nanushi@magellium.fr

² Finnish Meteorological Institute, P.O. BOX 503 FI-00101 Helsinki, Finlande, pekka.kolmonen@fmi.fi, neus.sabater@fmi.fi

³ University of Milano-Bicocca, Piazza dell'Ateneo Nuovo, Milan, Italie, sergio.cogliati@unimib.it, pietro.chierichetti@unimib.it

⁴ University of Twente, Drienerlolaan 5, 7522 NB Enschede, Pays-Bas, c.vandertol@utwente.nl

⁵ ESA/ESTEC, Keplerlaan 1, 2201 AZ Noordwijk, Pays-Bas, marco.celesti@esa.int

⁶ ESA/ESRIN, Via Galileo Galilei 1, 00044 Frascati RM, Italie

⁷ University of Valencia, Valencia, Spain, jorge.vicent@uv.es

Mots-clés : Observation de la Terre, Transfert radiatif, Correction Atmosphérique, Chaîne de Traitement, Fluorescence

The FLEX mission is ESA's 8th Earth Explorer mission and will provide global maps of vegetation Sun-Induced Fluorescence (SIF), which can be converted into an indicator of photosynthetic activity. The development of an operational processing facility for FLEX data at Level-1C and Level-2 is ongoing in the Data Innovation and Science Cluster (DISC) project. Among other activities in the DISC project, we are implementing a Level-2 Processor Prototype (L2PP) to develop and test state-of-the-art algorithms in a pre-operational data processing chain environment. The L2PP consists of four independent modules to process input Level-1B data into higher-level biophysical and photosynthesis Level-2 products. The L2PP starts with the L1C module, whose main objective is to geometrically co-register FLEX (FLORIS) and Sentinel-3 (OLCI and SLSTR) data in the same geometrical reference. The goals of the L2A module are (1) to characterize the atmospheric conditions (aerosols, water vapor, clouds) using both FLEX and Sentinel-3 data, and (2) to retrieve surface apparent reflectance and at-surface solar irradiance from FLEX L1C products. The L2B module disentangles the SIF emitted by vegetation from the reflected radiance using the L2A apparent reflectance and solar irradiance as an input. Finally, the L2C module uses surface reflectance (from FLORIS & OLCI), SIF, and Land Surface Temperature (from SLSTR), to retrieve key biophysical and photosynthetic variables for a correct interpretation of the fluorescence signal. In order to test and evaluate the performance of L2PP algorithms against mission requirements, a validation plan relying on simulated data has been developed. Realistic simulations from the FLEX end-to-end mission performance simulator (E2ES) are used to assess the accuracy of the Level-2 algorithms, as it enables a precise comparison between a set of known reference data and the retrieved FLEX products. This validation framework makes it possible to assess whether the L2PP meets the mission requirements, to identify existing scientific challenges and to establish future improvements.

In this presentation we will show the current status of the L2PP validation within the FLEX E2ES framework in May 2025. In particular, we will: (1) perform an overall presentation of the FLEX mission and more particularly of the content of its Level-1 C and Level-2 products, (2) introduce the core L2PP algorithm and high-level architecture, (3) describe the validation protocol that uses E2ES test datasets to assess the accuracy of the retrieval algorithms, (4) give an overview of the validation protocols and results over the E2ES scenarios against mission requirements, and (5) present the main ongoing improvements. With this work, we expect to provide the audience with insight into the FLEX L2 algorithm, their status, scientific performance and challenges.

MAJIS/JUICE: Instrument description and first in-flight performances

François POULET^{1*}, Giuseppe PICCIONI², Yves LANGEVIN¹, Cydalise DUMESNIL¹, Leonardo TOMMASI³

¹ Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS/Université Paris Saclay, Orsay, France, francois.poulet@universite-paris-saclay.fr, yves.langevin@universite-paris-saclay.fr, cydalise.dumesnil@universite-paris-saclay.fr

² Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133, Roma, Italia, giuseppe.piccioni@inaf.it

³ Leonardo S.p.A., Via Delle Officine Galileo, 1, 50013 Campi Bisenzio FI, Italia

Mots-clés : Sciences planétaires, Visible, Infrarouge

JUICE - Jupiter ICy moons Explorer - is the first large mission in the ESA Cosmic Vision 2015-2025 program. The mission was selected in May 2012 and has been launched on April 14th 2023, with arrival at Jupiter in July 2031. It will make detailed observations of Jupiter and three of its largest moons, Ganymede, Callisto and Europa. MAJIS (Moons And Jupiter Imaging Spectrometer) is the visible-IR imaging spectrometer of JUICE and it is built by a consortium led by Institut d'Astrophysique Spatiale in Orsay, France with the support of CNES and a major contribution from Italy in terms of science (Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali) and industrial contributions, both supported by ASI.

MAJIS will investigate the spectral characteristics of Jupiter, the Galilean satellites, rings, small satellites and exospheres with two channels: the VIS-NIR channel in the spectral range from 0.5 to 2.35 μm , and the IR channel from 2.28 to 5.56 μm . The IFOV after binning 2x2 (nominal for MAJIS) is 150 μrad , with 400 pixels across the 60 mrad FOV and 508 spectels. The spectral sampling is about 3.6 nm/band and 6.5 nm/band for VIS-NIR and IR channels respectively. The optical head (OH) and the detectors of the two spectral channels are cooled down to cryogenic temperatures at about 135K for the OH structure and the VISNIR channel detector, and 90K for the IR channel detector by two dedicated external radiators. The whole OH structure is kept thermally isolated from the S/C interface by an isostatic mount, fiberglass bipods and multilayer insulation. MAJIS can operate in push-broom mode, in scanning mode, and in motion compensation, depending on the different scientific objectives and targets. The OH is equipped with an Internal Calibration Unit (ICU), which provides reference signals for in-flight calibration. The instrument performances were verified at sub-system and instrument levels. The results turned out to be very consistent with radiometric, spectral and geometrical modelling of the overall performances [1].

During the long cruise path of JUICE to the Jupiter system, several checkouts and Earth and Moon flybys are planned. This provides fundamental information to verify and improve the calibration, test the performances, but also giving science opportunities in the data analysis coming from these observations. We will present a technical overview of the instrument and its performances derived from the first in-flight calibration measurements.

[1] Poulet et al. (2024), Moons and Jupiter Imaging Spectrometer (MAJIS) on Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE), *Space Science Reviews*, 220(3):27.

Introduction d'un spectroradiomètre de terrain UV-Vis-NIR permettant d'éliminer les incertitudes associées aux calculs du champ de vision et au ciblage d'échantillons

Nicolas VENJEAN¹

¹ SPECTRAL EVOLUTION, 26 Parkridge Road, Haverhill, MA 01835, USA, nicolas.venjean@spectralevolution.com

Mots-clés : Télédétection, Proche Infra-rouge, Spectroradiomètre, Précision

L'une des principales difficultés de télédétection avec un spectroradiomètre de terrain est le calcul et l'ajustement du champ de vision de l'instrument à la taille et à la distance de l'échantillon mesuré. Puisque le champ de détection de l'instrument varie en fonction de la distance de l'optique à l'échantillon, du type d'optique (fibre ou lentille), et de l'angle de détection par rapport au sol, les calculs de champ de vision peuvent être difficiles et nécessitent du temps supplémentaire lors de mesures de terrain. Un mauvais calcul du champ de vision ou une erreur de ciblage de l'échantillon entraînent des incertitudes sur l'acquisition des mesures hyperspectrales.

Pour éliminer ces incertitudes liées au ciblage de l'échantillon et au calcul du champ de vision, Spectral Evolution a développé un spectroradiomètre de terrain qui incorpore une visualisation en temps réel du champ de vue de l'instrument. Outre les données spectrales, l'instrument permet également de prendre une photo ciblée de l'échantillon avec chaque acquisition spectrale, ainsi qu'une mesure instantanée de l'angle et la distance par rapport à la cible. Les coordonnées GPS sont de même automatiquement enregistrées avec les données spectrales.

Instrumentation-Méthodologie

Classification non supervisée de données hyperspectrales codées

Trung-Tin DINH^{1,2}, Hervé CARFANTAN¹, Antoine MONMAYRANT², Simon LACROIX²

¹ IRAP/CNES/UT, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, tdinh@irap.omp.eu, herve.carfantan@irap.omp.eu

² LAAS/CNRS, 7 avenue Colonel Roche, 31400 Toulouse, France, antoine.monmayrant@laas.fr, simon.lacroix@laas.fr

Mots-clés : Imageur à masques codés, DD-CASSI, Tests statistiques, Classification non supervisée

Les méthodes classiques d'imagerie hyperspectrale nécessitent de nombreuses acquisitions via un balayage spatial ou spectral coûteux en temps et en ressources. Dans notre projet, un imageur à masques codés pilotables de type DD-CASSI [1] est utilisé pour analyser la scène hyperspectrale avec typiquement dix fois moins d'acquisitions. Pour traiter ces données codées, nous proposons un algorithme de classification non supervisée (Fig. 1a) exploitant des tests statistiques de gaussianité.

Notre approche vise à déterminer des régions homogènes dans lesquelles tous les pixels partagent la même signature spectrale avec certaines variations liées aux conditions d'éclairage variables (variabilité spectrale intraclasse [2]), en exploitant des tests statistiques comme Shapiro-Wilk. Ces tests vérifient la gaussianité des résidus entre les données codées réelles et celles prédites pour un spectre estimé, en supposant une hypothèse de bruit gaussien [3]. Notre approche se décompose en trois étapes principales : (1) détection de régions homogènes et estimation des spectres de référence, (2) croissance de ces régions en labélisant des pixels de même matériau, et (3) fusion des régions sous un même label s'il s'agit du même matériau.

La méthode a été testée sur des jeux de données simulées et réelles (Fig. 1b). Les résultats montrent une détection efficace des régions homogènes. Notre méthode permet de classifier de manière non supervisée la majorité des pixels de la scène. Pour les pixels non classifiés, des acquisitions complémentaires pourraient être effectuées afin de compenser le manque d'information. Une étude future pourrait explorer l'optimisation des configurations du masque codé en fonction de ces résultats obtenus.

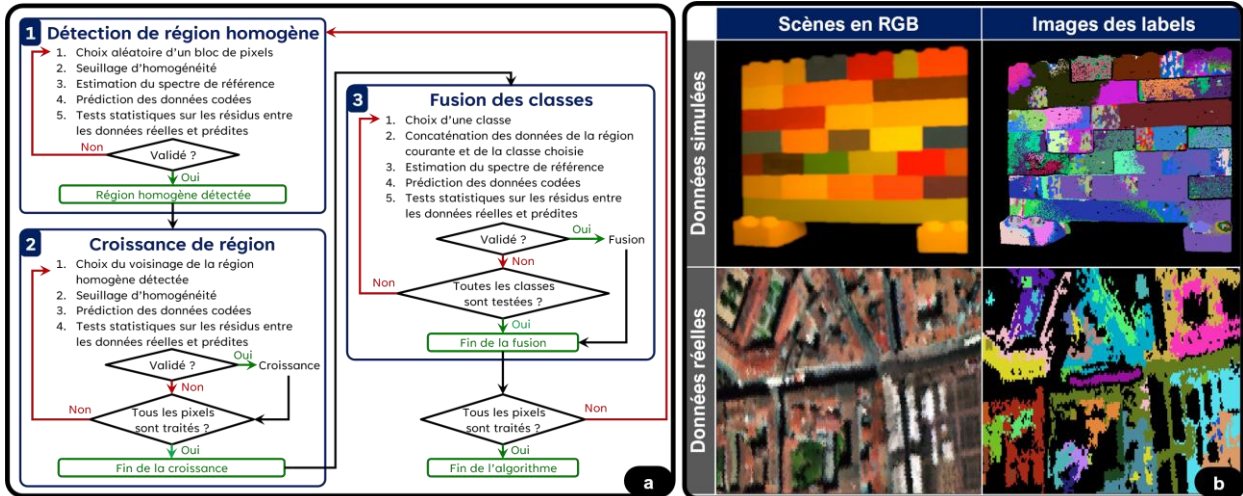


Fig. 1. a) Algorithme proposé ; b) Résultats de classification.

[1] Gehm M.E. et al. (2007), Single-shot compressive spectral imaging with dual-disperser architecture, *Optics Express*, 15(21):1013-14027.

[2] Drumetz L. et al. (2016), Blind hyperspectral unmixing using an extended linear mixing model to address spectral variability, *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(8):3890-3905.

[3] Dinh T.T. et al. (2023), Tests statistiques pour l'analyse d'acquisitions hyperspectrales codées, *XXIXème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images (GRETSI)*, Grenoble, Août 2023.

Fusion multi-résolution et classification d'images de télédétection hyperspectrales et panchromatiques

Martina PASTORINO^{1*}, Gabriele MOSER¹, Sebastiano SERPICO¹, Josiane ZERUBIA²

¹ Université de Gênes, Via Opera Pia 11A, 16145 Gênes, Italie, martina.pastorino@unige.it, gabriele.moser@unige.it, sebastiano.serpico@unige.it

² Inria, Université Côte d'Azur, 2004 route des Lucioles, 06902 Sophia-Antipolis, France, josiane.zerubia@inria.fr

Mots-clés : Imagerie hyperspectrale, Fusion multi-résolution, Classification, FCN, CRF

La classification d'images hyperspectrales est un domaine clé de la télédétection, où les techniques avancées offrent des résultats précis. De nombreuses approches supervisées exploitent l'information spatiale et spectrale à l'aide de méthodes comme les champs aléatoires de Markov (MRF), les machines à vecteurs de support (SVM) et l'apprentissage profond [1]. Certaines intègrent des pré-traitements, tels que les superpixels [2]. En revanche, la classification multi-résolution hyperspectrale-panchromatique reste un problème émergent, peu exploré. Des techniques de classification multispectrale panchromatique ont été développées [3], mais en se référant uniquement à des capteurs caractérisés par un nombre limité de canaux spectraux et sans prendre en compte les potentiels et les défis des données hyperspectrales.

Dans ce contexte, la méthode proposée s'appuie, en premier lieu, sur des réseaux entièrement convolutionnels, FCN [4] : l'architecture neuronale vise à intégrer les données hyperspectrales et panchromatiques aux niveaux de résolution spatiale correspondants et à générer des estimations des probabilités postérieures. Pour entraîner efficacement de tels réseaux profonds, un très grand nombre d'échantillons d'entraînement précisément annotés est généralement nécessaire. Cette condition est facilement vérifiée dans l'application aux données de référence mises à disposition pour des concours scientifiques internationaux, mais elle s'avère souvent être une restriction critique dans les applications du monde réel, dans lesquelles les ensembles d'entraînement disponibles sont généralement composés d'un nombre relativement limité d'échantillons ou de régions spatialement disjointes attribuées aux classes. Cela influence négativement les performances d'un modèle d'apprentissage neuronal entraîné sur de telles données et constitue une limitation opérationnelle. La technique proposée ici vise également à répondre, dans le cadre de la classification panchromatique-hyperspectrale multi-résolution, à cette criticité liée aux exigences en termes de quantité et de qualité de l'ensemble d'apprentissage. À cette fin, la méthode proposée intègre l'approche basée sur les réseaux neuronaux profonds avec un modèle graphique probabiliste, à savoir un champ aléatoire conditionnel (CRF).

Le modèle CRF proposé ici approxime de manière traitable computationnellement le comportement du CRF idéal entièrement connecté, en introduisant un graphe qui inclut non seulement les relations locales définies par le schéma de voisinage mais aussi les relations entre un ensemble de nœuds virtuels supplémentaires visant à représenter les dépendances à longue distance. De tels nœuds virtuels sont définis sur la base d'un résultat de clustering des activations calculées du réseau neuronal dans l'ensemble de toutes ses couches cachées.

- [1] Ahmad M., Shabbir S., Roy S.K., Hong D., Wu X., Yao J., Khan A.M., Mazzara M., Distefano S. & Chanussot J. (2022), Hyperspectral image classification—traditional to deep models: A survey for future prospects, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15:968-999.
- [2] Bai J., Shi W., Xiao Z., Regan A.C., Ali T.A., Zhu Y., Zhang R. & Jiao L. (2022), Hyperspectral image classification based on superpixel feature subdivision and adaptive graph structure, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60:5524415.
- [3] Moser G., De Giorgi A. & Serpico S. (2016), Multiresolution supervised classification of panchromatic and multispectral images by Markov random fields and graph cuts, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(9):5054-5070.
- [4] Long J., Shelhamer E. & Darrell T. (2015), Fully convolutional networks for semantic segmentation, *IEEE/CVF CVPR2015*, pp. 3431-3440.

Impact de la qualité du modèle numérique de surface pour la correction géométrique d'images hyperspectrales à très haute résolution spatiale

Hugo TARDY^{1*}, Yannick BOUCHER¹, Stéphanie DOZ¹

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pégérin, 31055 Toulouse, France, hugo.tardy@onera.fr, yannick.boucher@onera.fr, stephanie.doz@onera.fr

Mots-clés : Télédétection, Hyperspectral, Drone, Géométrie, MNS

Avec l'avènement de l'utilisation des drones en télédétection, de nombreux instruments spectraux embarqués ont vu le jour en offrant ainsi une résolution spatiale centimétrique et ouvrant le champ à de nouvelles applications en agriculture de précision, suivi de l'état de santé et analyse de la biodiversité, planifications urbaines, etc.

L'acquisition d'images par télédétection optique est influencée par différents facteurs tels que l'environnement ou les paramètres de l'instrument. Les corrections à appliquer sont alors de nature radiométrique et géométrique. Les instruments pushbroom sont corrigés géométriquement en utilisant les données de position, d'orientation et de moment d'acquisition du capteur pour projeter les pixels acquis depuis un repère image vers un repère relatif au capteur en utilisant un modèle numérique de surface du sol ou MNS. Cependant toute imprécision sur ce modèle se retrouve dans les produits finaux. Par exemple, l'erreur induite en un point par une erreur verticale sur le MNS est définie par l'équation (1), avec Δg la distance au sol, Δh l'erreur sur la verticale et θ l'angle d'incidence :

$$\Delta g = \Delta h * \cotan(\theta)$$

Il est donc essentiel que la précision du MNS utilisé soit au moins du même ordre de grandeur que l'image spectrale traitée. L'objectif de cette présentation est d'analyser l'impact de la qualité du MNS de haute résolution spatiale sur la précision du géoréférencement d'images hyperspectrales. Pour ce faire, les données disponibles comprennent :

- Une image hyperspectrale acquise avec une caméra pushbroom Hypspx VS620 sur drone, de résolution au sol 1.35 cm dans la bande VNIR (0.4-0.9 nm) et 2.7cm dans la bande SWIR (1-2.5 nm).
- Un MNS généré par photogrammétrie avec la caméra multispectrale MUSCA (caméra multispectrale ONERA) disposant des voies verte/rouge/PIR respectivement 532 nm / 660 nm / 810 nm)
- Un MNS généré par une acquisition drone LiDAR3D avec une densité de points de l'ordre de 2 pts/cm²
- Le MNS Correl de l'IGN avec une résolution spatiale de 20 cm.

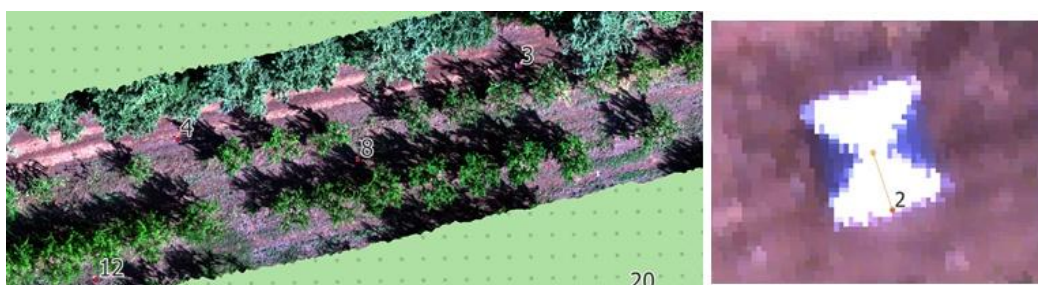


Fig. 1. A gauche : ligne de vol présentant plusieurs mires géométriques. A droite : mesure de distance entre le centre de la cible, pointée par un opérateur humain, et sa coordonnée réelle, mesurée par GNSS.

Hormis le MNS de l'IGN, ces acquisitions ont été réalisées dans le cadre de l'ANR JCJC Canop sur deux champs d'arbres fruitiers de la commune de Bellegarde, en France (Fig. 1). En utilisant comme référence des cibles damier au sol, les 3 MNS obtenus dans le cadre de cette étude seront comparés puis utilisés pour corriger l'image hyperspectrale et leurs impacts sur le géoréférencement seront analysés.

Fast inversion of hyperspectral observations using Gaussian Locally Linear Mapping

Eric TATULLI^{1*}, Silvere GOUSSET¹, Sylvain DOUTÉ¹, Luc MEYER²

¹ Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, 414 rue de la Piscine, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France, tatullie@univ-grenoble-alpes.fr, silvere.gousset@univ-grenoble-alpes.fr, sylvain.doute@univ-grenoble-alpes.fr

² Inria UGA, Inovallée, 655 avenue de l'Europe, 38330 Montbonnot-Saint-Martin, France, luc.meyer@inria.fr

Mots-clés : Hypersectral data, Atmospheric sounding, Gaussian mixture, Machine learning

Background and objective. The inversion of hyperspectral observations for atmospheric sounding using classical Levenberg-Marquardt (LM) iterative minimization [1] can quickly lead to prohibitive computation time when dealing with observational campaigns that provide a large amount of spatio-temporal data. To significantly improve computational efficiency, we propose to use the machine-learning capabilities of Bayesian inversion techniques.

Methods. We simulate noisy hyperspectral data using the 4AOP radiative transfer [2] and the real transfer function of the SCARBO instrument [3] dedicated to monitoring greenhouse gases (GHG) from space. The non-linear forward relationship $Y=F(X)$ between hyperspectral observations Y and atmospheric parameters X is modeled using the Bayesian Gaussian Locally Linear Mapping (GLiMM) approach [4], which constructs a joint probability density $p(X,Y)$ represented by a Gaussian mixture. The model is learned from a specific training dataset covering the range of admissible atmospheric parameters. The backward model, that is the probability of having X knowing the observations Y , is then estimated and the atmospheric parameters of an independent testing dataset are retrieved and compared with their true values.

Results. We show that our GLiMM approach retrieves atmospheric parameters a few thousand times faster than iterative LM inversion, while providing similar estimates without significant differences. Considering a 64x64 pixel wide simulated scene with anthropogenic CO₂ emission, we show that the GLiMM process is able to localize the plume with the proper mixing ratio (Fig. 1) in a few minutes at most.

Conclusion. GLiMM modeling is a promising alternative for reliably estimating GHG concentration from a large hyperspectral dataset in a reasonable timeframe.

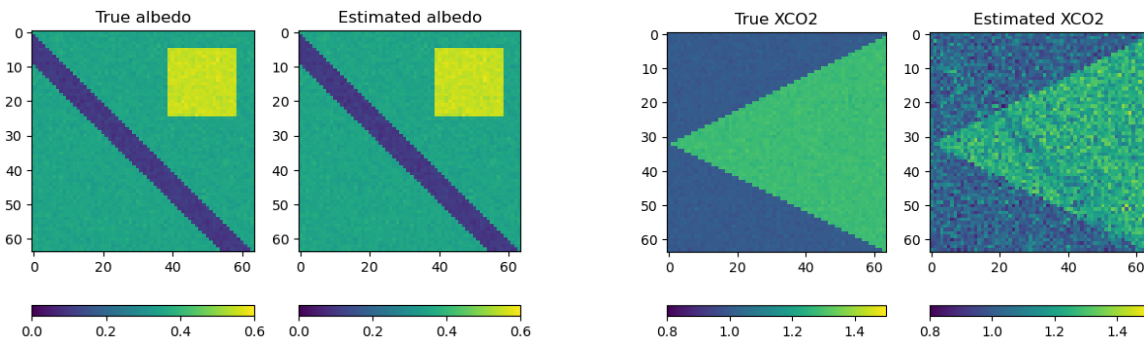


Fig. 1. Comparison of true and GLiMM-estimated albedo (left) and CO₂ mixing ratio (right) parameters for a simulated observation of a spatially localized CO₂ plume.

- [1] Rodgers C.D. (2000), Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. Vol. 2. World scientific.
- [2] Gousset S. et al. (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.
- [3] Chaumat L. et al. (2022), 4AOP: A fast and accurate operational forward radiative transfer model.
- [4] Kugler B., Forbes F. & Douté S. (2022), Fast Bayesian Inversion for high dimensional inverse problems, *Statistics and Computing*, 32(2):31.

Mesures radiométriques hyper-spectrales in-situ en Mer Méditerranée et validation automatisé des produits satellitaires PACE-OCI

Denis PAILLER¹, David DOXARAN¹ et Paco STIL¹

¹ Laboratoire Océanographique de Villefranche (LOV), UMR7093, CNRS/SU, denis.pailler@imev-mer.fr

Mots-clés : réflectances marines, intercomparaison mesures in situ, validation des produits satellitaires PACE-OCI

L'application **Hypernets_matchup V1.0** propose un outil performant pour comparer les produits satellitaires à des mesures in-situ utilisées comme « référence ». Cette application a été développée dans le cadre du **projet Hypernets-pop** qui maintient en opération plusieurs radiomètres hyperspectraux autonomes **HYPSTAR** (<https://hypstar.eu>) dans les eaux côtières françaises et internationales.

Un synoptique fonctionnel de **Hypernets_matchup** sera présenté, suivi des retours sur l'expérimentation du radiomètre HYPSTAR lors de la **campagne HyperBOOST** (<https://hyperboost.info>) à bord du navire **TARA d'août 2024**, aux côtés de deux autres radiomètres hyperspectraux in-situ. Avec **Hypernets_matchup**, des comparaisons détaillées ont été effectuées entre les mesures réalisées par les trois radiomètres in-situ. Puis les mesures in-situ sont utilisées pour quantifier les incertitudes associées aux produits satellitaires L2 PACE-OCI (v2.0 et v3.0) et Sentinel3-OLCI : comparaisons spectrales diagrammes de dispersion et statistiques d'erreurs.

Enfin, la présentation abordera les résultats sur la calibration et discutera des perspectives d'évolution, incluant l'accessibilité via une application web, la standardisation pour une intégration élargie des capteurs in-situ ou satellites, ainsi que le stockage des données dans des bases dédiées, favorisant leur réutilisation et leur portabilité.

Atmosphère

Modèles génératifs profonds pour la régularisation de l'inversion de panaches à partir d'images satellites

Hugo ANDRE¹, Romain THOREAU^{1*}, Pierre-Yves FOUCHER², Laura LE BARBIER¹, Solange LEMAI-CHENEVIER¹, et Camille DESJARDINS¹

¹ CNES, 18 avenue. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, hugo.andre@cnes.fr, romain.thoreau@cnes.fr, laura.lebarbier@cnes.fr, solange.lemai-chenevier@cnes.fr, camille.desjardin@cnes.fr

² ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pélegrin, 31055 Toulouse, France, pierre-yves.foucher@onera.fr

Mots-clés : Imagerie hyperspectrale satellitaire, Inversion de panaches de méthane / aérosols industriels, Apprentissage statistique, Modèles génératifs

Les modèles génératifs profonds ont récemment suscité beaucoup d'intérêt pour la régularisation de problèmes inverses [1,2,3]. En général, les problèmes inverses sont sous-déterminés et un a priori sur la distribution des données est nécessaire pour régulariser le problème. En raison de leur capacité à modéliser des distributions complexes, les réseaux de neurones ont récemment constitué un choix de régularisateurs privilégié, donnant de très bons résultats en super-résolution, débruitage ou encore en restauration d'images médicales [1,2,3].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'utilisation de modèles génératifs pour régulariser l'inversion de différents types de panaches à partir d'images satellites hyperspectrales. La caractérisation de panaches (e.g. panaches de fumée de feux de forêt, d'aérosols ou de méthane de sites industriels ou pétroliers) est essentielle pour des questions de santé publique et pour contrôler les émissions de polluants par l'industrie. Les images optiques satellites permettent une surveillance régulière et à grande échelle des panaches d'origine anthropique, en particulier depuis les lancements des satellites hyperspectraux PRISMA et ENMAP [4]. Cependant, sans la connaissance a priori des propriétés optiques de la surface sous le panache, le problème est sous-déterminé. Les méthodes existantes pour estimer la réflectance de la surface sous le panache sont des méthodes de démixage linéaire [5]. Certaines méthodes utilisent également une image multispectrale à une date d'acquisition proche de l'image hyperspectrale pour fournir davantage d'information sur la scène [5]. Ces méthodes dépendent donc de la disponibilité d'une image multispectrale sans nuages, et font des hypothèses potentiellement fortes sur les propriétés optiques de la scène. On présentera les résultats préliminaires de l'étude. Notamment, on comparera quantitativement les grandeurs des panaches estimées à partir des méthodes de régularisation de l'état de l'art, et des méthodes qui utilisent des modèles génératifs statistiques.

- [1] Duff M.A.G., Campbell N.D. & Ehrhardt M.J. (2024), Regularising inverse problems with generative machine learning models, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 66(1): 37-56.
- [2] Habring A. & Holler M. (2022), A generative variational model for inverse problems in imaging, *SIAM Journal on Mathematics of Data Science*, 4(1):306-335.
- [3] Prost J., Houdard A., Almansa A. & Papadakis N. (2023), Inverse problem regularization with hierarchical variational autoencoders, In *Proc. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 22894-22905.
- [4] Calassou G. (2023), Télédétection par imagerie hyperspectrale pour la cartographie des émissions de particules d'aérosols dans l'atmosphère, ISAE-SUPAERO.
- [5] Calassou G., Foucher P.Y. & Léon J.F. (2024), Quantifying particulate matter optical properties and flow rate in industrial stack plumes from the PRISMA hyperspectral imager, *Atmospheric Measurement Techniques*, 17:57-71.
- [6] Rodgers C.D. (2000), *Inverse Methods for Atmospheric Sounding*, World Scientific.

Atmospheric Interferogram based retrieval: A new paradigm. A use case of CO vertical column with IASI space interferometer

Nejla ECO¹, Sébastien PAYAN^{1*}, Laurence CROIZE²

¹ LATMOS, CNRS, Sorbonne Université, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France, nejla.eco@latmos.ipsl.fr, sebastien.payan@sorbonne-universite.fr

² ONERA, 6 chemin de la Vauve aux Granges, 91120 Palaiseau, France, laurence.croize@onera.fr

Mots-clés : Interférogramme, Imagerie hyperspectrale, Télédétection, Composition atmosphérique

On board of MetOp satellite series is Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), a Fourier Transform, Michelson-based spectrometer, which aims to provide a high-resolution atmospheric emission spectrum to derive temperature and humidity profiles with high spectral resolution. We will use IASI archive to test the retrieval approach in the interferogram domain, which we expect to be well suited for NRT analysis of large sets of spectra to be recorded by next generation spatial tropospheric sounder such as MTG-IRS. The partially scanned interferograms (PSI) method applied to the retrieval of trace gases from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer was rarely used. However, there exist works that indicate the potential of this methodology for the specific cases of CO, CO₂, CH₄ and N₂O that should allow us to retrieve trace gases column densities at an unprecedented accuracy and at the level of only one IASI footprint. Since IASI interferograms are not available, we choose to transform the IASI spectra back to the interferogram domain and identify regions (optical path differences) sensitive to the carbon monoxide species. The retrieval is performed using a Least Squares estimation. The expected advantage compared to the usual methods is an efficient use of the information contained in all IASI channels that are available in the absorption bands of a specific gas species.

We will present the interferogram retrieval approach of CO from IASI simulations. These first results are based on a set of simulations of IASI interferograms that are noised and then used for CO retrievals. The study which aims to compare the performance of the interferogram retrieval approach compared to the classical one (i.e. from the spectral domain) will also be presented. Simulation of IASI spectra was performed using LATMOS Atmospheric Retrieval Algorithm (LARA), a robust and affirmed radiative transfer model [Segonne et al., 2021]. LARA was conjoined with the TIGR, a climatological library of atmospheric situations representing the Earth's atmosphere called the Thermodynamic Initial Guess Retrieval (TIGR) [Chédin et al., 1985; Chevallier et al., 1998]. Each atmospheric situation is described by values of temperature, water vapor and ozone concentrations for a given pressure grid, from the ground surface to the TOA (top of the atmosphere). Furthermore, the study considers carbon monoxide, a trace gas crucial for understanding both the air quality and climate forcing. Carbon monoxide typically appears in the range of 2050 to 2350 cm⁻¹ wavenumber, with its characteristic “comb” shaped absorption signature [Serio et al., 2012]. Simulations are performed for surface temperatures ranging from -15 to 15 K in steps of 5 K from the base surface temperature, to explore the impact of thermal contrast [Baudin et al., 2016]. Finally, we investigate the potential of inferring the interferogram dependency on surface temperature and H₂O content, which would allow for a more accurate prediction of CO columns. An informational content study will be also presented. Using interferogram points sensitive to surface temperature and H₂O content, we classify all the interferograms predicting the surface temperature and the abundance of H₂O for each. Approach is also compelling for its potential immersion in the machine learning algorithms granting a fast retrieval of gases.

Airborne Infrared Hyperspectral Methane Detection Limits and Results

Jean-Philippe GAGNON^{1*}, Stéphane BOUBANGA¹

¹ Telops, 2600 Ave Saint-Jean-Baptiste, #100, Québec City, Québec G2E 6J5, Canada, jean-philippe.gagnon@telops.com, stephane.boubanga@telops.com

Mots-clés : Hyperspectral, Airborne, Gas detection, Methane

As a leading developer of airborne infrared hyperspectral imaging systems and services, Telops has worked to produce robust detection limit standards for our methane detection services. These limits are established on a per-measurement basis given the environmental conditions and operating parameters at the time of collection. While the calculation is complex, the result is often a single value relaying the detection limit for a given gas in grams per second. In post processing, when the true gas release rate is known, a detection matrix can be formed in which, successful, unsuccessful, and erroneous detections with their known release rates can be plotted against calculated detection limit. With these results conclusions are drawn which can help influence adjustments to future detection limit calculations. Many of the same principals which apply to manned aircraft detection limit calculations similarly apply to collections performed by smaller UAS. As part of Telops ongoing effort to characterize the performance of our new Hyper-Cam Nano Airborne system, we provide a first look into the expected detection limits for the new system and efforts to improve operability as well as reliability as the product moves towards completion of its development later this year. By establishing a clear methodology and standardized detection limits for these systems, Telops' aims to provide all users with a clear understanding of the true utility of this technology such that regulators, researchers, and industry actors may have greater confidence in their results.



Fig 1. Hyper-Cam Nano in flight.



Fig 2. Close-up on the Hyper-Cam Nano optical head.

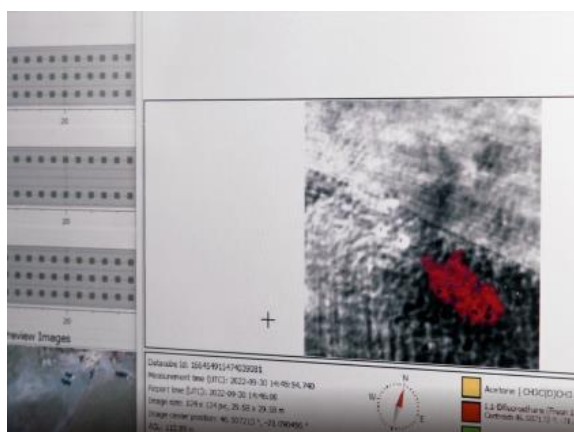


Fig 3. Detected gas emission in real-time.

Methane Emission Quantification in EnMAP Images with deep learning

Elyes OUERGHY^{1,2*}, Thibaud EHRET¹, Gabriele FACCILOLO¹, Enric MEINHARDT¹, Rodolphe MARION², Jean-Michel MOREL³

¹ Centre Borelli, Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France, elyes.ouerghi@gmail.com, gabriele.facciolo@ens-paris-saclay.fr,

² CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon, France, rodolphe.marion@cea.fr

³ Department of Mathematics, City University of Hong Kong, China, jeamorel@cityu.edu.hk

Mots-clés : Methane, Hyperspectral, Deep Learning, Large Eddy Simulations (LES)

Challenge. Reducing methane emissions is essential to tackle climate change. To monitor human methane emissions, we rely on observations made by hyperspectral satellites. Global monitoring of methane emissions involves two stages. First, detecting methane emissions and their sources on satellite images. Second, categorizing emission sources according to their flux rate Q (in kg of CH_4 per hour). Here, we address this second step: considering a methane plume in a hyperspectral image, we want to estimate the associated flux rate by using the image of the plume only. Physically based methods usually rely on external data such as the wind speed, which often have poor accuracy. Therefore, we propose to use a deep learning network to compute directly Q from the CH_4 concentration image.

Materials and Method. To train our method, we created a dataset of simulated methane plumes with Large Eddy Simulations. We performed simulations at various wind speeds between 0.5 m/s and 6.5 m/s. The first hour is used as spin-up, and in the remaining two hours we take one plume every 2 min. The simulated data are then inserted into true EnMAP L1 images to re-produce plumes with real background noise. Our method is divided into two steps. First, we retrieve the methane concentration in EnMAP L1 images by applying the Mag1c method [1]. The methane concentration retrieval image is the input of the second step, which consists in a deep neural network.

Results. We compare our method with IME (Integrated Methane Enhancement) [2], which is the most popular technique for flux rate estimation from satellite imagery. Calculating the IME requires the wind speed at 10 m, provided here by the true wind speed used as input in the simulation. We compare the result of both methods in Figs. 1 and 2. Both methods are tested on our simulated test set. Our neural network outperforms IME in terms of RMSE (Root Mean Square Error) and MAPE (Mean Absolute Percentage Error). Moreover, our network requires less information than IME as it uses the methane retrieval image only, whereas IME uses external wind data. During the workshop, some results on real hyperspectral images will be also presented.

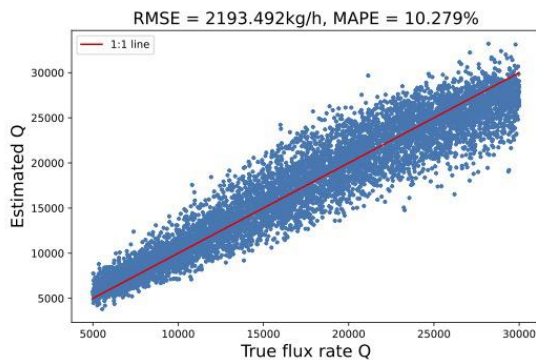


Fig. 1. Flux rate estimation on our simulations with our network.

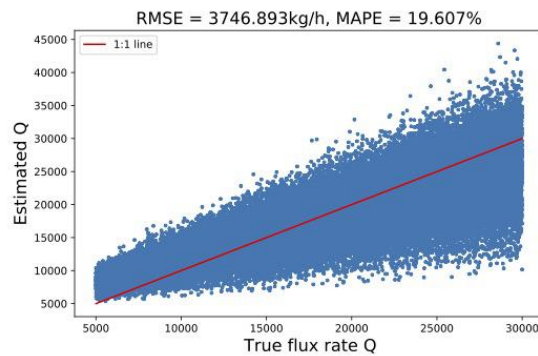


Fig. 2. Flux rate estimation on our simulations with the IME.

[1] Foote et al. (2020), Fast and accurate retrieval of methane concentration from imaging spectrometer data using sparsity prior, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(9):6480-6492.

[2] Frankenberg et al. (2016), Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in four corners region, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(35):9734-9739.

Synergie des données multispectrales et hyperspectrales pour la quantification des émissions industrielles d'aérosols

Armand VEAU^{1,2}, Pierre-Yves FOUCHER¹, Rodolphe MARION², Jean-François LÉON³

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pégérin, 31055 Toulouse, France, pierre-yves.foucher@onera.fr

² CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon, France, rodolphe.marion@cea.fr

³ Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, CNRS, IRD, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, jean-francois.leon@cnrs.fr

Mots clés : Aérosols, Emissions industrielles, Transfert radiatif, Sentinel-2, PRISMA, Séries temporelles

Les activités industrielles représentent une source majeure d'émission d'aérosols dans l'atmosphère, impactant directement la qualité de l'air et la santé humaine. Ces émissions représentaient 9 % des PM_{2.5} et 20 % des PM₁₀ en Europe en 2021. L'essor des capteurs satellitaires multispectraux et hyperspectraux, tels que Sentinel-2, PRISMA et EnMap, offre une opportunité unique d'évaluer ces émissions industrielles à l'échelle globale. Les approches existantes pour quantifier les émissions d'aérosols industriels incluent des techniques actives comme le LIDAR, des méthodes basées sur la transmission optique telle que Sky-LOSA, et l'imagerie spectrale aéroportée qui permet de cartographier et de caractériser les panaches. Cependant, ces techniques restent limitées à des observations ponctuelles et ne permettent pas un suivi spatial et temporel à l'échelle globale. Cette étude donc vise à établir une méthodologie de traitement de séries temporelles d'images satellitaires à haute résolution (10–100 m) pour évaluer quantitativement les émissions industrielles d'aérosols. Notre approche suit plusieurs étapes clés : (1) la reconstruction du fond de scène sous le panache afin de réduire les biais d'inversion, (2) l'inversion des propriétés des aérosols afin de produire des cartes des propriétés optiques et microphysiques des panaches, et (3) l'estimation des débits d'émission des sources d'aérosols.

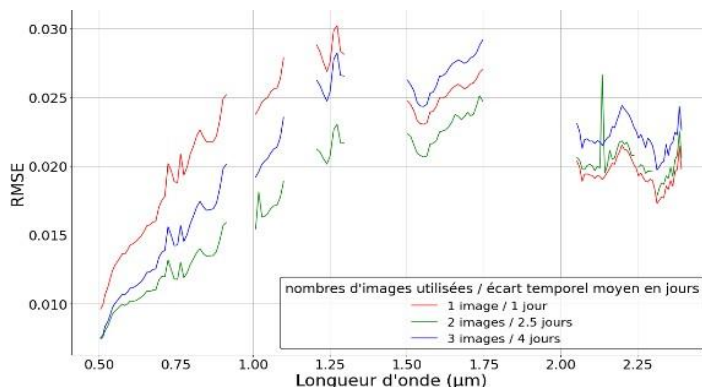


Fig. 1. Erreur RMSE en dehors du panache entre l'image PRISMA initiale et l'image reconstruite par CNMF (sans panache) mettant en évidence l'impact des changements temporels de la scène.

La reconstruction des réflectances de surface sous le panache se base sur une approche de démixage spectral via l'utilisation de la méthode CNMF (Coupled Non-negative Matrix Factorization). L'originalité de notre méthode consiste à utiliser l'ensemble d'une série temporelle afin d'exclure les pixels contaminés par le panache. Nous avons pu montrer son efficacité pour une série temporelle Sentinel-2 / PRISMA sur le site industriel de Matla (Afrique du Sud). La Figure 1 illustre l'évolution de l'erreur de reconstruction des images PRISMA selon le nombre d'images Sentinel-2 utilisées. Avec une seule image de référence, l'erreur est maximale entre 0,4 et 1,0 μm . L'ajout d'une image réduit l'erreur d'un facteur 2, mais un trop grand nombre (au-delà de 3) entraîne une dégradation des résultats. Ces erreurs sont principalement liées aux changements dans la scène entre les différentes dates. Une carte moyenne basée sur deux images Sentinel-2 offre ici un bon compromis.

En ce qui concerne l'inversion des propriétés des aérosols et l'estimation des débits d'émission, nous nous appuyons sur les travaux de Calassou et al. (2024). Le modèle d'aérosols est déterminé à partir des images hyperspectrales ; il est ensuite utilisé pour estimer les flux d'aérosols à partir des images multispectrales avec une haute résolution temporelle. Cette démarche permet de combiner les avantages des deux types d'instruments pour réaliser un suivi quantitatif des émissions industrielles.

Modélisation de panaches de méthane à haute résolution à partir d'images hyperspectrales

Rakesh YUVARAJ¹, Thomas LAUVAUX¹, Charbel ABDALLAH¹, Apisada CHULAKADABBA^{2,3}, Steven WOFSY³

¹ Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique (GSMA), Université de Reims-Champagne Ardenne, UMR CNRS 7331, Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex 2, France, rakesh.yuvaraj@lsce.ipsl.fr, thomas.lauvaux@univ-reims.fr, charbel.abdallah@univ-reims.fr

² Environmental Sensing and Modeling, Technical University of Munich, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, a.chulakadabba@tum.de

³ Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 20 Oxford St., Cambridge, MA 02138, USA, swofsy@seas.harvard.edu

Mots-clés : Imagerie hyperspectrale, Seuil des capteurs, Mesure de la concentration de méthane

Avec l'intérêt croissant pour la détection et la quantification des émissions de méthane provenant de diverses sources anthropogéniques, de nombreux investissements ont été consacrés aux instruments satellitaires et aux campagnes aériennes afin d'obtenir des estimations des fuites de gaz naturel. Grâce aux imageurs hyperspectraux à haute résolution tels que PRISMA (résolution de 30 m), Sentinel-2 (résolution de 20 m) ou Tanager-1 de Carbon Mapper (résolution de 30 m), il est désormais possible d'échantillonner les panaches de méthane (CH₄) à petite échelle pour permettre l'attribution de la source et la quantification à des niveaux de détection inférieurs. Cependant, les images à haute résolution présentent également des limites, en raison de la prédominance de la physique de la turbulence à petite échelle près de la source. Par conséquent, la modélisation de la simulation des grandes turbulences (LES) devient nécessaire pour résoudre la turbulence, ce qui permet d'obtenir des méthodes de quantification des émissions plus robustes.

L'étude présente des simulations de panaches de méthane à haute résolution incluant la météorologie, la topographie, les bâtiments, et les caractéristiques des fuites (débit, température,), à l'heure et au jour du passage de l'imageur, afin d'améliorer les méthodes de quantification actuelles. Cette modélisation du méthane à l'aide du modèle Fire Dynamics Simulator ouvre de nouvelles voies pour tester différents types d'instruments, leurs seuils, leurs résolutions temporelles et spatiales, leurs capacités pour différents types de journées (journées chaudes d'été, journées douces, etc.), et également pour différents types de sources (sources ponctuelles, sources diffuses), libérant du méthane à différentes températures. Cette modélisation peut, par définition, être étendue à d'autres gaz. La modélisation est validée sur des campagnes de lâchers contrôlés puis sur des images satellitaires afin de quantifier l'impact des divers paramètres tels que la topologie du terrain, la vitesse de l'air, la vitesse de libération du méthane, les températures de l'air, du méthane et du sol et la manière dont chacun de ces paramètres affecte la dynamique du panache. Ces résultats permettent également de quantifier les émissions issues de cas complexes (panaches hautement turbulents) mesurés dans les images hyperspectrales dans des zones reculées, permettant ainsi d'attribuer les fuites de méthane à des infrastructures pétro-gazières localisées dans toutes les grandes zones de production à l'échelle du globe.

Milieux littoraux

Approche géométrique de l'inversion du modèle de transfert radiatif par petits fonds

Mounadi ABDILLAH ALI TOIHIRI¹, Guillaume SICOT^{1*}, Isabelle QUIDU¹

¹ Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Institut Polytechnique de Paris, ENSTA, Technopole Brest-Iroise, 29238 Brest Cedex 3, France, mounadi.abdillah@ensta-bretagne.org, guillaume.sicot@ensta.fr, isabelle.quidu@ensta.fr

Mots-clés : Hyperspectral, Problème inverse, Modèle de fond

La zone littorale, en raison de sa position intermédiaire entre les milieux terrestre et maritime, est un espace particulièrement complexe. Elle est soumise à des courants variés dus aux remontées bathymétriques, avec une colonne d'eau dont la composition varie en fonction des apports provenant de la terre et de la mer. L'analyse des données spectrales doit prendre en compte ces différents éléments, visibles dans les images hyperspectrales. Grâce à leur diversité spectrale, ces données se révèlent particulièrement pertinentes pour décrire cette complexité.

L'analyse des images hyperspectrales peut suivre plusieurs approches, allant de celles centrées sur les données à celles basées sur des modèles physiques [1]. Notre étude se concentre sur ces dernières, en particulier sur la manière dont le fond est traité. En effet, le modèle de Lee [5], un modèle semi-analytique couramment utilisé pour décrire la radiométrie des images spectrales, permet de représenter non seulement les composants de la colonne d'eau, mais aussi sa hauteur et le fond. Des études ont montré qu'il est possible d'obtenir des estimations fiables en inversant ce modèle [2], c'est-à-dire en cherchant les paramètres du modèle qui permettent de reproduire au mieux les données mesurées.

Lors de cette inversion, le fond est souvent représenté à l'aide d'un modèle linéaire. Les paramètres de ce modèle sont exprimés sous forme d'abondances, ce qui permet de caractériser directement le fond [4]. À cet égard, l'acronyme de l'algorithme BRUCE [4] (*Bottom Reflectance Un-mixing Computation of the Environment algorithm*) est significatif, car il suggère que l'inversion revient à estimer conjointement les paramètres de la colonne d'eau et à effectuer le démixage. Ce processus a d'ailleurs été étendu en assouplissant certaines contraintes liées au modèle du fond et à la construction des classes nécessaires au démixage [3,6].

Cette étude se concentre sur la manière dont le modèle du fond est intégré dans l'inversion du modèle de transfert radiatif, et plus précisément dans le modèle de Lee. Les développements proposés seront décrits à travers un point de vue graphique qui permet une description géométrique de l'inversion du modèle de transfert radiatif, amenant à proposer un nouvel algorithme d'estimation pour son inversion. Dans cet algorithme, le modèle de fond n'est plus construit à partir de classes mais comme un domaine de définition. Ainsi il peut être perçu comme une contrainte dans la procédure d'inversion et non plus comme une description sous forme de classes du fond. En comparant les résultats obtenus, nous constatons que les deux approches sont bien équivalentes en particulier concernant les estimées produites.

- [1] Ashphaq M., Srivastava P.K. & Mitra D. (2021), Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 6(4):340-359.
- [2] Dekker A.G. et al. (2011), Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments, *Limnology and Oceanography: Methods*, 9(9):396-425.
- [3] Jay S. et al. (2017), Hyperspectral remote sensing of shallow waters: Considering environmental noise and bottom intra-class variability for modeling and inversion of water reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 200:352-367.
- [4] Klonowski W.M., Fearn P.R.C.S. & Lynch M.J. (2007), Retrieving keybenthic cover types and bathymetry from hyperspectral imagery, *Journal of Applied Remote Sensing*, 1:011505.
- [5] Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G. & Patch J.S. (1998), Hyperspectral remote sensing for shallow waters: A semianalytical model, *Applied Optics*, 37(27):6329-6338.
- [6] Petit T., Bajjouk T., Mouquet P., Rochette S., Vozel B. & Delacourt C. (2017), Hyperspectral remote sensing of coral reefs by semi-analytical model inversion – Comparison of different inversion setups, *Remote Sensing of Environment*, 190:348-365.

Radiométrie hyperspectrale dans l'océan hauturier : de nouveaux robots au service de la validation satellitaire

Lou ANDRÈS^{1,2*}, Vincenzo VELLUCCI¹, Charlotte BEGOUEN-DEMEAUX³, Agnieszka BIALKEK⁴, Marine BRETAGNON², Edouard LEYMARIE¹, Antoine POTEAU¹, Emanuele ORGANELLI⁵, Antoine MANGIN², Hervé CLAUSTRE¹

¹ Sorbonne Université, CNRS, Institut de la Mer de Villefranche, IMEV, 181 chemin du Lazaret, 06230 Villefranche-sur-Mer, France, lou.andres@imev-mer.fr, enzo@imev-mer.fr, edouard.leymarie@imev-mer.fr, antoine.poteau@imev-mer.fr, herve.claustre@imev-mer.fr

² ACRI-ST, 260 route du Pin Montard, 06904 Sophia-Antipolis, France, marine.bretagnon@acri-st.fr, antoine.mangin@acri-st.fr

³ University of Maine, School of Marine Sciences, Aubert Hall, 178 Munson Rd, Orono, ME 04473, USA, charlotte.begouen@maine.edu

⁴ National Physical Laboratory, Hampton Road, Teddington TW11 0LW, UK, agnieszka.bialek@npl.co.uk

⁵ Institute of Marine Research, National Research Council of Italy, Piazzale Aldo Moro 7, 00185 Rome, Italy, emanuele.organelli@cnr.it

Mots-clés : BGC-Argo, Radiométrie hyperspectrale, Océan ouvert, Métrologie, Couleur de l'eau.

Le programme *BioGeoChemical-Argo* (BGC-Argo) met progressivement en place un réseau mondial de flotteurs-profileurs équipés de capteurs biogéochimiques et bio-optiques, incluant la mesure de l'irradiance descendante (Ed) sur trois bandes : 380 nm, 412 nm et 490 nm. Depuis 2022 et dans le cadre du projet ERC-REFINE, certains de ces flotteurs ont été équipés de radiomètres hyperspectraux TriOS-RAMSES adaptés, pour mesurer les profils d'Ed et de radiance montante (Lu). Quatorze de ces flotteurs sont maintenant opérationnels et fournissent des profils et des données de surface en temps quasi réel pour sept régions océaniques variées, représentatives de la diversité bio-optique de l'océan (Océan Indien, Mer d'Arabie, Îles Kerguelen, Océan Atlantique Nord, Dôme de Guinée, Baie de Baffin, Mer du Labrador, Îles d'Hawaï). Initialement fixées sur une résolution conventionnelle de 10 jours pour Argo, les mesures ont été acquises tous les 5 jours pendant 4 mois (de la mi-mars à la mi-juin) afin d'augmenter la probabilité de concordance pendant la première phase d'acquisition de la mission hyperspectrale PACE de la NASA.

Cette étude fournit une évaluation du potentiel des flotteurs BGC-Argo à atteindre les normes de mesure de référence fiduciaire (FRM) pour la validation des satellites de radiométrie de la couleur de l'océan. Pour ce faire, nous nous concentrons sur l'évaluation des différentes méthodes de détermination de la réflectance hyperspectrale de surface (Rrs) à partir des données des flotteurs BGC-Argo. En particulier, nous présentons le travail actuel sur la caractérisation des TriOS-RAMSES adaptés et les incertitudes spécifiques à la plateforme (calibration, extrapolation de la lumière, dark, dépendance en température, inclinaison, auto-ombrage, etc.) Le but de cette étude est d'obtenir une incertitude sur chaque mesure Rrs obtenue à partir des flotteurs hyperspectraux BGC-Argo. Pour ce faire, nous suivons la méthode présentée dans Bialek et al. (2020) [1] pour la bouée BOUSSOLE et utilisons principalement les caractérisations effectuées sur nos capteurs par le Laboratoire de Tartu. Une méthode de contrôle qualité des données hyperspectrale basée sur le travail d'Organelli et al. (2016) [2] a également été développée et nous permet de fournir les premières correspondances entre nos données in-situ qualifiées et les données OC-satellites (PACE et Sentinel3). Cette étude se termine par des indications sur les lacunes qui doivent encore être comblées pour que le réseau de flotteurs BGC-Argo mesurant la réflectance hyperspectrale devienne une flotte de plates-formes FRM.

[1] Bialek A. et al. (2020), Monte Carlo–Based quantification of uncertainties in determining ocean remote sensing reflectance from underwater fixed-depth radiometry measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(2):177-196.

[2] Organelli E. et al. (2016), A novel near-real-time quality-control procedure for radiometric profiles measured by bio-Argo floats: Protocols and performances, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(5):937-951.

Bathymétrie des petits fonds par couplage hyperspectral/profilleur LASER aérien

Josselin AVAL^{1*}, Ronan PIEDEVACHE¹, Anne-Gaëlle BRETECHE¹, Nicolas THOMAS¹, Marc LENNON¹,
Guillaume SICOT²

¹ Hytech-imaging, 115 rue Claude Chappe, 29280 Plouzané, France, marc.lennon@hytech-imaging.fr

² Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Institut Polytechnique de Paris, ENSTA, Technopole Brest-Iroise, 29238 Brest Cedex 3, France, guillaume.sicot@ensta.fr

Mots-clés : Bathymétrie, Hyperspectral, Profileur, Peu différé, Fusion

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du programme d'innovation CALHYB (Capteur Aérien Léger couplé Lidar/ Hyperspectral pour la mesure de la Bathymétrie et cartographie de la nature des fonds) financé par l'Agence d'Innovation de Défense. Produire la bathymétrie en temps peu différé constitue un des enjeux forts du projet. Une maquette de système aérien a été conçue à cette fin. Elle intègre une centrale inertielle, une caméra hyperspectrale, un profileur LASER spécialement conçu et développé pour la maquette, un capteur d'éclairage et des cartes embarquées. Le profileur LASER permet de contrôler le biais d'estimation de la bathymétrie obtenu par hyperspectral seul, tandis que le capteur d'éclairage permet de réduire l'impact de conditions d'illumination variables.

Nous proposons une synthèse de la méthodologie développée dans le cadre du programme, incluant les protocoles de mesure, les calibrations, les pré-traitements, les simulations et enfin l'analyse des données pour l'estimation de la bathymétrie. En temps différé, la méthode s'appuie sur l'inversion du modèle de transfert radiatif de Lee [1], calibré grâce au profileur LASER. En temps peu différé, les contraintes de calcul imposent d'utiliser une approche plus simple, ici le modèle de Stumpf [2] a été retenu. Une 1ère ligne de vol est utilisée pour effectuer la calibration de ce modèle à partir de la bathymétrie estimée par le profileur LASER, le modèle calibré est alors utilisé en streaming pour produire la bathymétrie. La bathymétrie estimée a été validée par comparaison aux données Litto3D[®]. Deux sites ont été utilisés pour l'évaluation : la rade de Brest et La Ciotat.

Parmi les résultats obtenus, la Figure 1 montre l'estimation de la bathymétrie avec le profileur LASER. De bonnes précisions bathymétriques et de géoréférencement sont obtenues, validant l'estimation des offsets d'angles du profileur et la détection de pics dans les formes d'onde. Une étape de segmentation de différents types de fond est réalisée sur les données de réflectance issues de l'hyperspectral. Le modèle de Stumpf est alors calibré spécifiquement sur chaque type de fond afin d'améliorer les performances d'estimation de bathymétrie. La Fig. 2 illustre la relation entre la bathymétrie et le ratio du modèle de Stumpf pour un fond sableux. La démonstration en vol finale de la maquette CALHYB aura lieu au printemps 2025.

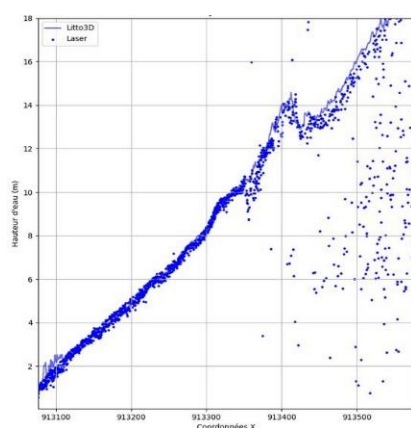


Fig. 1. Bathymétrie estimée avec le profileur comparée aux données Litto3D[®].

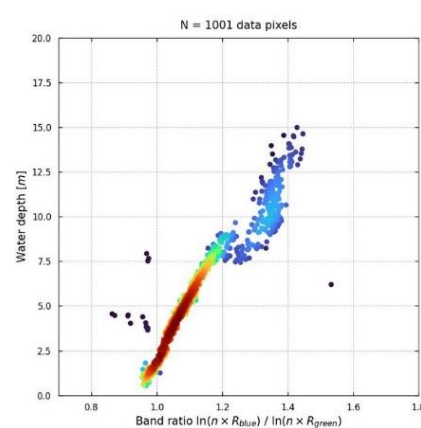


Fig. 2. Relation entre la bathymétrie et le ratio du modèle de Stumpf pour un fond sableux.

[1] Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G. & Patch J.S. (1999), Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Applied optics*, 38(18):3831-3843.

[2] Stumpf R.P., Holderied K. & Sinclair M. (2003), Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnology and Oceanography*, 48(1-2):547-556.

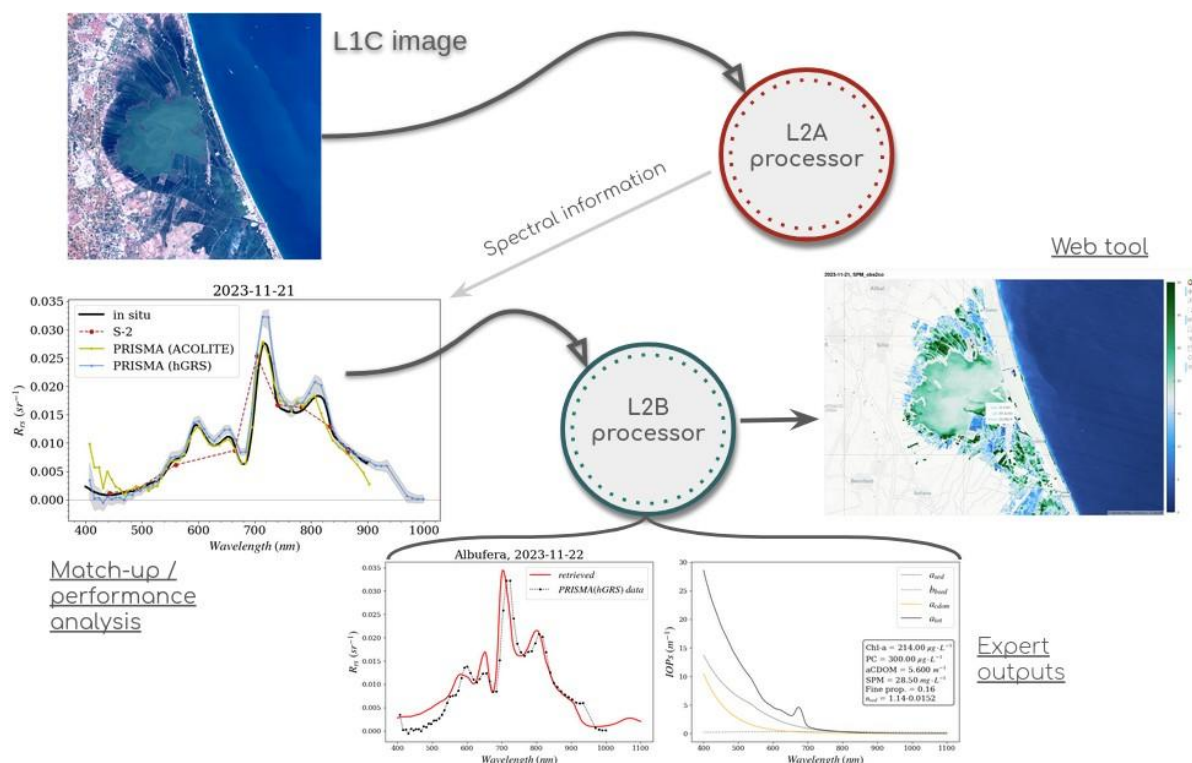
Atmospheric correction of hyperspectral high-resolution satellite images for inland and coastal waters monitoring: from top-of-atmosphere to phytoplankton identification

Tristan HARMEL¹

¹ Magellium, 1 rue Ariane, Ramonville-Saint-Agne, France, tristan.harmel@magellium.fr

Mots-clés : Atmospheric correction, High resolution, Aerosols, Sunlint, Water quality

Coastal and inland aquatic environments are facing multiple threats due to natural forcing, climate change and point-source or diffuse pollution due to human activities. Monitoring these environments and their inherent ecosystems is a key tool to understand the Earth system and plan more sustainable management. In order to enhance the optical information, specific hyperspectral satellite missions have been developed with pre-operational missions such as PRISMA or EnMAP, launched in 2019 and 2022, respectively. Fully operational hyperspectral missions have been planned by the space agencies with the two major missions CHIME (Sentinel-10, ESA) and SBG (NASA) to be launched by 2030. The main challenges in satellite monitoring of water quality parameters lie in atmospheric correction (AC) processing to properly retrieve the water-leaving signal, and inversion of this signal into ecological and biogeochemical parameters. As a difference with land remote sensing, optical satellite measurements above water are strongly impacted by sun and sky light reflection (glint) onto the water surface that should be corrected for. In the framework of the *atmospheric correction international exercise* (ACIX-III) led by ESA and NASA, we developed a novel AC processor named hGRS capable of retrieving the aerosol content, water vapor, sunglint and water-leaving radiance from a non-linear optimization solver. The algorithm will be described before showing the validation results based on match-up comparison done within ACIX-III. Finally, case studies are discussed based on applications to in situ and PRISMA/EnMAP satellite hyperspectral data as a demonstration for potential global applications to the next operational hyperspectral missions such as CHIME (ESA) and SBG (NASA).



Estimation de l'abondance des habitats benthiques et de la bathymétrie à partir des données hyperspectrales DESIS en eaux peu profondes

Audrey MINGHELLI^{1*}, Malik CHAMI², Mireille GUILLAUME³, Manchun LEI⁴, Claire DUNE⁵

¹ Laboratoire d'Informatique et Systèmes (LIS), Université de Toulon, CNRS-UMR 7020, 83041 Toulon Cedex 9, France, audrey.minghelli@univ-tln.fr

² Université Côte d'Azur, Sorbonne Université, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, Nice, France, malik.chami@upmc.fr

³ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France, mireille.guillaume@centrale-marseille.fr

⁴ LASTIG, Université Gustave Eiffel, ENSG, IGN, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé, France, manchun.lei@ign.fr

⁵ COSMER, Université de Toulon, 83041 Toulon Cedex 9, France, claire.dune@univ-tln.fr

Mots-clés : Remote sensing, Hyperspectral, Benthic habitats, Bathymetry, DESIS

La dégradation des écosystèmes côtiers est une conséquence des activités humaines. La cartographie des fonds marins peut être utilisée comme un outil pour évaluer l'impact des ancres de bateaux sur les herbiers marins. Le capteur hyperspectral DESIS (DLR, Allemagne) a été lancé en 2018 et possède une résolution spatiale moyenne (30 m), une large gamme spectrale (400-1000 nm) et un intervalle d'échantillonnage spectral de 2,55 nm. L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance du capteur DESIS pour l'estimation de la bathymétrie et de la composition des habitats benthiques dans les eaux côtières peu profondes, ainsi que d'analyser l'influence de l'intervalle d'échantillonnage spectral (2,55 ou 10 nm) sur la qualité des résultats.

L'inversion de la réflectance de l'eau dérivée de DESIS est réalisée à l'aide d'un modèle semi-analytique. La performance de l'estimation de la bathymétrie est validée à l'aide d'un modèle bathymétrique éprouvé, développé par la Marine nationale française (SHOM), à savoir Litto3D. Les abondances des espèces benthiques sont comparées à des données in-situ acquises à l'aide d'une caméra GoPro fixée sur un véhicule sous-marin téléguidé (ROV) et géolocalisé avec un GPS et un USBL. La bathymétrie est estimée à partir des données DESIS avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 1,69 m pour une profondeur du fond allant jusqu'à 10 m avec un intervalle d'échantillonnage spectral de 10 nm. Cette erreur augmente jusqu'à 2,19 m pour un intervalle de 2,55 nm en raison d'un bruit accru dans le signal. Les erreurs de RMSE obtenues pour l'estimation de la proportion (en %) d'espèces benthiques telles que la Posidonie et les algues photophiles brunes à une profondeur de 10 m sont respectivement de 37 % et 4 % pour un intervalle d'échantillonnage de 10 nm. Ces erreurs augmentent jusqu'à 46 % et 20 % pour un intervalle de 2,55 nm.

Il est également discuté que la taille de pixel de 30 m pourrait constituer une limitation pour l'estimation précise de la composition benthique et de la bathymétrie dans les zones côtières où la pente du fond marin est forte, ce qui est souvent observé dans les régions où le plateau continental est étroit. Globalement, cette étude confirme le grand intérêt et les avantages des capteurs hyperspectraux satellitaires pour améliorer les connaissances sur les écosystèmes aquatiques en eaux peu profondes.

Zone Critique

An inter-comparison exercise between spectrometers and handheld sensors to assess biochemical traits of orchard tree leaves

Karine ADELIN^{1*}, Nathan SIKORA¹, Jean-Baptiste FERET², Sylvain JAY³, Morgane ROTH⁴, Marie-Noëlle CORRE⁴, Sylvie SERINO⁵, Valérie SERRA⁵, Gilles VERCAMBRE⁵, Quentin BARRA⁶, Nicolas MARLET⁷

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pégélin, 31055 Toulouse, France, karine.adeline@onera.fr, nathan.sikora@onera.fr

² INRAE, UMR TETIS, Université de Montpellier, 34093 Montpellier, France, jean-baptiste.feret@teledetection.fr

³ INRAE, UMR EMMAH, 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon, France, sylvain.jay@inrae.fr

⁴ INRAE, UR GAFL, 67 allée des Chênes, 84143 Montfavet, France, morgane.roth@inrae.fr, marie-noelle.corre@inrae.fr

⁵ INRAE, UR PSH, 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon, France, sylvie.serino@inrae.fr, valerie.serra@inrae.fr, gilles.vercambre@inrae.fr

⁶ INRAE, UE A2M, 67 allée des Chênes, 84143 Montfavet, France, quentin.barra@inrae.fr

⁷ PRO-LITE TECHNOLOGY, 10 avenue Roger Lapébie, 33140 Villenave d'Ornon, France, nicolas.marlet@pro-lite.fr

Mots-clés : Spectroscopy, SPAD, DUALEX, PLSR, Biochemistry

Visible to short-wave infrared spectroscopy (0.4 – 2.5 μm) has been long used to quantify leaf biochemical traits from their optical properties. Various experimental datasets encompassing both of them were collected on this purpose. The spectral data vary by the spectral characteristics of the spectrometer (e.g., spectral resolution, signal-to-noise ratio), the type of measured optical properties (e.g., reflectance, transmittance, transreflectance) and the type of fore optics (e.g., contact probe, leaf-clip or integrating sphere) leading to specific directional properties (e.g., bi-directional, directional-hemispherical). Spectrometric measurements are expensive, and usually require logistics before their acquisitions in controlled conditions, such as collecting and storing the samples, and a long warm-up time for the instrument. An alternative is the use of handheld devices that are more portable and affordable for fast and high-throughput measurements in the field. They actually compute spectral indices related to leaf biochemical traits. However, these devices give access to a very limited set of these traits compared to spectrometers since they only consider a very small number of spectral bands. Thus, the question is which is the best trade-off in terms of optical device to estimate a given trait in comparison to costly and time-consuming laboratory analyses.

Leaf samples were collected for trees over two orchards during two field campaigns in June and September 2024. The first orchard experienced low phytosanitary inputs and is a core collection of replicated apricot varieties. The second one has conventional but well-reasoned inputs and is part of a national network of observatories dedicated to the phenology including both apricot and peach varieties. A total of 19 trees were sampled, including 5 peach varieties and 7 apricot ones for a total of 76 leaves per campaign. Leaf biochemical traits included chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content, nitrogen content, water and dry matter content. For each sample, optical properties were measured from four spectrometers and two handheld devices. The latter include a ASD FieldSpec3 Junior equipped with an integrating sphere measuring directional-hemispherical reflectance and transmittance, a ASD FieldSpec4 High-Res equipped with a contact probe and a black reference measuring bi-directional reflectance, a ASD QualitySpec Trek with a contact embedding a white reference measuring bi-directional transreflectance, a Spectral Evolution NaturaSpec spectrometer equipped with a leaf-clip including black and white references measuring bi-directional reflectance and transreflectance, SPAD and DUALEX handheld sensors. Partial least squares regression will be used to estimate the different leaf traits. The performances will be compared between the datasets and validated with classic metrics such as the root mean square error and the R2 score. Prospects include the upscaling of these results to outdoor conditions from unmanned aerial vehicle acquisitions at centimetric spatial resolution to target the leaf scale and observe the intra-individual variability of leaf biochemical traits inside a tree crown. This work is funded by the project ANR CANOP (ANR-22-CE04-0002).

Détection et caractérisation de la pollution par les plastiques sur les surfaces continentales

Florian CAVERNES^{1,2*}, Véronique ACHARD¹, Pierre-Yves FOUCHER¹, Romain JATIAULT², Leïla MEISTERTZHEIM³, Edouard LAVERGNE³, Wolfgang LUDWIG²

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pégérin, 31055 Toulouse, France, florian.cavernes@onera.fr, pierre-yves.foucher@onera.fr

² CEFREM, 52 avenue Paul Alduy, 66100 Perpignan, France, romain.jatiaux@univ-perp.fr, ludwig@univ-perp.fr

³ Plastic@Sea, 17 avenue Pierre Fabre, 66650 Banyuls-sur-Mer, France, communication@plasticatsea.com

Mots clés : Hyperspectral, Pollution plastique, Détection, Classification

La production annuelle de plastique ne cesse d'augmenter depuis les années 60, venant de pair avec l'augmentation de la pollution par les plastiques. Sachant que 80% des plastiques observés dans les océans provient des continents [1], il se dessine alors une nécessité de cartographier et collecter ces déchets sur terre avant qu'ils n'atteignent les océans. Cependant peu d'études sur la détection de macroplastiques (taille supérieure à 5 mm) ou de microplastiques (taille inférieure à 5 mm) par imagerie hyperspectrale drone sur surfaces continentales existent à ce jour. L'enjeu est alors d'évaluer le potentiel de cette technologie pour la cartographie de déchets plastiques dans différents contextes. En ce sens, trois jeux de données hyperspectrales ont été acquis, un en laboratoire avec une résolution spatiale de 1,3 mm et deux issus de campagnes drone sur zone littorale et sur scène végétalisée avec des résolutions spatiales de quelques cm. Plusieurs méthodes de détection et d'identification ont été développées (indices spectraux, distances spectrales, apprentissage automatique et démixage spectral) utilisant la base de données construite en laboratoire ainsi que des données spectrales en réflectance issues de la littérature [2]. Ce papier s'intéresse à la campagne drone en environnement littoral. Trois ateliers plastiques avec des échantillons de tailles (entre 1 et 50 cm) et types (PP, PS, PET, PE...) différents ont été disposés sur le sable puis imagés à plusieurs altitudes avec des résolutions spatiales comprises entre 3 et 10 cm dans la gamme 1-1,7 μm [Fig. 1a]. Les travaux se déroulent en trois phases, (i) détection de l'ensemble des échantillons plastiques disposés sur la scène ; (ii) identification du type des plastiques détectés ; (iii) évaluation des performances des différentes approches méthodologiques en utilisant les références terrain. Un premier exemple obtenu de carte de détection exploitant la méthode des indices spectraux est montré Fig. 1b. Dans ce cas le sPA (métrique de performances de détection allant de 0,5 à 1) est de 0,87, signifiant un faible taux de fausses alarmes. Ce résultat préliminaire montre le potentiel de la technologie drone combinée à l'imagerie hyperspectrale dans ce cadre d'application. Les performances d'identification des plastiques sont estimées ensuite par comparaison avec l'identification des échantillons disposés par mesures FTIR laboratoires.

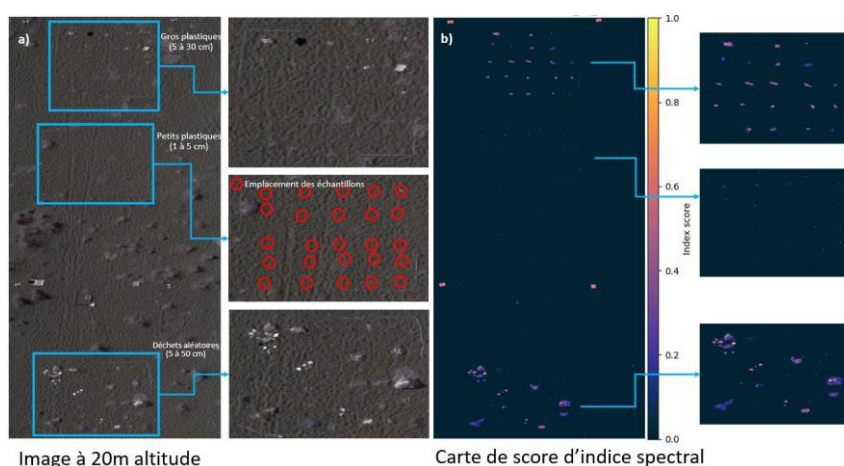


Fig. 1. a) Image de la scène en faux RGB et zoom sur les trois ateliers plastiques. b) Carte de score d'indice spectral et zoom sur les trois ateliers plastiques.

[1] Institut Heinrich Böll Stiftung (2020) « Atlas du Plastique | Heinrich Böll Stiftung | Bureau Paris - France ».

[2] 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.

Etude de l'impact des sources de variabilité sur la caractérisation minéralogique des sols par imagerie hyperspectrale

Corentin FERAY^{1,2*}, Stéphane JACQUEMOUD¹, Rodolphe MARION², Véronique CARRÈRE³

¹ Université Paris Cité, IPGP, CNRS, 75005 Paris, France, feray@ipgp.fr, jacquemoud@ipgp.fr

² CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon, France, rodolphe.marion@cea.fr

³ Nantes Université, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, UMR 6112, 44300 Nantes, France, veronique.carrere@univ-nantes.fr

Mots-clés : Sols, Réflectance spectrale, Effets de matrice, Modélisation

Ce travail vise à améliorer les méthodes de traitement d'images hyperspectrales pour l'identification et la quantification des minéraux des sols. Ces méthodes permettent d'interpréter le signal radiométrique mesuré pour chaque pixel de l'image en termes de propriétés physico-chimiques du sol observé. Du fait de la résolution spatiale limitée des instruments hyperspectraux, le spectre de réflectance correspondant à un pixel est généralement un mélange de spectres supposés purs de différents matériaux appelés *endmembers*. En pratique, les spectres des *endmembers* ne sont pas uniques en raison de la variabilité spectrale des matériaux, des effets de matrice tels que la teneur en eau de surface ou la granulométrie, et de la configuration de mesure de la scène observée [1].

Pour traiter les images hyperspectrales, on distingue deux grandes familles de modèles : ceux basés sur la physique [2] et ceux basés sur les données (dits *data-driven*) [3]. Les modèles physiques permettent de comprendre la variabilité spectrale des données mais nécessitent de connaître les propriétés optiques intrinsèques des constituants des sols qui sont généralement inconnues. Les modèles basés sur les données cherchent des corrélations entre les spectres de réflectance et les caractéristiques physico-chimiques des sols mais, leur côté "boîte noire" les rend souvent difficilement interprétables et peu généralisables à différents contextes.

Ce travail combine les avantages des modèles physiques et des modèles basés sur les données afin d'améliorer l'interprétabilité, la généralisation et la robustesse des méthodes de traitement d'images hyperspectrales aux différentes sources de variabilité spectrale. L'accent sera mis sur les effets de matrice liés à la teneur en eau et à la granulométrie des sols, qui sont parmi les sources de variabilité les plus importantes et les plus contraignantes dans l'analyse de la composition minéralogique des sols. Nous étudierons leur impact sur les paramètres des bandes d'absorption (amplitude, position, forme, etc.) des minéraux obtenus par des méthodes de déconvolution spectrale. Nous analyserons en particulier les limites de détection des bandes d'absorption de certains minéraux en fonction de la teneur en eau de surface du sol.

[1] Borsoi R.A., Imbiriba T., Bermudez J.C.M. et al. (2021), Spectral variability in hyperspectral data unmixing: A comprehensive review, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(4):223-270. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3071158>

[2] Dupiau A., Jacquemoud S., Briottet X. (2023), Reflectance of wet natural soils in the solar domain: contributions and limitations of physical models, in *Radiometry of wet surfaces. When water matters* (L. Simonot, Ed.), EDP Sciences, pp. 11-26. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2931-6.c003>

[3] Chen J., Zhao M., Wang X. et al. (2023), Integration of physics-based and data-driven models for hyperspectral image unmixing: A summary of current methods, *IEEE Signal Processing Magazine*, 40(2):61-74. <https://doi.org/10.1109/MSP.2022.3208987>

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

Hugo DORBES^{1*}, Colette BADOUDINE¹, Solofoniaina ANDRIAMIHAJASON¹, Julien PARELLE², Michel CHALOT^{2,3,4}, Sophie FABRE¹

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pélegrin, 31055 Toulouse, France, hugo.dorbes@onera.fr, sophie.fabre@onera.fr

² Chrono-Environnement, UMR 6249, Université Franche-Comté, 16 rue de Gray, 25000 Besançon, France, julien.parelle@univ-fcomte.fr

³ Université de Franche-Comté, 4 place Tharradin, 25211 Montbéliard Cedex, France, michel.chalot@univ-fcomte.fr

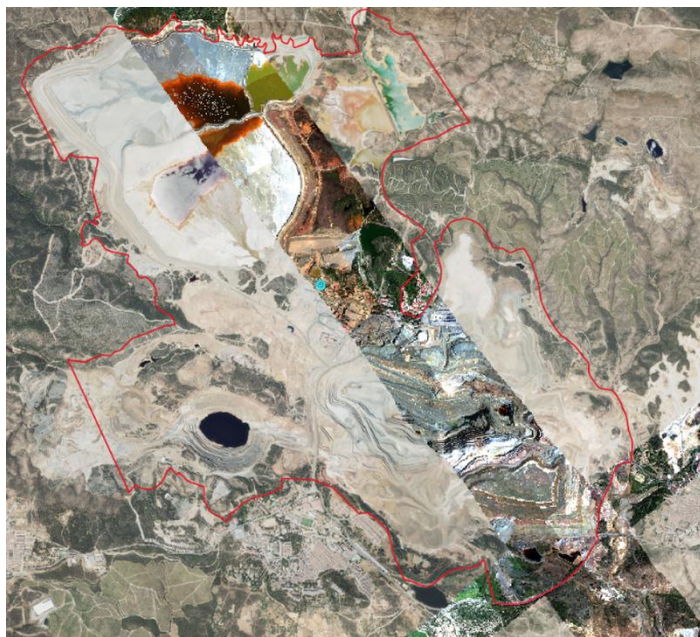
⁴ Université de Lorraine, 34 cours Léopold, Nancy Cedex, France

Mots-clés : Hyperspectral, Pollution, Métaux, Végétation, Phytostabilisation

Le projet Horizon-Europe EDAPHOS (2023-2027), coordonné par l'Université de Bourgogne Franche-Comté, 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. 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). Les études sont réalisées sur 7 sites en Europe, tous identifiés comme contaminés par des métaux lourds.

Le projet EDAPHOS s'articule autour de 2 grands axes de travail qui sont : (i) la mise en œuvre du phytomanagement, c'est-à-dire l'implantation de végétation spécifique sur les sites d'études afin de maîtriser et/ou de limiter le flux de contaminants en l'immobilisant dans le sol ou en l'accumulant dans la biomasse ; (ii) l'optimisation du suivi des sols contaminés et de la végétation par télédétection optique passive, en appliquant des méthodes de classification et d'estimation de contamination à des données multi-échelles (laboratoire, in-situ, drone, avion et satellite), hyper-(multi)-spectrales et multi-temporelles.

Les images hyperspectrales ont un potentiel pour la caractérisation de la pollution du sol de surfaces végétalisées (en particulier sur des sites industriels et miniers) et permettent d'identifier et de cartographier précisément les espèces végétales, étape nécessaire pour relier leurs traits spécifiques aux concentrations en métaux dans le sol. Des campagnes d'acquisition de données hyperspectrales aéroportées et multispectrales drone ont été réalisées en 2024 sur la mine d'extraction de cuivre de Rio Tinto d'extraction de cuivre (SP), l'une des plus importantes mines à l'échelle mondiale, une friche industrielle de Vieux-



Charmont (FR) contaminée aux métaux lourds (Ni, Zn...) et aux hydrocarbures, et la mine d'extraction de nickel de Kozani (GR). Ces données ont été 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, relevé des espèces végétales...). De plus, des images hyperspectrales satellitaires (PRISMA, EnMAP) ont été acquises à une date proche.

L'objectif de cette présentation est dans un premier temps de présenter les campagnes de mesures et données disponibles, puis dans un second temps, de présenter les premiers résultats de classification obtenus sur le site d'étude de Rio Tinto, en Espagne.

Fig. 1. Images aéroportées de la mine de Rio Tinto.

Application de l'imagerie hyperspectrale multi-échelle pour l'exploration et la caractérisation de ressources minérales multi-métaux (U, Pb, Zn, Cu, Ba/F)

Théo RUBIO¹, Antonio BENEDICTO², Sophie FABRE³, Hugo DORBES³, Aurélien BORDENAVE⁴, Frédéric Schmidt²

¹ ONERA/GEOPS/BRGM, Bâtiment 504, Rue du Belvédère, 91400 Orsay, France, theo.rubio@universite-paris-saclay.fr

² GEOPS, Bâtiment 504/509, Rue du Belvédère, 91400 Orsay, France, antonio.benedicto@universite-paris-saclay.fr, frederic.schmidt@universite-paris-saclay.fr

³ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Marc Pélegrin, 31055 Toulouse, France, sophie.fabre@onera.fr, hugo.dorbes@onera.fr

⁴ BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France, a.bordenave@brgm.fr

Mots-clés : Imagerie, Hyperspectrale, Multi-échelle, Exploration, Géologie

Dans un contexte de transition énergétique, la demande en métaux utiles à cette transition devient un enjeu stratégique. Le gouvernement français a récemment demandé au BRGM de réaliser un nouveau Grand Inventaire des ressources minérales du territoire. De nouvelles campagnes d'exploration doivent donc être mises en œuvre. Dans cette perspective, la télédétection optique utilisée comme aide à l'exploration permet de désigner rapidement des zones d'intérêt de manière non invasive pour l'environnement.

La télédétection optique par imagerie hyperspectrale (iHS) est encore peu utilisée en exploration géologique car les données hyperspectrales doivent être intégrées dans un processus multi-expertise comme la physique optique, l'intelligence artificielle et la géologie de terrain. Il apparaît donc nécessaire de formaliser cette application par la mise en place d'un protocole dédié à l'exploration géologique multi-échelle. L'objectif de la thèse est de produire une carte géologique haute résolution (< 1:25,000) du bassin de Lodève, connu pour abriter un gisement multi-métaux, afin d'identifier des zones d'intérêt pour l'exploration à l'aide d'une carte de proxys spectraux. Des cartes de proxys spectraux pour l'exploration ont été réalisées par plusieurs auteurs à différentes échelles, montrant que l'iHS apporte une donnée pertinente pour l'exploration géologique. Il est donc temps de passer à l'étape de l'application et l'interprétation de ce type de données afin d'optimiser son utilisation dans un contexte d'exploration minière.

Le site de test choisi est le bassin sédimentaire d'âge Carbonifère-Permien de Lodève (Hérault) qui contient de nombreuses ressources telle que des minéralisations d'uranium, de cuivre, zinc, plomb, argent, baryum, fluor, mais également des hydrocarbures et de la géothermie de surface. Durant cette étude, une bibliothèque de spectres dans le domaine réflectif allant de 0,4 à 2,5 µm (VNIR/SWIR) sera produite. Elle est basée sur des échantillons de minéraux et roches prélevés in situ qui servent traditionnellement d'indicateurs de gisement en exploration minière. En effet, ce sont le plus souvent des minéraux dits « secondaire » issues de l'altération de minéraux « primaire » qui sont présents en surface (Fig. 1).

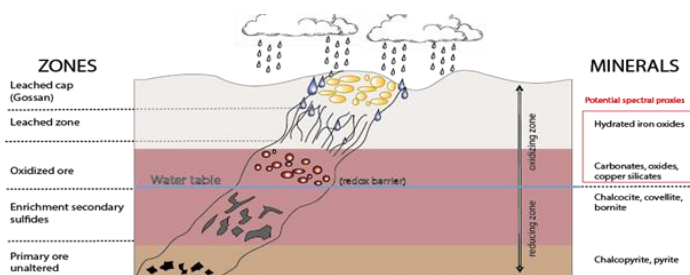


Fig. 1. Sample diagram of spectral proxies in supergene mineralization.

La démarche identifiée est 1) créer un fichier SIG de la zone ; 2) prélever des échantillons des zones minéralisées sur le terrain ; 3) construire une base de données spectrale multi-échelles ; 4) mettre en place une méthode de détection des minéraux d'intérêt basée sur des algorithmes de classification, prédiction, régression... ; 5) Appliquer la méthode à différentes échelles de mesures hyperspectrales et analyser les performances. Ces travaux permettront d'augmenter la résolution et la précision des cartes géologiques et ainsi d'affiner l'information sur la distribution des ressources minérales et mieux comprendre les facteurs influençant la répartition des gisements.

Détection minéralogique et quantification d'argile dans les sols par spectroscopie UV-VIS-NIR

McKenzie WOODMAN¹, Nicolas VENJEAN¹

¹ SPECTRAL EVOLUTION, 26 Parkridge Road, Haverhill, MA 01835, USA, mckenzie.woodman@spectralevolution.com, nicolas.venjean@spectralevolution.com

Mots-clés : Télédétection, Proche Infra-rouge, Spectroradiomètre, Classification, Quantification

La détection des minéraux du sol est aujourd'hui une mesure essentielle dans la recherche environnementale, géologique et pédologique. La plupart des sols sont un mélange de matières organiques, d'argile, de sable et de limon. En raison de leur grande surface et de leur charge négative, les argiles jouent un rôle essentiel dans la disponibilité des nutriments. Les nutriments végétaux courants sont chargés positivement, comme Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et Na^+ . La capacité de retenir et de stocker des ions chargés positivement est appelée capacité d'échange cationique (CEC). L'argile agit également comme un liant pour les particules du sol, aidant le sol à retenir l'humidité et à réduire la perte de nutriments due au lessivage. Les minéraux argileux les plus courants dans le sol comprennent la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. L'échantillonnage typique du sol nécessite une analyse en laboratoire coûteuse ou fastidieuse. Cela se fait généralement avec un système XRD qui consiste à broyer l'échantillon en poudre et à le manipuler de manière significative. Cette étude présente la possibilité d'utiliser une méthode de réflectance spectrale du sol pour identifier et quantifier les minéraux argileux sans traitement des échantillons.

Dans cette étude, nous avons sélectionné la kaolinite et l'halloysite à des fins de comparaison en raison de leurs similitudes chimiques, ainsi que la montmorillonite et l'illite. Ces minéraux ont été analysés à différentes concentrations dans le sol avec un spectromètre UV-Vis-NIR de haute résolution spectrale et grand rapport signal/bruit. Le logiciel d'identification et d'analyse spectrale EZ ID a été utilisé pour identifier et séparer les signatures spectrales des minéraux argileux.