



8^e colloque scientifique du Groupe Hyperspectral de la Société Française de Photogrammétrie et de Téledétection

Paris, 5-6 juillet 2023



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), Toulouse (2012), Porquerolles (2014), Grenoble (2016), Brest (2017), Montpellier (2018) et Toulouse (2019), nous sommes heureux d'accueillir la 8^e édition du colloque SFPT-GH de nouveau à Paris les 5 et 6 juillet 2023 sur le campus des Grands Moulins d'Université Paris Cité. Nous remercions chaleureusement nos sponsors institutionnels (CNES, CEA, ONERA, SFPT) et les exposants pour leur soutien financier, ainsi que Université Paris Cité 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

Karine Adeline, ONERA
Xavier Briottet, ONERA
Véronique Carrère, LPG Nantes
Camille Desjardins, CNES
Jean-Baptiste Féret, INRAE
Stéphane Jacquemoud, IPGP-UPC
Philippe Maisongrande, CNES
Rodolphe Marion, CEA
Aurélie Sand, CNES-SFPT

Exposants et sponsors



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



<https://hytech-imaging.fr/>



<https://www.l3harrisgeospatial.com/>



OPTOPRIM

Photons for Research & Industry

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



<https://www.pro-lite.fr/>



<https://qd-europe.com/>



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



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

Accès au colloque

Amphithéâtre Buffon

Université Paris Cité – Campus des Grands Moulins

15 rue Hélène Brion, 75013 Paris

<https://u-paris.fr/amphitheatre-buffon/>



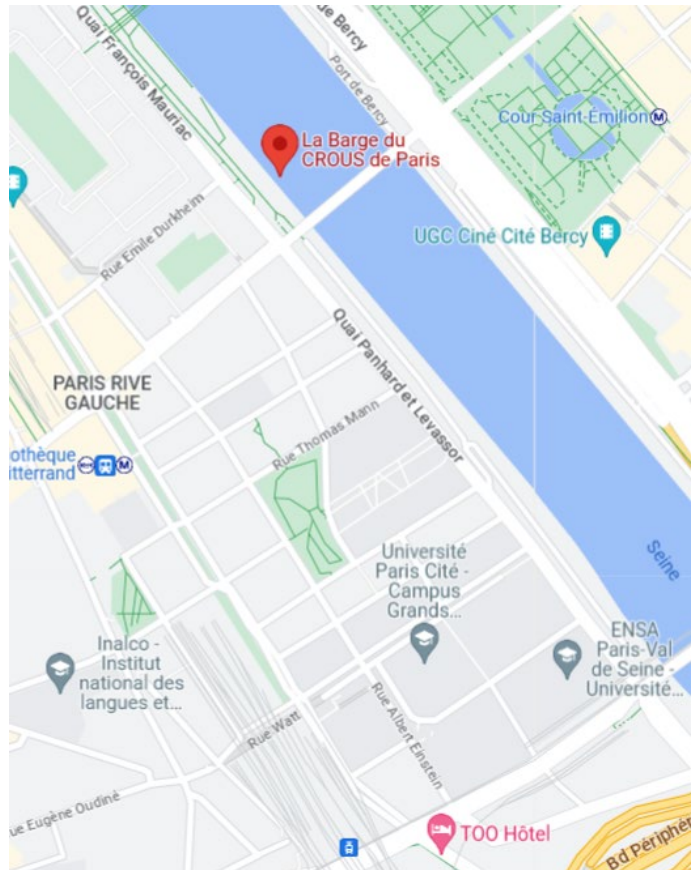
Cocktail dînatoire

La Barge du CROUS de Paris

Quai François Mauriac

Port de la Gare, 75013 Paris

<https://www.crous-paris.fr/restaurant/ru-la-barge-du-crous-de-paris-2/>



Programme court

Mercredi 5 juillet 2023

8h30 **Accueil**

8h45 **Ouverture du colloque**

Session 1 : Institutionnels-Exposants

9h00 **Présentation de la SFPT et du Groupe Hyperspectral**

Jean-Baptiste Féret (INRAE-Montpellier)

J.P. Rudant (SFPT-Saint Mandé et Université Gustave Eiffel-Champs sur Marne)

9h15 **Présentation du PNTS**

Karine Adeline (ONERA-Toulouse)

9h25 **Présentation du CNES**

Philippe Maisongrande (CNES-Toulouse)

9h35 **Présentations des exposants**

10h40-11h10 **Pause café**

Session 2 : Missions spatiales

Animatrice : Camille Desjardins

11h10 **Statut du projet Hyperspectral : un satellite binational à hautes résolutions spatiale et spectrale pour des applications scientifiques et militaires**

Antoine Flipo (CNES-Toulouse)

11h30 **GALENE : un projet de mission spatiale internationale dédiée à la télédétection des écosystèmes aquatiques (côtiers et eaux intérieures)**

Malik Chami (Laboratoire Lagrange-Nice)

11h50 **HYP4Uses : un service commercial d'imagerie spatiale hyperspectrale et ses applications**

Guillaume Cassar (Sophia Engineering-Valbonne)

12h10 **Hyperméthée : la composante hyperspectrale de la constellation française de nanosatellites d'Observation de la Terre**

Marc Lennon (Hytech-imaging, Plouzané)

12h30 **Présentation invitée**

The German environmental hyperspectral satellite EnMAP: Mission update and first results from the science activities

Sabine Chabrilat (GFZ-Potsdam)

13h00-14h00 **Déjeuner (buffet)**

Session 3 : Instrumentation-Méthodologie

Animateur : Xavier Briottet

14h00 **End-user driven optimization of the SWIR spectral sampling for a future hyperspectral sensor using end-to-end simulations**

Xavier Briottet (ONERA-Toulouse)

14h20 **Tuning hyperspectral mission specifications to the end-user needs through end-to-end simulations**

Camille Desjardins (CNES-Toulouse)

14h40 **Current and future radiometric calibration and validation of hyperspectral imaging systems at CNES**

Camille Desjardins (CNES-Toulouse)

15h00 Méthode de classification d'images hyperspectrales CHRIPS

Alexandre Alakian (ONERA-Palaiseau)

15h20 HyperPCA : à l'interface entre la théorie des matrices aléatoires et la spectroscopie du plasma induit par laser

Riccardo Finotello (CEA-Palaiseau)

Session 4 : Milieux littoraux

Animateur : Malik Chami

15h40 Présentation du groupe de travail hyperspectral en milieu aquatique

Audrey Minghelli (LIS-Toulon)

15h50 Evaluation de la contribution d'un capteur satellitaire hyperspectral (BIODIVERSITY) pour la cartographie de la composition de l'eau, l'estimation de la bathymétrie et la composition des fonds en milieu littoral et lacustre

Audrey Minghelli (LIS-Toulon)

16h10 L'imagerie hyperspectrale sous-marine pour discriminer et évaluer l'état écologique des habitats benthiques en milieu marin profond

Touria Bajjouk (IFREMER-Plouzané)

16h30 Importance de l'étalonnage de la chaîne de traitement : application à la télédétection des propriétés optiques de biofilms littoraux par ULM

Patrick Launeau (LPG-Nantes)

16h50-17h20 Pause café

Session Posters-Exposants

Méthode de détection de nuages CHIWAWA

Alexandre Alakian (ONERA-Palaiseau)

The potential of hyperspectral imaging for contextual and biophysical modeling of Brazilian forest plantations

Vitória Barbosa Ferreira (CIRAD-Montpellier)

Simulations d'images hyperspectrales de forêts méditerranéennes à partir du modèle de transfert radiatif DART, de données terrain et drone LiDAR : adéquation à des images aéroportées et satellitaires

Marianne Debue (CESBIO-Toulouse)

Télédétection multi-/hyper-spectrale et modélisation du transfert radiatif 3D pour le suivi de cultures de maïs

Romain Démoulin (Hyperplan-Bidart)

Aerosol and underlying surface characteristics retrieval at high spatial resolution

Yevgeny Derimian (LOA-Lille)

Tests statistiques pour l'analyse d'acquisitions hyperspectrales codées

Trung-Tin Dinh (IRAP-Toulouse)

Global tracking and quantification of oil and gas methane emissions from recurrent Sentinel-2 imagery

Thibaud Ehret (Centre Borelli-Saclay)

Caractérisation hyperspectrale des effets de matrice de sol par couplage de modèles physiques et de méthodes d'apprentissage automatique

Corentin Feray (TELLUX-Rouen)

Contribution of Fenix high-resolution hyperspectral airborne images to the socio-morphological characterization of Toulouse

Sébastien Gadal (ESPACE-Avignon)

À la recherche de peintures pariétales ou murales masquées : apports des mesures hyperspectrales et de susceptibilité magnétique

Morgane Jal (BIOGÉOSCIENCES-Dijon)

Développements méthodologiques pour le suivi d'estimation d'indicateurs d'inflammabilité à l'aide d'images hyperspectrales aéroportées en contexte forestier méditerranéen

Mathilda Porterie (ONERA-Toulouse)

Quantification de la fraction de couverture des Sargasses en surface et en profondeur (2-5 m) avec les données Sentinel-3/OLCI dans la mer des Caraïbes (Nord de l'Océan Atlantique)

Léa Schamberger (LIS-Toulon)

Impact of surface humidity of industrial and mining minerals on their spectral signature - Implications for their detection by hyperspectral imaging

Erica Uccellatori (IPGP/CEA-Paris/Bruyères-le-Châtel)

19h00-22h00 Cocktail dînatoire (Barge CROUS)

Jeudi 6 juillet 2023

Session 5 : Atmosphère

Animateur : Rodolphe Marion

- 9h00 **CORATHYP: A new atmospheric correction code dedicated to satellite hyperspectral imagery**
Xavier Lenot (CS Group-Toulouse)
- 9h20 **Methane plume detection on hyperspectral images with a matched filter variant and deep learning**
Elyes Ouerghi (Centre Borelli-Saclay)
- 9h40 **Inversion d'images hyperspectrales satellitaires et aéroportées avec un modèle de panache gaussien pour la restitution de flux d'émission de méthane**
Nicolas Nesme (SPASCIARamonville-Saint-Agne)
- 10h00 **Aerosol emission by industrial stacks using PRISMA hyperspectral imager**
Pierre-Yves Foucher (ONERA-Toulouse)
- 10h20 **Contenu en information d'interférogrammes parcellaires mesurés par un imageur hyperspectral innovant : étude de cas du monoxyde de carbone provenant d'une expérience d'occultation solaire au sol**
Sébastien Payan (LATMOS-Paris)

10h40-11h10 Pause café

Session 6 : Planétologie

Animateur : Frédéric Schmidt

- 11h10 **Analyse minéralogique utilisant le démélange linéaire et des contraintes de groupe**
Frédéric Schmidt (GEOPS-Orsay)
- 11h30 **Le Plexiglas® comme analogue des glaces planétaires**
François Andrieu (GEOPS-Orsay)
- 11h50 **Microphysics of Europa's surface using Galileo/NIMS data**
Guillaume Cruz-Mermy (GEOPS-Orsay)
- 12h10 **Un regard vers la surface : cartographie de l'albédo de surface de Titan à l'aide des données hyperspectrales infrarouges de Cassini/VIMS**
Maël Es-Sayeh (IPGP-Paris)
- 12h30 **MIRS imaging spectrometer for the Martian Moon Explorer (MMX) mission**
Sonia Fornassier (LESIA-Meudon)

12h50-13h50 Déjeuner (buffet)

Session 7 : Végétation

Animateur : Jean-Baptiste Féret

- 13h50 **Projet HyperMED : estimation des traits fonctionnels de forêts méditerranéennes à canopée ouverte par imagerie hyperspectrale en prévision des missions BIODIVERSITY et SBG**
Karine Adeline (ONERA-Toulouse)
- 14h10 **Cartographie de la diversité spécifique forestière des milieux tempérés à partir d'imagerie hyperspectrale**
Marc Lang (DYNAFOR-Castanet Tolosane)

14h30 **Exploration des sources d'incohérence dans la réflectance spectrale (spectroscopie d'imagerie aéroportée) sur la canopée des forêts tropicales**

Colin Prieur (AMAP-Montpellier)

Session 8 : Milieux anthropisés

Animatrice : Véronique Carrère

14h50 **Détection et caractérisation de macro et microplastiques à partir d'images hyperspectrales acquises par drone**

Véronique Achard (ONERA-Toulouse)

15h10 **Détection de paramètres chimiques du sol à l'aide de données hyperspectrales**

Delphine Nobileau (Capgemini-Toulouse)

15h30 **Détection et caractérisation de polluants dans les eaux issues de rejets industriels par imagerie hyperspectrale aéroportée**

Louis Zaugg (CEA-Bruyères-le-Châtel)

15h50 Clôture du colloque

Programme détaillé



Missions spatiales

Statut du projet Hyperspectral : un satellite binational à hautes résolutions spatiale et spectrale pour des applications scientifiques et militaires

Antoine FLIPO^{1*}, Camille DESJARDINS¹, Damien RODAT¹, Laurie PISTRE¹, Laure OUDDA¹, Thierry CARLIER¹

¹ CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, antoine.flipo@cnes.fr, camille.desjardins@cnes.fr, damien.rodats@cnes.fr, laurie.pistre@cnes.fr, laure.oudda@cnes.fr, thierry.carlier@cnes.fr

Mots-clés : Projet, Satellite, Hyperspectral, Mission, Spécifications

Depuis maintenant une quinzaine d'années, le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est engagé dans différentes études de systèmes hyperspectraux pour répondre aux besoins des communautés nationales scientifique et de défense.

Cette présentation, dans la continuité de celle du colloque de 2019, vise à informer la communauté nationale des progrès accomplis dans le montage d'une future mission hyperspectrale à hautes résolutions spatiale et spectrale pour les besoins scientifiques et de défense. Cette mission, un démonstrateur pré-opérationnel, a pour objectif de valider des concepts instrumentaux novateurs, de fournir des données pour des applications expérimentales et de préparer de futurs systèmes opérationnels.

L'historique des différentes étapes du projet depuis 2019 sera tout d'abord présenté, avec la phase A menée en 2019-2020 en coopération avec Singapour, les études instrumentales franco-françaises menées de 2021 à 2022 et la troisième phase A qui se déroule en 2023 en coopération avec un partenaire étranger.

Ensuite, la présentation donnera des informations détaillées sur les spécifications du système et les principaux contributeurs à la performance instrumentale. Le système à venir présente une amélioration significative de la résolution spatiale par rapport aux systèmes hyperspectraux satellitaires actuels, avec un GSD de 10 m. De plus, il offrira un champ de vue de 10 km, une résolution spectrale de 10 à 14 nm, ainsi qu'une étendue spectrale allant de 400 nm à 2400 nm.

Enfin, l'organisation du projet, les études en cours et à venir ainsi que le planning de la future mission seront présentés. Une phase de faisabilité se déroule jusqu'à fin 2023, suivie du démarrage des phases de réalisation en 2024 et d'un lancement prévu pour fin 2028.

GALENE : un projet de mission spatiale internationale dédiée à la télédétection des écosystèmes aquatiques (côtiers et eaux intérieures)

Malik CHAMI^{1*} et al.

¹ Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, 96 boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice cedex 4, France, malik.chami@upmc.fr

Mots-clés : Télédétection satellitaire, Observation, Capteurs, Ecosystèmes côtiers

Les écosystèmes aquatiques côtiers jouent un rôle socio-économique fondamental. Ils sont le siège d'une biodiversité importante et contribuent significativement au cycle du carbone ; e.g., 30% de la production primaire globale y a lieu. Ils sont notablement impactés par les changements climatiques actuels. Il est crucial d'améliorer notre compréhension du cycle du carbone, du fonctionnement des habitats marins et de réduire la pollution des écosystèmes, induite notamment par les rejets de plastiques de plus en plus importants, pour proposer des politiques de gestion des milieux littoraux adaptées.

Des observations systématiques et à l'échelle globale, telles que le permet la télédétection spatiale, sont nécessaires pour appréhender la complexité des systèmes aquatiques côtiers. Bien qu'une multitude de missions spatiales aient été mises en orbite pour étudier la biologie et la biogéochimie de l'océan ouvert, il n'existe à l'heure actuelle aucune mission dédiée spécifiquement à l'observation optimale des eaux côtières et des eaux intérieures. Ce déficit s'explique d'une part par la complexité des propriétés optiques de ces écosystèmes et d'autre part par les défis technologiques pour disposer de capteurs satellitaires ayant des caractéristiques spectrale, spatiale et radiométrique adaptées à l'observation de ces milieux. Les capteurs actuels ne sont pas capables de fournir soit une observation à l'échelle du globe (e.g., PRISMA, DESIS, EnMap), soit une qualité radiométrique suffisante pour l'étude des eaux fortement productives absorbantes (e.g., Sentinel-2), soit une discrimination spectrale fine pour identifier les hydrosols et la diversité benthique.

Une future mission spatiale, GALENE (Global Assessment of Limnological, Estuarine and Neritic Ecosystems), a été proposée (en 2020 et prochainement en 2023) à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) dans le cadre de l'appel à idée Earth Explorer par la communauté scientifique internationale pour répondre à ces enjeux. Le concept de GALENE consiste en une synergie de trois capteurs innovants (hyperspectral, polarimétrique et panchromatique) dédiés à l'observation des écosystèmes aquatiques. Les objectifs scientifiques ainsi que les défis technologiques relevés par GALENE seront présentés.

HYP4Uses : un service commercial d'imagerie spatiale hyperspectrale et ses applications

Guillaume CASSAR^{1*}, Xavier BRIOTTET², Laurent POUTIER², Françoise VIALLEFONT-ROBINET²

¹ Sophia Engineering, 5 rue Soutrane, 06560 Sophia Antipolis, France, guillaume.cassar@sophiaengineering.com

² ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, xavier.briottet@onera.fr, laurent.poutier@onera.fr, francoise.viallefont@onera.fr

Mots-clés : Imagerie hyperspectrale, Démonstrateur, Télédétection, NewSpace

Le projet HYP4Uses vise à expérimenter en orbite, dès 2026, un service de bout en bout de valorisation des données spatiales hyperspectrales par nano-satellite, intégrant les moyens d'acquisition, de récupération, de traitement et exploitation des images.

L'imagerie satellitaire hyperspectrale est un changement de paradigme, encore émergent, ouvrant de multiples nouveaux champs d'applications et offrant une richesse d'informations majeures au regard des grands enjeux de souveraineté, de lutte contre le réchauffement climatique, de développement durable et sociétaux.

HYP4Uses propose une solution nano-satellite performante, compacte et à coût faible au regard des grandes missions scientifiques, qui offrira des données haute résolution hyperspectrale, haute résolution temporelle via une constellation, et un très haut potentiel d'applications et services. Ce projet est porté par la société française SOPHIA, responsable d'une chaîne industrielle et scientifique, française et européenne, impliquant notamment l'ONERA.

L'objectif de cette présentation est de décrire auprès de la communauté française la mission HYP4Uses, ses principaux objectifs applicatifs actuellement identifiés, les dates clés de son développement ainsi que les principales caractéristiques instrumentales.

Hyperméthée : la composante hyperspectrale de la constellation française de nanosatellites d'Observation de la Terre

Marc LENNON^{1*}, Nicolas THOMAS¹, Paul BLOTTIERE¹, Josselin AVAL¹, Giao-Minh NGUYEN², Frédéric TROMEUR², Tanguy DUVAL², Philippe MATEU²

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

² PROMETHEE, 55 rue La Boétie, 75008 Paris, France, g.nguyen@promethee.earth

Mots-clés : New space, Nanosatellite, Cal/val

Prométhée, startup française du new space, développe une nouvelle filière pour l'Observation de la Terre basée notamment sur son projet de lancement et d'opération d'une constellation de nanosatellites embarquant des imageurs multi et hyperspectraux. La constellation offrira un taux de revisite et des capacités réactives inédites, ouvrant la voie d'applications nouvelles dans de nombreux domaines, de la surveillance environnementale à la sécurité.

Son premier nanosatellite multispectral Protométhée sera lancé fin 2023, suivi du premier nanosatellite hyperspectral Hyperméthée fin 2024 - début 2025, puis du premier capteur opérationnel JAPETUS également prévu courant 2025. Suivra le lancement d'une constellation de 20 nanosatellites d'observation embarquant des charges multi et hyperspectrales, opérationnelle à partir de fin 2025. Fournisseur de données, Prométhée proposera également des services d'intelligence environnementale et stratégique au travers d'une plate-forme de diffusion et d'agrégation de données hétérogènes. Cette dernière est conçue pour s'adresser à des spécialistes, mais avant tout à des utilisateurs non experts de l'imagerie spatiale qui accéderont aux données et services de manière simple et rapide. Ces nouveaux types de données et services sont en partie issus des remontées des prescripteurs scientifiques et publics (notamment rapports sur les applications satellitaires du Ministère de la Transition Ecologique 2023 - 2027).

Hytech-imaging est partenaire de Prométhée, pour l'accompagnement sur le volet hyperspectral de la constellation, sur la mise en place des protocoles de cal/val, et sur développement de chaînes de traitement aux niveaux L2/L3 pour les applications côtières et maritimes.

La plate-forme et les instruments embarqués Protométhée et Hyperméthée seront présentés, incluant les configurations spatiales, spectrales, orbites, et performances attendues. La procédure de cal/val en cours de mise en place par Hytech-imaging à partir d'un réseau de stations sols sera détaillée. Suivront les spécifications principales des chaînes de traitement aux niveaux L2 et L3 en préparation, avec notamment les produits de monitoring de l'environnement côtier (bathymétrie, qualité de l'eau, biodiversité côtière). Des perspectives offertes par ces produits et les capacités réactives et de revisite de la constellation seront proposées.

Enfin, la possibilité de mise à disposition de données des premiers capteurs Protométhée et Hyperméthée à la communauté scientifique sera discutée.

The German environmental hyperspectral satellite EnMAP: Mission update and first results from the science activities

Sabine CHABRILLAT^{1*}

¹ Helmholtz Center Potsdam German Research Centre for Geosciences (GFZ) and Leibniz University Hannover (LUH), Germany, chabri@gfz-potsdam.de

The Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) is the first German spaceborne hyperspectral satellite mission. EnMAP aims at monitoring and characterizing the Earth's environment on a global scale. Core science objectives are toward studying environmental changes, ecosystem responses to human activities, and management of natural resources.

EnMAP was launched into a sun-synchronous orbit with a SpaceX Falcon 9 on April 1st 2022. The mission has successfully concluded the commissioning phase at the end of October 2022 and data are available to the user community since then with a free and open access data policy after registration at <https://planning.enmap.org/>. Over the next 5 years the satellite will acquire data over areas of the Earth's surface selected upon user's observation request ("on-demand"). The geochemical and biophysical parameters that can be derived from the hyperspectral data will provide information on the status of terrestrial and aquatic ecosystems, thus allowing to model key processes of the environment. The EnMAP mission consortium is composed of the DLR Space Administration in Bonn that is responsible for the overall project management, OHB is responsible of the space segment, DLR Earth Observation Center is responsible of the ground segment, and GFZ Potsdam is responsible for the science related activities and science mission support.

In particular, EnMAP was accompanied by an extensive scientific exploitation preparation program that has been run for more than a decade to support industrial and mission development, and scientific exploitation of the data by the user community, led by GFZ. Currently, this program includes mission support during the commissioning and nominal phase dedicated to the monitoring of data quality and validation of EnMAP data products, further development of methods and open softwares toolboxes for the data pre-processing and for the retrieval of geo- and bio-physical parameters, development of new online educational resources (HYPERedu, MOOC imaging spectroscopy, user training), and the demonstration in a few case studies of the observed current capabilities for research and applications based on different test sites and methodologies. In this presentation, we aim to present an overview of the mission current status and 1st demonstration of science mapping case studies,

Instrumentation-Méthodologie

End-user driven optimization of the SWIR spectral sampling for a future hyperspectral sensor using end-to-end simulations

Xavier BRIOTTET^{1*}, Karine ADELIN¹, Touria BAJJOUK², Véronique CARRÈRE³, Malik CHAMI⁴, Yohann CONSTANS¹, Yevgeny DERIMIAN⁷, Alice DUPIAU^{1,5}, Marie DUMONT⁶, Stéphanie DOZ¹, Sophie FABRE¹, Pierre-Yves FOUCHER¹, Hervé HERBIN⁷, Stéphane JACQUEMOUD⁵, Marc LANG⁸, Arnaud LE BRIS⁹, Pavel LITVINOV¹⁶, Sophie LOYER¹⁰, Rodolphe MARION¹¹, Audrey MINGHELLI¹², Thomas MIRAGLIO¹, David SHEEREN⁸, Benjamin SZYMANSKI¹³, Frédéric ROMAND¹⁵, Camille DESJARDINS¹⁴, Damien RODAT¹⁴, Benoît CHEUL¹⁴

¹ Université Toulouse, ONERA-DOTA, France, xavier.briottet@onera.fr, karine.adeline@onera.fr, yohann.constans@magellium.fr, stephanie.doz@onera.fr, sophie.fabre@onera.fr, pierre-yves.foucher@onera.fr, thomas.miraglio@gmail.com,

² Ifremer, DYNECO, LEBCO, France, touria.bajjouk@ifremer.fr

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

⁴ Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, CNRS, France, malik.chami@upmc.fr

⁵ Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, France, dupiau@ipgp.fr, jacquemoud@ipgp.fr

⁶ Université Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, France, marie.dumont@meteo.fr

⁷ Université Lille, CNRS, UMR 8518, LOA, France, yevgeny.derimian@univ-lille.fr, herve.herbin@univ-lille.fr

⁸ Université Toulouse, INRAE, UMR DYNAFOR, France, marc.lang@toulouse-inp.fr, david.sheeren@ensat.fr

⁹ University Gustave Eiffel, LASTIG, ENSG, IGN, France, arnaud.le-bris@ign.fr

¹⁰ SHOM, Brest, France, sophie.loyer@shom.fr

¹¹ CEA/DAM/DIF, Arpajon, France, rodolphe.marion@cea.fr

¹² Université de Toulon, CNRS, SeaTech, LIS laboratory, UMR 7020, France, audrey.minghelli@univ-tln.fr

¹³ DGA, Paris, France, benjamin.szymanski@intradef.gouv.fr

¹⁴ CNES, Toulouse, France, camille.desjardins@cnes.fr, damien.rodatt@cnes.fr, benoit.cheul@cnes.fr

¹⁵ ACRI-ST, Sophia-Antipolis, France, frederic.romand@acri-st.fr

¹⁶ GRASP SAS, Villeneuve d'Ascq, France, pavel.litvinov@grasp-sas.com

Keywords: Imaging spectroscopy, Spectral sampling strategy, SNR, Calibration, End-to-end simulations

CNES is currently conducting a Phase A study to assess the feasibility of a future hyperspectral imaging sensor (10 m spatial resolution) combined with a panchromatic camera (2.5 m spatial resolution). This mission focuses on high-resolution requirements both spatial and spectral, as inherited from previous French studies such as HYPEX, HYPXIM, and BIODIVERSITY. To meet user needs, cost, and instrument compactness constraints, the French hyperspectral Mission Advisory Group (MAG) was asked by CNES to provide recommendations on SWIR spectral sampling for various user applications.

This paper presents the processing and MAG results, which aim to define the optimal spectral sampling and spectral resolution in the SWIR domain for the following applications: geosciences, forestry at the tree level, coastal and inland waters, urban areas, industrial plumes, cryosphere, and atmosphere. All products simulated in this exercise used the same CNES end-to-end processing chain, with the same realistic instrumental parameters, allowing easy comparison between user applications. 648 simulations were performed with different spectral strategies, radiometric calibration performances and Signal-to-Noise Ratios (SNR): 24 instrument configurations × 25 datasets (22 images + 3 spectral libraries).

Results show that a 16/20 nm spectral sampling in the SWIR domain is sufficient for most applications. However, a 10 nm spectral sampling in the SWIR domain is recommended for applications based on specific absorption bands such as mineralogy, industrial plume or atmospheric gas. Additionally, a slight loss is generally observed when the radiometric calibration performance decreases, with some exceptions in bathymetry and cryosphere (estimation of equivalent Black Carbon concentration) for which a high performance decrease is observed. Finally, with the lower tested SNR level, most of the evaluated applications can be fulfilled except for bathymetry, shallow water classification due to low reflectance as well as carbon dioxide and methane estimation, which asks for the higher tested SNR level.

Based on these results, CNES is currently evaluating the best trade-off to design the future hyperspectral sensor to meet the objectives of the prioritized applications.

Tuning hyperspectral mission specifications to the end-user needs through end-to-end simulations

Camille DESJARDINS^{1*}, Damien RODAT¹, Frédéric ROMAND², Jean-Pascal BUROCHIN³, Arthur DICK¹

¹ CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, camille.desjardins@cnes.fr, damien.rodatt@cnes.fr, arthur.dick@cnes.fr

² ACRI-ST, 5 esplanade Compans Caffarelli, 31000 Toulouse, France, frederic.romand@acri-st.fr

³ Magellium, 1 rue Ariane, 31520 Ramonville-Saint-Agne, France, jean-pascal.burochin@magellium.fr

Keywords: Instrument, Mission, Requirements, End-to-end simulation

The first set of high-level mission requirements for the future French high-resolution hyperspectral mission is inherited from previous mission studies [1,2] such as HYPXIM, and includes requirements from a national group of end-users [3]. Along with the strong need for a high spatial resolution and these stringent requirements, the resulting instrumental design was heavily constrained and the balance between all contributors to the image quality was still to be done.

Based on its legacy on mission engineering and mission performance, CNES has developed an End-to-End Simulator (E2ES) built to assess mission requirements and concepts as well as to help the definition of the system requirements. In addition, it was designed to aid the development and verification of detailed Level-1 and Level-2 algorithms in future mission phases. The E2ES generates hyperspectral images, taking into account the instrument transfer function and major acquisition perturbations. These images can be analyzed by expert end-users to evaluate the performance of their applications [4]. CNES has also included representative end-user scenarios in the simulator. This approach paves the way for a massive evaluation of various instrumental configurations, to speed up the instrumental design process and focus end-user expertise on the main challenges.

The simulator as well as the main instrumental requirements obtained from these analyses will be discussed. For now, the available end-user scenarios cover the following applications: bathymetry, mineralogy and vegetation analysis. The result of this study is to assess the impact of image quality on the final application performances, not to challenge the end-user algorithms themselves. So, it is assumed that the end-user scenarios are based on state-of-the-art algorithms with representative input dataset. End-users are always improving their approaches and compensating for instrumental defects. To overcome the limitation of the implemented scenarios, all performance results are analysed by comparison to the ones obtained with the initial set of requirements.

Overall, the end-to-end simulation of hyperspectral images is an effective tool for evaluating instrument specifications and their impact on end-user applications. This study has helped defining the requirements for the current hyperspectral mission and provides useful insights for future research endeavours.

[1] Briottet X. et al. (2011), HYPXIM: A new hyperspectral sensor combining science/defence applications, *3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 6-9 June 2011, Lisbon (Portugal), 4 pp.

[2] Michel S., Gamet P., & Lefevre-Fonollosa M.J. (2011), HYPXIM — A hyperspectral satellite defined for science, security and defence users, *3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, 6-9 June 2011, Lisbon (Portugal), 4 pp.

[3] Groupe de Synthèse Hyperspectrale (2008), *Synthèse sur l'imagerie hyperspectrale*, CNES Strategic Documentation. http://www.sfpt.fr/hyperspectral/wp-content/uploads/2013/01/GSH_Rapport_Final_Nov2008.pdf

[4] Briottet X. et al. (2023), End-user driven optimization of the SWIR spectral sampling for a future hyperspectral sensor using end-to-end simulations, *8e Colloque Hyperspectral*, Paris (France).

Current and future radiometric calibration and validation of hyperspectral imaging systems at CNES

Camille DESJARDINS^{1*}, Damien RODAT¹, Robin MARRON¹, Arthur DICK¹, Sébastien MARCQ¹, Aimé MEYGRET¹ et al.

¹ CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, camille.desjardins@cnes.fr, damien.rodatt@cnes.fr, robin.marron@cnes.fr, arthur.dick@cnes.fr, sebastien.marcq@cnes.fr, aime.meygret@cnes.fr

Keywords: Radiometry, Calibration, Validation, In-situ measurements

Radiometric calibration is crucial for providing a physical meaning to the digital values of an image by linking them to a parameter known as radiance at the top of the atmosphere. Calibration contributes to the data quality obtained through optical remote sensing and makes possible to combine measurements from various instruments. Hyperspectral imaging instruments, due to their multiple bands and wide spectral range, present significant challenges for their radiometric calibration and validation.

The purpose of this presentation is to showcase the current and future means of radiometric calibration of hyperspectral imaging systems at CNES, along with the main current calibration results obtained from these systems.

Over the last two decades, using the SADE/MUSCLE calibration system [1], CNES has calibrated and cross-calibrated a wide range of multispectral imagers, including SPOT1 to SPOT7, MERIS, Pleiades, Pleiades-Neo, POLDER, VEN μ S, Sentinel-2 MSI, Sentinel-3 OLCI & SLSTR, etc. Furthermore, CNES participates in the radiometric validation of several systems via its multispectral photometers [2] located at La Crau and Gobabeb as part of the RadCalNet network [3].

This presentation will begin by demonstrating how current radiometric calibration methods dedicated to multispectral imagers can be adapted to hyperspectral imagers like PRISMA or EnMAP. Additionally, results from cross-calibration on desert targets [4] of these hyperspectral imagers with widely used reference sensors will be presented. Radiometric validation results will also be shown using the in-situ photometer installed at instrumented sites of La Crau and Gobabeb.

Finally, the presentation will discuss several radiometric calibration means currently under development at CNES, including the development of a photometer prototype for in-situ hyperspectral measurements at La Crau.

- [1] Cabot F., Hagolle O., Ruffel C., & Henry P.J. (1999), Remote sensing data repository for in-flight calibration of optical sensors over terrestrial targets, in *Proc. International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, SPIE 3750, Denver (CO, USA), 24 September 1999.
- [2] Meygret A., Santer R., & Berthelot B. (2011), ROSAS: A robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration, in *Proc. Earth Observing Systems XVI*, SPIE 8153, San Diego (CA, USA), 13 September 2011.
- [3] Bouvet M., Thome K., Berthelot B., Bialek A., Czaplak-Myers J., Fox N.P., Goryl P., Henry P., Ma L., Marcq S., Meygret A., Wenny B.N., & Woolliams E.R. (2019), RadCalNet: A radiometric calibration network for Earth observing imagers operating in the visible to shortwave infrared spectral range, *Remote Sensing*, 11(20):2401.
- [4] Lacherade S., Fournie B., Henry P., & Gamet P. (2013), Cross calibration over desert sites: description, methodology, and operational implementation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3):1098-1113.

Méthode de classification d'images hyperspectrales CHRIPS

Alexandre ALAKIAN^{1*}, Véronique ACHARD²

¹ ONERA-DOTA, Université Paris Saclay, 6 chemin de la Vauve aux Granges, 91123 Palaiseau, France, alexandre.alakian@onera.fr

² ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, veronique.achard@onera.fr

Mots-clés : Classification non supervisée, Absorption spécifique, Indice spectral, Classe de rejet

La méthode de classification CHRIPS (Classification of Hyperspectral Reflectance Images with Physical and Statistical criteria) est présentée [1]. Elle vise à classer chaque pixel à partir d'un ensemble donné de quinze classes : surface sombre non identifiée, eau, matière plastique, carbonate, argile, végétation (verte et sombre, verte et dense, verte et éparse, stressée), toiture de maison/tuile/oxyde de fer, asphalte, véhicule/peinture/surface métallique, gravier non carbonaté, neige et nuages. Chaque classe est caractérisée par des critères physiques (détection d'absorptions spécifiques ou de caractéristiques de forme) ou des critères statistiques (utilisation d'indices spectraux dédiés) calculés sur la réflectance spectrale. L'entrée de CHRIPS est une image hyperspectrale de réflectance hyperspectrale couvrant la gamme spectrale [400-2500 nm]. Cette méthode présente les avantages suivants :

- elle est robuste en transfert, l'identification des classes est fondée sur des critères qui sont peu sensibles au type de capteur ;
- elle ne requiert pas d'apprentissage, les critères ont été définis une fois pour toutes ;
- elle inclut une classe de rejet, cela permet de réduire le taux de mauvaise classification ;
- elle présente un bon compromis entre précision et rappel (F1 score supérieure à 0.9 en général) ;
- elle est éventuellement paramétrable par l'utilisateur (classe par classe). Pour certaines images particulières, il se peut que le paramétrage utilisé par défaut ne permette pas de produire une carte de classification répondant pleinement aux besoins de l'utilisateur (plusieurs raisons possibles : correction atmosphérique peu précise, paramétrage un peu trop juste pour certaines classes, etc.). Il est possible d'ajuster certains seuils pour améliorer la discrimination de certaines classes.

Le nombre de classes étant limité, CHRIPS pourrait être utilisé en combinaison avec d'autres algorithmes de classification capables de traiter la classe de rejet.

[1] Alakian A., & Achard V. (2020), Classification of hyperspectral reflectance images with physical and statistical criteria. *Remote Sensing*, 12:2335.

HyperPCA : à l'interface entre la théorie des matrices aléatoires et la spectroscopie du plasma induit par laser

Riccardo FINOTELLO^{1*}, Mohamed TAMAAZOUSTI¹, Jean-Baptiste SIRVEN²

¹ Université Paris-Saclay, CEA, LIST, 91120 Palaiseau, France, riccardo.finotello@cea.fr, mohamed.tamaazousti@cea.fr

² Université Paris-Saclay, CEA, Service de Physico-Chimie, 91191 Gif-sur-Yvette, France, jean-baptiste.sirven@cea.fr

Mots-clés : Spectroscopie d'émission atomique de plasma induit par laser, Représentation éparse, ACP, Imagerie hyperspectrale, Classification non supervisée

La spectroscopie d'émission atomique de plasma induit par laser (« Laser-Induced Breakdown Spectroscopy », ou LIBS, en anglais) est une technique pour la cartographie multi-élémentaire rapide et directe d'échantillons sous pression ambiante, sans aucune limitation quant à l'élément ciblé. Les données représentent des images hyperspectrales de la surface d'un échantillon : chaque pixel est un spectre d'émission élémentaire, où le nombre de canaux peut être très important (1k à 100k canaux). Cependant, les données de cartographie LIBS présentent deux particularités : un rapport signal/bruit intrinsèquement faible en raison des mesures uniques, et une dimensionnalité élevée en raison du grand nombre de spectres acquis pour l'imagerie. Ceci est d'autant plus vrai que la résolution latérale augmente : dans ce cas, le diamètre du spot d'ablation est réduit, de même que la masse ablatée et le signal d'émission, tandis que le nombre de spectres pour une surface donnée augmente. Par conséquent, l'extraction efficace d'informations physico-chimiques à partir d'un ensemble de données bruitées et volumineuses est un problème majeur. Des approches multivariées ont été introduites par plusieurs auteurs comme moyen de traiter de telles données, en particulier l'analyse en composantes principales (« Principal Components Analysis », ou PCA, en anglais) [1,2]. Cette technique est utile pour analyser les corrélations entre différents éléments, mais elle est limitée aux faibles rapports signal/bruit.

Ces dernières années ont vu le développement d'outils mathématiques visant à extraire des informations plus pertinentes des données, en utilisant des méthodes issues de la théorie des matrices aléatoires et du traitement avancé des signaux. Nous présentons HyperPCA [3], un outil d'analyse pour les images hyperspectrales basé sur une représentation parcimonieuse des données à l'aide des transformées en ondelettes discrètes et de la sparse kernel PCA, afin de réduire l'impact du bruit sur les données et d'extraire de manière cohérente le signal spectroscopique, en mettant particulièrement l'accent sur les données de la LIBS. Nous montrons des comparaisons dans des différents cas d'usage avec la PCA traditionnelle et les analyses de données univariées traditionnelles : la méthode présente des avantages à la fois en termes de quantité et de qualité des informations récupérées, améliorant ainsi la caractérisation physico-chimique des surfaces analysées.

[1] Pořízka P., Klus J., Képeš E., Prochazka D., Hahn D.W., & Kaiser J. (2018), On the utilization of principal component analysis in laser-induced breakdown spectroscopy data analysis, a review, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 148:65-82.

[2] Moncayo S., Duponchel L., Mousavipak N., Panczer G., Trichard F., Bousquet B., Pelascini F., & Motto-Ros V. (2018), Exploration of megapixel hyperspectral LIBS images using principal component analysis, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(2):210-220.

[3] Finotello R., Tamaazousti M., & Sirven J.B. (2022), HyperPCA: A powerful tool to extract elemental maps from noisy data obtained in LIBS mapping of materials, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 192:106418

Milieux littoraux

Présentation du Groupe de Travail Hyperspectral en milieu Aquatique

Audrey MINGHELLI^{1*}, Malik CHAMI²

¹ Laboratoire d'Informatique et Système, Université de Toulon, CNRS, 83041 Toulon, France, audrey.minghelli@univ-tln.fr

² Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, 96 boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice cedex 4, France, malik.chami@upmc.fr

Mots-clés : Bathymétrie, Cartographie des habitats, Composition de l'eau, Littoral, Eaux continentales

Ce groupe de travail a été créé dans le cadre du Consortium d'Expertises Scientifiques du pôle de Données et de Service ODATIS qui est la branche océanographique de l'infrastructure de recherche DATA-TERRA. Il est composé de 17 personnes provenant des universités suivantes : Brest, Lille, Côte d'Opale, Nantes, Sorbonne Université, Toulon, Saint-Domingue et des instituts et organismes suivants : CEA, CNES, Ifremer, IRD, ONERA, SHOM, CNRS. L'objectif de ce groupe de travail est de fédérer la communauté hyperspectrale française pour des applications liées au milieu aquatique, faciliter l'accès aux données hyperspectrales satellitaires, faire connaître les travaux de cette communauté et enfin lister les besoins de la communauté sur les spécifications que devrait avoir un futur capteur hyperspectral. Ce groupe de travail s'est réuni en décembre 2022 pour présenter les thématiques étudiées au sein de la communauté « couleur de l'eau », mais également les méthodes et les données utilisées (in situ, aériennes et satellite), les capteurs hyperspectraux en vol (DESI, PRISMA et EnMap) et futurs (PACE, AquaWatch et GALENE). Un autre objectif est aussi de réfléchir sur les moyens de faciliter l'utilisation des données hyperspectrales par la communauté française. Les conclusions de la journée ont montré qu'il y avait un intérêt croissant pour le domaine de la télédétection hyperspectrale aquatique et de fortes attentes ont été exprimées par les participants ; de nombreux projets sont financés par l'ANR, CNES, DGA, INSU-PNTS. Compte tenu du nombre de capteurs hyperspectraux actuellement en vol ou à venir, il est important de favoriser l'accès à la donnée hyperspectrale satellitaire. Pour cela, il a été décidé de créer un site internet accessible depuis la plateforme ODATIS pour diffuser les informations nécessaires à l'exploitation de données hyperspectrales. En particulier, ce site permet la diffusion des informations suivantes: liste des liens internet vers les plateformes de téléchargement et de programmation d'acquisition d'images satellites, inventaire des méthodes de corrections atmosphériques et du « glint » en indiquant les codes disponibles en accès ouvert, inventaire des méthodes inverses d'estimation de produits géophysiques (inversion de modèle physique de transfert radiatif, démixage spectral, machine learning, réseau de neurones) avec les références bibliographiques associées et les codes en accès ouvert, mise à disposition de bibliothèques spectrales de réflectances du fond aquatique et de réflectance de surfaces de référence, mise à disposition de données in-situ (radiométrie, colonne d'eau, fond aquatique) de validation des observations satellitaires sur des sites connus, recensement des instruments utilisés pour l'acquisition de mesures hyperspectrales avec les contacts associés ; information portant sur l'accord du responsable de chaque instrument quant à son prêt à des équipes de recherche de la communauté pour des campagnes de mesures terrain.

Evaluation de la contribution d'un capteur satellitaire hyperspectral (BIODIVERSITY) pour la cartographie de la composition de l'eau, l'estimation de la bathymétrie et la composition des fonds en milieu littoral et lacustre

Audrey MINGHELLI^{1*}, Malik CHAMI², Mireille GUILLAUME³, Sayoob VADAKKE-CHANAT¹

¹ Laboratoire d'Informatique et Système, Université de Toulon, CNRS, 83041 Toulon, France, audrey.minghelli@univ-tln.fr, sayoob.vadake-chanat@univ-tln.fr

² Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, 96 boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice cedex 4, France; malik.chami@upmc.fr

³ Institut Fresnel, Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, 13013 Marseille, France; mireille.guillaume@fresnel.fr

Mots-clés : Bathymétrie, Cartographie des habitats, Composition de l'eau, Littoral, Eaux continentales

Dans cette étude, les applications de l'imagerie hyperspectrale sont explorées en zones côtières et en eaux continentales (lacs, étangs, lagunes). L'objectif scientifique est d'estimer les performances de l'estimation des produits géophysiques aquatiques tels que la bathymétrie, la composition des fonds marins et les concentrations en constituants marins (phytoplancton, matières en suspension et dissoutes) dérivés d'images satellites qui seraient acquises par un capteur hyperspectral de forte résolution spatiale (8 m) dont les caractéristiques seraient celles de BIODIVERSITY. Pour cela, les images du futur capteur ont été simulées à partir d'images hyperspectrales aériennes acquises avec un capteur HYSPEX sur l'île de Porquerolles et dans l'étang de Vaccarès en tenant compte des résolutions spatiales, spectrales et du rapport signal sur bruit (SNR) du capteur BIODIVERSITY. En zones côtières où les eaux sont claires, la bathymétrie a pu être estimée jusqu'à 10 m de profondeur avec une erreur relative variant entre 11% et 30% selon le bruit considéré. La composition des fonds a pu être estimée avec une incertitude variant entre 21% et 36%. En eaux continentales, où les eaux sont plus turbides, la bathymétrie a pu être estimée jusqu'à 3 m de fond avec une incertitude variant entre 10% et 16% selon le bruit considéré. La composition des fonds a été estimée avec une incertitude variant entre 14% et 25%. Des comparaisons avec les capteurs hyperspectraux HICO, ENMAP, PRISMA et DESIS ont également été réalisées pour montrer l'apport de la résolution spatiale.

L'imagerie hyperspectrale sous-marine pour discriminer et évaluer l'état écologique des habitats benthiques en milieu marin profond

Touria BAJJOUK^{1*}, Maxime FERRERA², Tristan PETIT¹, Aurélien ARNAUBEC²

¹ Ifremer/DYNECO-LEBCO, Centre Bretagne, ZI de la Pointe du Diable, 29280 Plouzané, France, touria.bajjouk@ifremer.fr

² Ifremer/SM-PRAO, Centre Méditerranée, Zone Portuaire de Brégaillon, 83507 La Seyne-sur-Mer cedex, France, aurelien.arnaubec@ifremer.fr

Mots-clés : Environnement profond, Benthique, Hyperspectral, Sous-marine

L'imagerie hyperspectrale satellitale et aéroportée a été utilisée avec succès pour la détection d'un large éventail d'objets en zones terrestres et côtières à travers le monde. Pour étendre l'application de cette technologie aux zones marines profondes, le capteur UHI (Underwater Hyperspectral Imager) développé par la société ECOTONE, a été testé, pour la première fois en France, en environnements marins profonds à l'aide de plates-formes ROVs (Remotely Operated Vehicle). Il s'agit d'un pushbroom qui enregistre en continu les intensités de la lumière réfléchiée pour une plage spectrale comprise entre 378 et 800 nm. Le fond marin est éclairé à l'aide d'une lumière artificielle. L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de cette technologie pour la cartographie des habitats benthiques profonds et l'évaluation de leur état écologique.

Pour intégrer le capteur dans les HROV de l'Ifremer et s'assurer de son bon fonctionnement avant son déploiement, plusieurs campagnes test ont d'abord été réalisées en zones côtières (Toulon, Brest et La Réunion). La zone d'étude visée est le canyon de Lampaul (750 m de profondeur) situé au large des côtes bretonnes. Ce site est caractérisé par la présence d'habitats de coraux d'eau froide (CWC) qui se développent sur des fonds de différentes caractéristiques géomorphologiques. Les données hyperspectrales ont été acquises lors de la campagne Chereef en août 2022. Le capteur UHI a été déployé depuis le navire océanographique Thalassa à l'aide du ROV Victor de l'Ifremer (Figure 1). De plus, plusieurs échantillons de sédiments et d'espèces ont été prélevés afin de caractériser leurs signatures spectrales hors de l'eau en réalisant des mesures en laboratoire à bord.

Une chaîne de prétraitement a été développée pour améliorer à la fois (i) la qualité géométrique de l'image, en combinant des techniques SFM (structure-from-motion) et de reconstruction 3D, ainsi que (ii) la calibration radiométrique pour fournir des images de réflectance au fond. Pour tester le potentiel de l'UHI à détecter et à identifier les types de fonds, quatre algorithmes d'apprentissage automatique ont été appliqués et comparés. Avec une précision globale de 0.98, Random Forest a été l'algorithme qui a fourni les meilleurs résultats en terme de discrimination et d'évaluation de l'état écologique des habitats de coraux d'eau froide d'une part et de pertinence de leur distribution spatiale d'autre part.

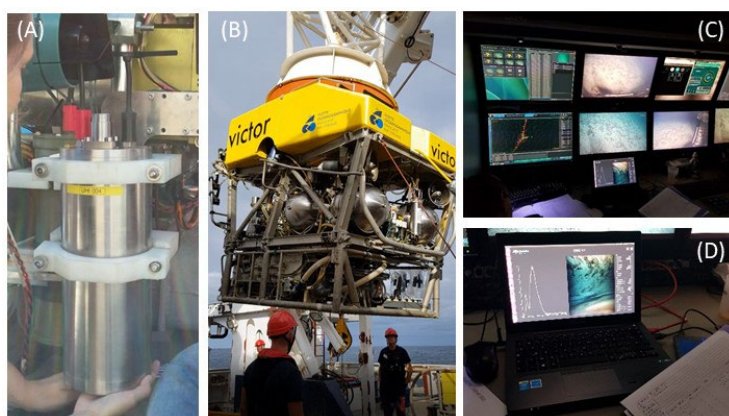


Figure 1. Capteur UHI (A) et son déploiement par le ROV Victor pendant la campagne Chereef-2022 (B). Salle de contrôle à bord (C) et interface logicielle pour le paramétrage de l'acquisition et de visualisation des enregistrements (D).

Importance de l'étalonnage de la chaîne de traitement : application à la télédétection des propriétés optiques de biofilms littoraux par ULM

Patrick LAUNEAU^{1*}, Vona MELEDER², Manuel GIRAUD¹, Farzaneh KAZEMIPOUR³

¹ Nantes Université, UMR CNRS 6112, Laboratoire de Planétologie et Géosciences, 44000 Nantes, France, patrick.launeau@univ-nantes.fr, manuel.giraud@univ-nantes.fr

² Nantes Université, Institut des Substances et Organismes de la Mer, ISOMer, UR 2160, 44000 Nantes, France, vona.meleder@univ-nantes.fr

³ UMR MISTEA-INRAE, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier, France, farzaneh.kazemipour@inrae.fr

Mots-clés : Hyperspectral, Correction atmosphériques, Biomasse

Seul un étalonnage en radiance en usine des caméras hyperspectrales permet d'accéder à des formes spectrales d'absorption de la vapeur d'eau conduisant à une efficacité des corrections atmosphériques. En effet, cet étalonnage préserve la forme des bandes d'absorption d'eau liquide de la végétation et des turbidités du littoral lorsque suffisamment de lumière est retournée en proche infrarouge. Dans le cas particulier de biofilms littoraux composés de micro-algues (i.e., organismes photosynthétiques unicellulaires), ils sont assimilés à une monocouche de pigments posée sur un substrat meuble (i.e., une vase plus ou moins sableuse). Ainsi à partir de la réflectance apparente R_A de ces biofilms [1], il est possible de séparer les m mélanges intimes des coefficients d'absorption α_i de leurs pigments des mélanges surfaciques de réflectance de leurs n supports R_B [Eq. 1].

$$R_{A_{mn}} = \left(\sum_{j=1}^n R_{B_j} \right) \cdot \exp \left(- \sum_{i=1}^m \alpha_i \right)^6 \quad (1)$$

$$\alpha = -\ln \left(\sqrt[6]{\frac{R_A}{R_B}} \right) \quad (2)$$

Après séparation de son support, le coefficient d'absorption α [Eq. 2] d'un biofilm est décorrélié de sa surface et le pic d'absorption à 673 nm, assigné à la chlorophylle a , devient un marqueur efficace de la biomasse micro-algale. L'abondance relative entre pigments variant en fonction de l'état physiologique du biofilm, changeant lui-même très rapidement avec l'éclairement, l'inversion des mélanges intimes n'est pas possible. La distinction au niveau des grands groupes algaux (i.e., algues brunes, vertes, rouges et bleues, respectivement les Diatomées, les Chlorophycées ou Euglènes, les Rhodophytes et les Cyanobactéries) reste cependant possible grâce des combinaisons de pigments caractéristiques (i.e., caroténoïdes, chlorophylles, phycoérythrine et phycocyanine). En revanche, cette grande sensibilité au changement d'éclairement permet au sein d'un même groupe algal de mettre en évidence l'efficacité de l'utilisation de la lumière pour la photosynthèse grâce à la détection de très petits changements de forme des spectres trahissant un réarrangement des proportions du mélange intime de pigments [2]. Mais pour une bonne séparation du biofilm de son support il est nécessaire d'estimer la forme de ce dernier par l'exploration des réflectances au-delà du proche infrarouge en prenant en compte notamment les pellicules d'eau de surfaces.

[1] Launeau P., Méléder V., Verpoorter C., Barillé L., Kazemipour-Ricci F., Giraud M., Jesus B., & Le Menn E. (2018), Microphytobenthos biomass and diversity mapping at different spatial scales with a hyperspectral optical model, *Remote Sensing*, 10(5):716.

[2] Méléder V., Jesus B., Barnett A., Barillé L., & Lavaud J. (2018), Microphytobenthos primary production estimated by hyperspectral reflectance, *PLoS one*, 13(5):e0197093.

Posters

Méthode de détection de nuages CHIWAWA

Alexandre ALAKIAN¹

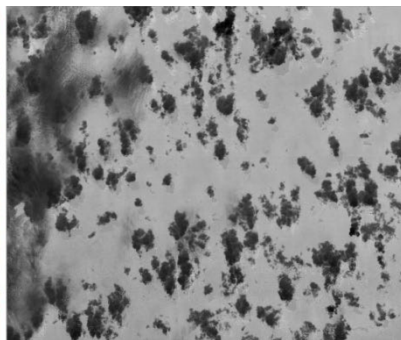
¹ ONERA-DOTA, Université Paris Saclay, 6 chemin de la Vauve aux Granges, 91123 Palaiseau, France, alexandre.alakian@onera.fr

Mots-clés : Nuage, Détection, Colonne de vapeur d'eau atmosphérique, Non supervisé

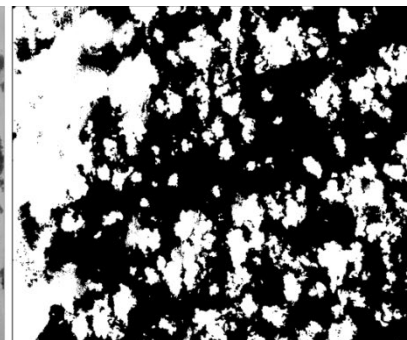
Lors de la correction atmosphérique d'une image hyperspectrale, la colonne de vapeur d'eau atmosphérique C_{eau} est estimée pour chaque pixel de l'image, conduisant ainsi à la production d'une carte de C_{eau} . Pour un pixel donné, en présence d'un nuage, une part variable des photons émis par le soleil sont réfléchis par le nuage et ne peuvent interagir avec la colonne atmosphérique située sous le nuage, induisant une sous-estimation de la valeur de C_{eau} pour ce pixel. Ainsi, en pratique, les pixels contenant des nuages ont des valeurs de C_{eau} inférieures à celles de leur environnement. La méthode CHIWAWA (Cloud detection in Hyperspectral Images With Atmospheric column WATER vapor) propose d'exploiter la carte de C_{eau} pour détecter les pixels de nuage. CHIWAWA vise à remplir deux objectifs. Le premier objectif est de détecter les nuages dans une unique image hyperspectrale (pas d'utilisation de séries temporelles) de façon non supervisée et sans utilisation de données exogènes. Le deuxième objectif est de pouvoir détecter à la fois les nuages épais et les nuages fins. Les entrées de la méthode sont une image hyperspectrale corrigée en réflectance et la carte de C_{eau} . CHIWAWA se décompose en trois étapes successives : recherche des nuages potentiellement nuageux (utilisation de l'image de réflectance seule), identification des pixels réellement nuageux (exploitation de la carte de C_{eau}) et post-traitements (identification et suppression des faux nuages détectés). La méthode a été appliquée sur une quinzaine d'images PRISMA et une dizaine d'images AVIRIS-NG. Les performances sont très encourageantes (F1 score de 0.95 pour les images PRISMA et de 0.90 pour les images AVIRIS-NG).



PRISMA (Brésil)



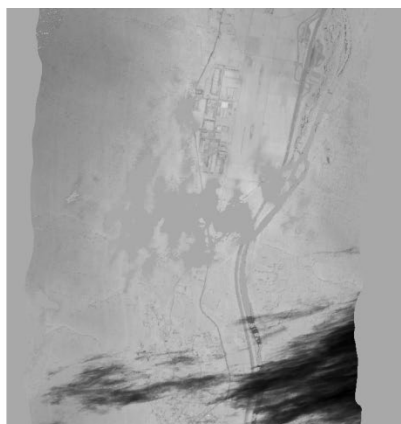
Carte de C_{eau}



Carte de détection de nuages



AVIRIS-NG (Suisse)



Carte de C_{eau}



Carte de détection de nuages

The potential of hyperspectral imaging for contextual and biophysical modeling of Brazilian forest plantations

Vitória BARBOSA FERREIRA^{1*}, Gueric le MAIRE¹, Jean-Baptiste FÉRET²

¹ CIRAD, UMR ECO&SOLS, Montpellier, France, vitoria.barbosa_ferreira@cirad.fr, gueric.le_maire@cirad.fr

² TETIS, INRAE/AgroParisTech/CIRAD/CNRS, Université de Montpellier, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France, jean-baptiste.feret@teledetection.fr

Keywords: Radiative transfer modeling, Vegetation, Eucalyptus, LAI, Leaf chemistry

Recent decades have experienced a sharp increase in the trade of wood products as a result of the expanding global demand for industrial wood. In this scenario, forest plantations multiplied in size, notably in the tropics, to accommodate the global market needs. With 7.3M ha of Eucalyptus plantations, Brazil is one of the largest producers of industrial wood. The pressing need to safeguard natural ecosystems makes arbitrarily increasing the area of forest plantations an unrealistic alternative. Therefore, investigating methods to ensure their sustainability and minimize their environmental impact is imperative. Achieving this requires careful understanding and continuous monitoring of these ecosystem functions. The aim of this PhD project is to estimate biophysical traits (e.g., leaf area index (LAI), chlorophyll content, water content, etc.) to describe the functioning of Eucalyptus plantations by using hyperspectral data in combination with Sentinel-2 when relevant.

Due to its detailed spectral information, hyperspectral image provides highly precise information on the changes in narrow regions of the electromagnetic spectrum, allowing access to unprecedented vegetation characteristics, such as subtle changes on water and chlorophyll content on leaf and canopy scales [2]. Therefore, the availability of free satellite hyperspectral images offers the opportunity to monitor in further detail minor differences in plants' spectral responses that may be caused by numerous disturbances such as water stress.

This study will take advantage of hyperspectral data provided by DLR's Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP). The image acquisition is programmed between April and June 2023, when eucalypt LAI at this location is typically at its peak, and from October to November 2023, when LAI is typically at its lowest. For each acquisition period, the images will be acquired in viewing zenith angles ranging from 5° to 30°, which will notably deepen our understanding of the multi-angular effect on retrieving forest plantation traits. The research will investigate three approaches commonly used to derive biophysical traits from optical data: 1) a simple approach based on vegetation indices; 2) inversion of radiative transfer model (e.g., PROSAIL) based on iterative optimization, taking advantage of the explicit description of interaction between incoming light and Earth layers including atmosphere, vegetation and soil to estimate structural and biochemical vegetation characteristics; and 3) hybrid methods, which combine the flexibility and computing efficiency of non-parametric regression methods (e.g., Gaussian process regression) with the generalization level of physically-based approaches, eventually enhanced by using measurement data [1].

The expected result is the establishment of an automatic workflow to estimate biophysical traits from the Eucalyptus plots in order to improve the monitoring of such parameters. Such estimations could be used also to enhance the reaction time and effectiveness of the management actions in response to ecological events (e.g., water stress, chlorosis). To accomplish this, the study will compare the different methods in terms of complexity, performance, time and cost to train the models.

[1] Verrelst J., Camps-Valls G., Muñoz-Marí J., Rivera J.P., Veroustraete F., Clevers J.G.P.W., & Moreno J. (2015), Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties – A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108:273-290.

[2] Tagliabue G., Boschetti M., Bramati G., Candiani G., Colombo R., Nutini F., Pompilio L., Rivera-Caicedo J.P., Rossi M., Rossini M., Verrelst J., & Panigada C. (2022), Hybrid retrieval of crop traits from multi-temporal PRISMA hyperspectral imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 187:362-377.

Simulations d'images hyperspectrales de forêts méditerranéennes à partir du modèle de transfert radiatif DART, de données terrain et drone LiDAR : adéquation à des images aéroportées et satellitaires

Marianne DEBUE^{1*}, Grégoire VINCENT², Samuel ALLEAUME³, Florian de BOISSIEU³, Xavier BRIOTTET⁴, Jean-Baptiste FERET³, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY¹, Jean-Marc LIMOUSIN⁵, Damien LONGEPIERRE⁵, Karine ADELIN⁴

¹ CESBIO, CNES/CNRS/IRD/Université Paul Sabatier, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, marianne.debue-ext@onera.fr, jean-philippe.gastellu@iut-tlse3.fr

² AMAP, IRD/CIRAD/CNRS/INRAE, Université de Montpellier, Montpellier, France, gregoire.vincent@ird.fr

³ TETIS, INRAE/AgroParisTech/CIRAD/CNRS, Université de Montpellier, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France, samuel.alleaum@inrae.fr, florian.deboissieu@inrae.fr, jb.feret@teledetection.fr

⁴ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, xavier.briottet@onera.fr, karine.adeline@onera.fr

⁵ CEFÉ, CNRS/EPHE/IRD/Université de Montpellier, 1919 route de Mende, 34090 Montpellier, France, jean-marc.limousin@cefe.cnrs.fr, damien.longepierre@cefe.cnrs.fr

Mots-clés : Imagerie hyperspectrale, LiDAR drone, Modélisation 3D, Transfert radiatif, Forêts méditerranéennes

Dans le contexte actuel de changement climatique, et notamment du fait de l'augmentation en intensité et en fréquence des sécheresses et des incendies, les écosystèmes méditerranéens font l'objet d'une vulnérabilité croissante. L'imagerie satellitaire est une technologie de plus en plus utilisée afin de suivre l'évolution de traits fonctionnels de tels habitats. Jusqu'à présent majoritairement multispectraux, l'arrivée de capteurs hyperspectraux (DEGIS, PRISMA, EnMAP) ainsi que la préparation de nouvelles missions (CHIME, SBG, BIODIVERSITY) devraient permettre d'améliorer l'estimation de ces traits grâce à une résolution spectrale plus fine. Le projet SETHYMED étudie l'apport d'images hyperspectrales à différentes résolutions spatiales (AVIRIS-Next Generation, PRISMA et DEGIS) par rapport au capteur multispectral Sentinel-2 dans l'évaluation de traits fonctionnels de forêts méditerranéennes, en particulier les concentrations en pigments foliaires et les teneurs en eau et en matière sèche des feuilles, via l'utilisation de méthodes d'inversion basées sur des données simulées par le modèle de transfert radiatif DART. Il s'inscrit dans la suite du projet HyperMED. Deux forêts méditerranéennes du sud de la France (Pic Saint Loup et Puéchabon), principalement composées de chênes pubescents et de chênes verts, avec des couverts plus ou moins fermés, sont étudiées. Plusieurs campagnes de terrain réalisées entre avril et octobre 2021 ont permis de constituer une base de données rassemblant des mesures spectrales (réflectance et transmittance à l'échelle de la feuille, du tronc, du sous-bois et de la canopée), bio-physico-chimiques (contenu en pigments, en eau, en matière sèche de feuilles) et structurelles (Leaf Area Index (LAI)). Des acquisitions drone LiDAR ont également été effectuées afin de décrire l'hétérogénéité horizontale et verticale des forêts. L'ensemble de ces données sont employées pour simuler les forêts à l'aide de DART. Les nuages de point LiDAR sont d'abord convertis en matrices de voxels de Plant Area Density (PAD) avec AMAPVox [1]. Pytools4dart [2] est ensuite utilisé afin de construire des maquettes 3D des sites, gérer la paramétrisation de DART et générer des images en réflectance spectrale à l'échelle de la canopée. Ces dernières sont finalement comparées aux différentes acquisitions hyperspectrales afin d'évaluer la précision de la modélisation en s'appuyant sur des métriques spectrales classiques. A terme, l'objectif final est de recourir à de l'inversion physique afin de remonter aux traits fonctionnels des forêts à partir des images hyperspectrales et d'évaluer leur précision au regard des données récoltées sur le terrain [3]. Les travaux présentés présentent donc une étape préliminaire essentielle afin de s'assurer de la fiabilité des simulations selon le degré de précision de la maquette 3D de forêt reconstituée.

[1] Vincent G., Antin C., Laurans M., Heurtebize J., Durrieu S., Lavalley C., & Dauzat J. (2017), Mapping plant area index of tropical evergreen forest by airborne laser scanning. A cross-validation study using LAI2200 optical sensor, *Remote Sensing of Environment*, 198:254-66.

[2] de Boissieu F., Chraïbi E., Lavalley C., & Féret J.B. (2019), Pytools4dart: Python API to DART Radiative Transfer Simulator. <https://gitlab.com/pytools4dart/pytools4dart>.

[3] Miraglio T., Adeline K., Huesca M., Ustin S., & Briottet X. (2022), Assessing vegetation traits estimates accuracies from the future SBG and biodiversity hyperspectral missions over two Mediterranean forests, *International Journal of Remote Sensing*, 43(10):3537-3562.

Téledétection multi- hyperspectrale et modélisation du transfert radiatif 3D pour le suivi de cultures de maïs

Romain DEMOULIN^{1,2,3*}, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY², Xavier BRIOTTET⁴, Karine ADELIN⁴, Matthieu MARIONNEAU³, Valérie LE DANTEC²

¹ Université Paul Sabatier - Toulouse 3, Site de Toulouse, France

² CESBIO, CNES/CNRS/IRD/Université Paul Sabatier, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, valerie.le-dantec@univ-tlse3.fr, jean-philippe.gastellu@iut-tlse3.fr

³ Hyperplan, 8 rue de la Madeleine, 64210 Bidart, France, romain@hyperplan.fr, matthieu@hyperplan.fr

⁴ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, xavier.briottet@onera.fr, karine.adeline@onera.fr

Mots-clés : Suivi des cultures, Téledétection, Multispectral, Hyperspectral, Transfert radiatif 3D

La téledétection satellitaire offre un grand potentiel pour anticiper le rendement des cultures. Certaines variables essentielles pour leur suivi telles que le contenu foliaire en chlorophylle (Cab) et l'indice de surface foliaire (LAI) peuvent déjà être estimées avec des capteurs multispectraux à haute répétitivité temporelle tel que Sentinel-2 [1]. La mise à disposition de nouvelles générations d'instruments hyperspectraux tel que EnMAP [2] ouvre la voie à l'estimation de variables plus difficiles d'accès comme le contenu foliaire en eau (Cw), en composés carbonés (Cbc) et azotés (Cp), étroitement liées au fonctionnement de la végétation. Cette richesse spectrale est cependant obtenue au détriment d'un taux de revisite plus faible. De ce fait, ces deux techniques d'observation apportent des informations très complémentaires. Afin d'assurer une bonne transférabilité et généralisation de l'estimation de ces variables d'intérêt à partir de ces instruments, on applique couramment des méthodes d'inversions basées sur l'utilisation de modèles de transfert radiatif (RTM) à même de simuler des spectres de réflectance de canopée servant de référence à des algorithmes d'apprentissage automatique. Certains RTMs 1D comme SAIL [3] font l'hypothèse simplificatrice d'un couvert végétal homogène représenté par une superposition de couches planes homogènes. D'autres RTM comme DART [4] sont plus complexes à prendre en main et reposent sur une description géométrique 3D des plantes et du relief.

L'objectif de cette étude menée dans le cadre de travaux de thèse débutée en avril 2023 est d'évaluer la plus-value de données hyperspectrales et leur complémentarité avec celles multispectrales pour suivre l'évolution des cultures, et notamment anticiper leur maturité. Un second objectif est de montrer l'incrément de la prise en compte d'un paysage 3D pour obtenir de meilleures performances d'estimation des variables recherchées, en comparant les modèles DART et SAIL avec le code d'inversion PHYTREE.

Dans un premier temps à partir d'une maquette 3D et d'une base de données synthétiques, les premiers résultats de simulation directe de réflectance de canopée de maïs avec un fort effet de structure montrent les limites du modèle SAIL pour simuler une canopée hétérogène et confirment le choix du modèle DART pour l'inversion. On montre également par l'évaluation de modèles de machine learning (p. ex., PLSR) sur des bases de données simulées Sentinel-2 et EnMAP, l'intérêt de disposer de données à grande richesse spectrale pour l'estimation des variables identifiées. Ceci est vérifié pour toutes ces variables mais apparaît principalement vrai pour la matière sèche (Cbc et Cp) et tout particulièrement Cp, impossible à estimer avec les bandes Sentinel-2. Dans un deuxième temps, il est prévu d'appliquer les meilleurs modèles d'inversion obtenus sur un jeu de données plus réalistes composé de campagnes de mesure sur le site expérimental ICOS de FR-Lam [5] cultivé en maïs pour 2023 et de données Sentinel-2 et EnMAP programmées.

[1] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

[2] Sang B., Schubert J., Kaiser S., Mogulsky V., Neumann C., Förster K.P., Hofer S., Stuffer T., Kaufmann H., Müller A., Eversberg T., & Chlebek C. (2008), The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration, and technologies", in *Proc. SPIE 7086, Imaging Spectrometry XIII*, 708605.

[3] Verhoef W. (1984), Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, 16(2):125-141.

[4] Gastellu-Etchegorry J.P., Demarez V., Pinel V., & Zagolski F. (1996), Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, *Remote Sensing of Environment*, 58(2):131-156.

[5] https://meta.icos-cp.eu/resources/stations/ES_FR-Lam

Aerosol and underlying surface characteristics retrieval at high spatial resolution

Yevgeny DERIMIAN^{1*}, Pavel LITVINOV², Oleg DUBOVIK¹

¹ LOA, Université de Lille/CNRS, Cité Scientifique, Université de Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, France, yevgeny.derimian@univ-lille.fr, oleg.dubovik@univ-lille.fr

² GRASP SAS, 59650 Villeneuve d'Ascq, France, pavel.litvinov@grasp-sas.com

Keywords: Aerosol, Retrieval algorithm

The current study presents inversion of a series of synthetic and real measurements aiming evaluation of atmospheric aerosol retrieval from high spatial resolution and hyperspectral space instruments. It has been illustrated by application of the algorithm GRASP (Generalized Retrieval of Aerosol and Surface Properties) (Dubovik et al., 2021) to Venus, Sentinel-2 and PRISMA space sensors. Based on the experience of previous high spatial and hyperspectral measurements treatment, several tests were thus configured and conducted to get an idea about aerosol retrieval capability. The tests showed that the aerosol can be represented by two to four aerosol models with precomputed lookup tables of optical characteristics. To note however that in contrast to more often used lookup tables approach, the satellite level radiances in GRASP are calculated online, enabling more flexible fitting of the measurements. The derived aerosol property is thus a mixture of several aerosol components fractions having different size distribution, composition and shape. The surface reflectance is calculated through a Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) taken at the relevant viewing and solar angles. The algorithm fully accounts for multiple interactions of scattered solar light with aerosol, surface and gas by means of solving the radiative transfer equation. In addition, the aerosol and surface properties are retrieved simultaneously, which is one of specific characteristics of the GRASP algorithm that reduces assumption and improves the retrieval consistency. If monodirectional measurements are used, then only the first parameter of the BRDF is retrieved and the second and third parameters are assumed. The inversion procedure of GRASP is based on a statistically optimized fitting following the multi-term Least Square Method and unites the advantages of a variety of approaches (Dubovik, 2004).

Tests statistiques pour l'analyse d'acquisitions hyperspectrales codées

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

¹ Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Université de Toulouse/CNRS/CNES, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, tdinh@irap.omp.eu, herve.carfantan@irap.omp.eu

² LAAS-CNRS, Université de Toulouse, 7 avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse cedex 4, France, antoine.monmayrant@laas.fr, simon.lacroix@laas.fr

Mots-clés : Imageur à masques codés, Variabilité spectrale intraclasse, Tests statistiques

Nous exploitons un imageur hyperspectral (HS) de type DD-CASSI, co-conçu et programmable, qui permet de réduire fortement le temps d'acquisition de scènes HS. Il repose sur la mesure de quelques images codées qui, associées à un modèle palliant le manque de données, permettent d'estimer la scène HS moyennant des algorithmes de reconstruction. Nous avons proposé [1] un algorithme rapide qui exploite les propriétés du dispositif et une hypothèse de séparabilité de l'image HS qui modélise des régions spatiales homogènes par un spectre et une image d'intensité, ce qui revient à une version simplifiée du modèle de Hapke pour la variabilité spectrale intraclasse [2].

Nous proposons ici d'étudier un tel modèle (image d'intensité de coefficient ψ) sur des données réelles (Figs 1a, 1b, 1c, 1d et 1e) puis nous cherchons à déterminer si un pixel donné appartient ou non à une région homogène de spectre connu, en exploitant les données codées du pixel en question. Nous exploitons pour cela des tests statistiques permettant de valider la compatibilité des données au modèle en considérant un bruit blanc Gaussien (Figs 1f et 1g), ce qui se rapproche de problèmes de classification supervisée où l'on doit tester l'appartenance d'un spectre à une classe donnée (Figs 1h, 1i et 1j).

Nous montrons ainsi, sur des données réelles, que l'hypothèse de séparabilité et la prise en compte d'un bruit blanc Gaussien permettent de distinguer correctement les spectres à partir de dix fois moins de données codées que de nombre de longueurs d'onde considérées dans l'image hyperspectrale.

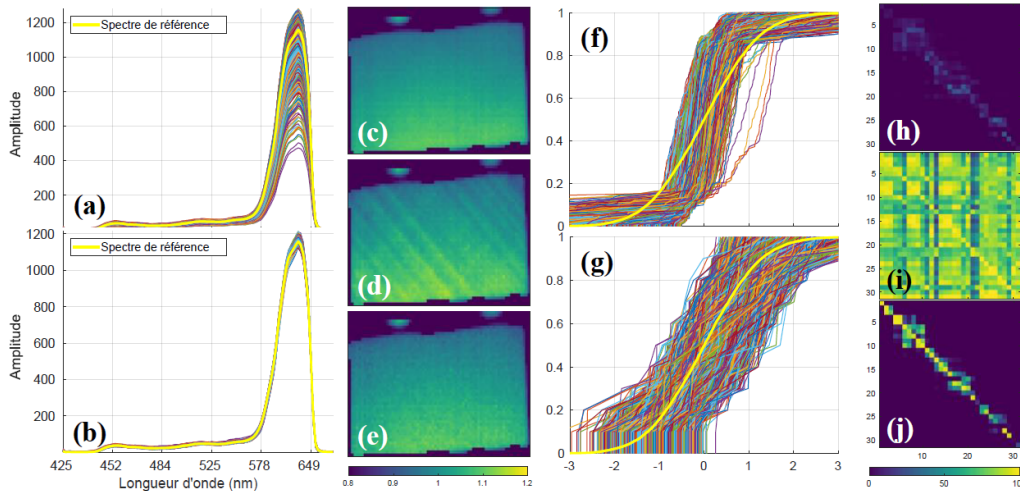


Figure 1. Dans une région homogène de l'image HS : Spectres (a) originaux et (b) normalisés par les coefficients Ψ ; Estimateurs de Ψ calculés à partir (c) des spectres originaux, (d) des données codées $\hat{\Psi}^{(d)}$ et (e) de l'image panchromatique $\hat{\Psi}^{(p)}$; Fonctions de répartitions empiriques des résidus normalisés sur l'image HS (f) et sur les données codées (g) et de la loi normale centrée réduite (en jaune) ; Cartes des pourcentages de validation du test statistique (h) sans variabilité, et avec le modèle séparable (i) en utilisant $\hat{\Psi}^{(d)}$ et (j) en utilisant $\hat{\Psi}^{(p)}$.

- [1] Hemsley E., Ardi I., Lacroix S., Carfantan H., & Monmayrant A. (2020). Optimized coded aperture for frugal hyperspectral image recovery using a dual-disperser system. *Journal of the Optical Society of America A*, 37(12):1916-1926.
- [2] Drumetz L. (2016), *Endmember variability in hyperspectral image unmixing*. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, Octobre 2016

Global tracking and quantification of oil and gas methane emissions from recurrent Sentinel-2 imagery

Thibaud EHRET¹, Gabriele FACCILOLO¹, Jean-Michel Morel MOREL¹, Aurélien DE TRUCHIS², Matthieu MAZZOLINI², Alexandre D'ASPREMONT², Carlo DE FRANCHIS², Thomas LAUVAUX³

¹ Centre Borelli, Université Paris-Saclay, CNRS/ENS Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France, thibaud.ehret@ens-paris-saclay.fr, gabriele.facciolo@ens-paris-saclay.fr, jean-michel.morel@ens-paris-saclay.fr

² Kayros, 33 rue La Fayette, 75009 Paris, France

³ Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, Université de Reims, Moulin de la Housse, 51687 Reims cedex 2, France, thomas.lauvaux@univ-reims.fr

Keywords: Methane, Monitoring, Oil and gas, Remote sensing

The detection of large and frequent methane (CH₄) emissions linked to oil and gas production has raised concerns in the ability of natural gas to effectively reduce greenhouse gas (GHG) emissions as a substitute to coal [1,2]. Over a 20-year horizon, a CH₄ molecule has a global warming potential close to 80 times larger than carbon dioxide (CO₂) [3]. A large part of the CH₄ emissions could be controlled or avoided, as they come primarily from maintenance operations at oil rigs, pipelines, or well pads, and from equipment failures [4].

We present an automatic quantification process for Sentinel-2. We then applied our detection framework for large scale detection, quantification and uncertainty estimation of methane plumes using imagery coming from existing SWIR instruments onboard the Sentinel-2 and Landsat-8 satellites. The methodology was used to monitor oil and gas infrastructure in mainly three countries. This led us to detect about 1200 events.

We combined our measurements with data from other instruments, Sentinel-5P data presented by Lauvaux et al. [5] more adapted to detect ultra-emissions as well as smaller events detected with airborne campaigns, one in California presented by Duren et al. [2] and one in the Permian presented by Cusworth et al. [6]. Using this combination of observed emissions, we were able to validate the hypothesis proposed by Lauvaux et al. [5] that a robust emission power law model exists. This shows that global observations of ultra-emitters (> 25 t_{CH₄} /hr) serves as an indicator for the magnitude of many more unobserved events, at least in the range covered by Sentinel-5P (> 2 t_{CH₄} /hr) but potentially even lower. We also clustered the emissions based on their location, i.e., by country, and emission frequency to have a better understanding of local behaviors and derive trends. This allows us to hint that the power law initially proposed by Lauvaux et al. [5] is likely also valid starting from 0.1 t_{CH₄} /hr. The power law relationship has important implications for future monitoring systems. Our results suggest that one could only monitor the largest emitters and draw conclusions on smaller emitters, assuming that the slope is defined by structural variables (for example the ratio between small and large pipes) and by the maintenance operation procedures. Moreover, it can be used to track progress by defining a reference year and comparing that year to the following ones.

[1] Brandt A. et al. (2014), Methane leaks from north American natural gas systems, *Science*, 343(6172):733-735.

[2] Duren R. et al. (2019), California's methane super-emitters, *Nature*, 575(7781):180-184.

[3] Forster P., Storelvmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.L., Frame D., Lunt D.J., Mauritsen T., Palmer M.D., Watanabe M., Wild M., & Zhang H. (2021), The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity, In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte V. et al., eds.), Cambridge University Press, pp. 923-1054.

[4] Lyon D. et al. (2016), Aerial surveys of elevated hydrocarbon emissions from oil and gas production sites, *Environmental Science & Technology*, 50(9):4877-4886.

[5] Lauvaux T. et al. (2022), Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters, *Science*, 375:557-561.

[6] Cusworth D. et al. (2021), Intermittency of large methane emitters in the Permian basin, *Environmental Science & Technology Letters*, 8(7):567-573.

Caractérisation hyperspectrale des effets de matrice de sol par couplage de modèles physiques et de méthodes d'apprentissage automatique

Corentin FERAY^{1,2,3*}, Stéphane JACQUEMOUD², Paul HONEINE³, Antonin VAN EXEM¹

¹ TELLUX, 72 rue Aristide Briand, 76650 Petit-Couronne, France, corentin.feray@tellux.fr, antonin.vanexem@tellux.fr

² Université Paris Cité, IPGP, CNRS, 75005 Paris, France, jacquemoud@ipgp.fr

³ Université de Rouen Normandie, LITIS, Avenue de l'Université, 76801 Saint-Etienne-du-Rouvray, France, paul.honeine@univ-rouen.fr

Mots-clés : Pollution des sols, Réflectance spectrale, Effets de matrice,

Ce travail vise à améliorer les méthodes de traitement d'images hyperspectrales pour la détection de polluants dans un sol. Ces méthodes permettent d'interpréter le signal radiométrique mesuré sur chaque pixel de l'image en termes de propriétés physico-chimiques du sol observé. Du fait de la résolution spatiale limitée des caméras hyperspectrales, le spectre de réflectance correspondant à un pixel est un mélange de spectres supposés purs de différents matériaux appelés *endmembers*. En pratique, ces spectres ne le sont pas en raison de la variabilité spectrale intrinsèque des matériaux, des effets de matrice tels que la teneur en eau ou la granulométrie, et des paramètres environnementaux 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.

En combinant les avantages des modèles physiques et des modèles basés sur les données, cette thèse a pour objectif d'améliorer l'interprétabilité, la généralisation et la robustesse des méthodes de traitement d'image hyperspectrales aux différentes sources de variabilité spectrale. L'accent sera mis sur les effets de matrices 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 pollution des sols.

[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.

[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.

[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.

Contribution of Fenix high-resolution hyperspectral airborne images to the socio-morphological characterization of Toulouse

Sébastien GADAL^{1*}, Thomas GLOAGUEN¹

¹ Laboratoire ESPACE, Aix-Marseille Université, UMR CNRS 7300, 74 rue Louis Pasteur, 84029 Avignon cedex, sebastien.gadal@univ-amu.fr, thomas.gloaguen@etu.univ-amu.fr

Keywords : Hyperspectral imagery, Urban structures, Land use, Morpho-social indicators, Toulouse

In this presentation, the contributions of high metric resolution hyperspectral images from the FENIX sensor (2 m and 4 m) from the CAMCATT airborne campaign (ONERA) covered in June 2021 in Toulouse will be presented to characterize urban structures, land use patterns and generate morpho-social indicators. These indicators are essential in urban planning and urbanism to understand the relationships between urban forms, functions, populations and uses. The construction of this type of morpho-social (and morpho-economic) indicators is usually made by integrating socio-economic and demographic databases with high and medium spatial resolution multi-spectral remote sensing images such as SPOT 6/7, Sentinel 2MSI, Landsat 8/9 OLI-TIRS, including through the use of thermal infrared data. They provide information on the relationship between urban form, functions, and socio-demographic structures. The contribution of hyperspectral images to the characterization of urban forms and structures and their capacity to improve the construction of morpho-social indicators is presented here.

À la recherche de peintures pariétales ou murales masquées : apports des mesures hyperspectrales et de susceptibilité magnétique

Morgane JAL^{1,2,3*}, Christophe DURLET¹, Fabrice MONNA², Chloé MORALES^{1,3}, Olivier MUSSET⁴

¹ BIOGÉOSCIENCES, UMR CNRS 6282, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France, morgane.jal@u-bourgogne.fr, christophe.durlet@u-bourgogne.fr

² ARTEHIS, UMR CNRS 6298, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France, fabrice.monna@u-bourgogne.fr

³ INGEN : INNOVATIONS GÉOSCIENCES, 6 rue de Bastogne, 21850 Saint-Apollinaire, France, chloe.morales@ingen-geosciences.com

⁴ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS 6303, 21078 Dijon cedex, France, olivier.musset@u-bourgogne.fr

Mots-clés : Analyse hyperspectrale, Susceptibilité magnétique, Peinture préhistorique, Peinture murale, Pigments

Que cela soit sur des parois naturelles (grottes, falaises) ou artificielles (bâtiments, souterrains, tombeaux etc.), il arrive que des peintures préhistoriques ou historiques soient totalement ou partiellement masquées par de fines couches opaques. Ces masques peuvent être naturels (couches de calcite par exemple) ou artificiels (suie, plâtre, chaux, etc.). Détecter et cartographier ces peintures masquées, sans décapages, offre des intérêts pour des études patrimoniales ou pour la planification d'opérations de restauration.

Deux types d'investigations physiques sont ici testées pour rendre « transparents » ces masques : la transmission/réflexion dans le visible et l'infrarouge (NIR et SWIR) en analyse hyperspectrale, et la permittivité des masques en susceptibilité magnétique.

Afin de tester les possibilités et limites du couplage de ces deux méthodes, qui à notre connaissance n'ont jamais réalisées ensemble, la présente étude se concentre sur les masquages calcitiques. Elle est menée à la fois sur des ersatz de parois calcaires peintes analysées en laboratoire, et sur de réelles peintures préhistoriques partiellement masquées d'une grotte calcaire.

Pour la gamme 350-2500 nm les caractéristiques des spectres sont extraites à l'aide de prétraitements pour chaque type de pigment (ocres, hématite, argiles, charbon de bois, oxydes de manganèse). Des algorithmes de classification spectrale et spatiale sont appliqués sur les mesures effectuées avec ou sans masques. Ce protocole met clairement en évidence deux fenêtres spectrales (700-900 nm et 1100-1400 nm) pour détecter les pigments, notamment ceux riches en fer, même masqués sous 2 mm de calcite opaque à translucide. Sur ces mêmes pigments, les sondes de susceptibilités magnétiques testées montrent que la détection peut aller jusqu'à 8 mm d'épaisseur de calcite opaque. Cette dernière approche n'est toutefois que ponctuelle, sans pouvoir procurer d'imagerie magnétique à haute résolution avec les dispositifs actuels.

Au-delà de la détection des pigments masqués, les analyses hyperspectrales pourraient permettre d'approcher *in situ* la composition chimique et minéralogique des pigments masqués et non masqués. Le démélange des spectres est une voie prometteuse pour atteindre cet objectif. Il nécessitera une calibration avec des analyses chimiques et minéralogiques plus conventionnelles (LIBS, XRF, XRD, etc.).

Développements méthodologiques pour le suivi d'estimation d'indicateurs d'inflammabilité à l'aide d'images hyperspectrales aéroportées en contexte forestier méditerranéen

Mathilda PORTERIE^{1,2*}, Karine ADELINÉ¹, Xavier BRIOTTET¹

¹ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, mathilda.porterie@onera.fr, karine.adeline@onera.fr, xavier.briottet@onera.fr

² ISAE Sup Aero, Université de Toulouse, 10 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France

Mots clés : Forêts méditerranéennes, Risque d'incendie, Modélisation physique, Inversion, Imagerie hyperspectrale aéroportée

Le risque incendie est une préoccupation majeure pour les forêts méditerranéennes à l'échelle mondiale à cause du changement climatique et de l'augmentation des pressions anthropiques. Les incendies de cette écorégion vont s'intensifier et devenir plus fréquentes dans les années à venir, compromettant la sécurité des populations et la préservation de ces « hotspots » de biodiversité. L'imagerie hyperspectrale permet d'avoir accès à un certain nombre d'indicateurs d'inflammabilité, dont la variable clé le LFMC relié à l'état hydrique de la biomasse vivante, et ses proxies reliés à l'état sanitaire de cette biomasse tels que le LAI et les concentrations en pigments foliaires [1]. Les récents capteurs satellitaires permettront d'avoir un suivi régulier de ces indicateurs, mais à des résolutions spatiales variées (10-30 m), ne résolvant pas toujours l'échelle de l'arbre et comprenant une portion non négligeable du sous-bois également. C'est le cas des écosystèmes TGE (TreeGrass Ecosystems) présentant parfois de faibles fractions de canopée, avec la difficulté de prendre en compte les variations spatiales et phénologiques (saisonniers) à la fois de la biomasse arborée et herbacée. Des travaux précédents [2] et en cours dans le projet HyperMED se portent sur les périodes où l'herbe est sénescence (e.g. été et automne). Les défis futurs sont de traiter les périodes pour lesquelles les deux étages de végétation sont simultanément photosynthétiquement actifs (e.g. printemps et fin d'automne) afin d'avoir un suivi multi-temporel complet. En effet, [3] a montré qu'une estimation faible du LFMC au printemps est critique pour anticiper un fort potentiel d'inflammabilité au cours de l'année. Récemment, [4] ont montré l'impact de la forte variabilité spectrale de l'étage herbacé pour différentes phénophases sur la modélisation directe de la réflectance de la canopée simulée pour les capteurs Sentinel-2 et aéroporté CASI en combinant les codes de transfert radiatif PROSAIL et FLIGHT. L'objectif est de poursuivre cette étude cette fois-ci en ciblant l'estimation des indicateurs d'inflammabilité par inversion du code de transfert radiatif DART, optimisé pour mieux modéliser plusieurs étages de végétation. La première étape sera de reprendre les travaux du projet HyperMED et l'outil d'inversion PHYTREE et d'évaluer les performances obtenues aux dates visées pour lesquelles sont disponibles un jeu de données composées de mesures de validation terrain et d'images aéroportées AVIRIS-C (18 m). La deuxième étape sera de comparer cette première modélisation simplifiée de l'étage herbacé (surface plane lambertienne) et plusieurs degrés de complexification de modélisation (milieu turbide/surfacique, fraction de trous, variabilité spectrale) afin d'obtenir les meilleures précisions d'estimations des indicateurs d'inflammabilité. Il convient de trouver un compromis entre une modélisation 3D qu'on souhaite la plus simple possible et un nombre réduit de paramètres de modélisation à traiter. Ces travaux permettront à terme d'avoir des choix méthodologiques et de modélisation adaptés quelle que soit la saison étudiée et de poursuivre l'étude pour les récents capteurs hyperspectraux satellitaires ainsi que Sentinel-2.

- [1] Veraverbeke S., Dennison P., Gitas I., Hulley G., Kalashnikova O., Katagis T., Kuai L., Meng R., Roberts D., & Stavros N. (2018), Hyperspectral remote sensing of fire: State-of-the-art and future perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 216:105-121.
- [2] Miraglio T. (2021). Estimation de traits de végétation de canopées ouvertes méditerranéennes par télédétection hyperspectrale (Doctoral dissertation, Toulouse, ISAE).
- [3] Huesca M., Litago J., Palacios-Orueta A., Montes F., Sebastián-López A., & Escribano P. (2009), Assessment of forest fire seasonality using MODIS fire potential: A time series approach, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11):1946-1955.
- [4] Melendo-Vega J.R., Martín M.P., Pacheco-Labrador J., González-Cascón R., Moreno G., Pérez F., Migliavacca M., García M., North P., & Riaño D. (2018), Improving the performance of 3-D radiative transfer model FLIGHT to simulate optical properties of a tree-grass ecosystem, *Remote Sensing*, 10(12):2061.

Quantification de la fraction de couverture des Sargasses en surface et en profondeur (2-5 m) avec les données Sentinel-3/OLCI dans la mer des Caraïbes (Nord de l'Océan Atlantique).

Léa SCHAMBERGER^{1*}, Audrey MINGHELLI¹, Malik CHAMI²

¹ Laboratoire d'Informatique et Système, Université de Toulon, CNRS, 83041 Toulon, France, lea-schamberger@etud.univ-tln.fr; audrey.minghelli@univ-tln.fr

² Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, 96 boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice cedex 4, France; malik.chami@upmc.fr

Mots-clés : Couleur de l'eau, Sentinel-3/OLCI, Sargasses, Modèle de transfert radiatif

Type de communication souhaitée : poster

Les Sargasses sont une espèce d'algues pélagiques qui dérivent et s'agglomèrent en radeaux dans l'océan Atlantique Tropical. Le nombre d'observations de Sargasses dans les Caraïbes a fortement augmenté au cours de la dernière décennie. Les radeaux de Sargasses dérivent au gré des courants et des vents et vont s'échouer sur les côtes. La forte accumulation des Sargasses sur les plages et au niveau des côtes pose de nombreux problèmes socio-économiques. Les données de couleur de l'eau fournies par les satellites, telles que celles du capteur Sentinel-3/OLCI (Copernicus), peuvent être utilisées pour détecter la présence de Sargasses dans l'océan et estimer leur abondance par pixel. En effet, les Sargasses ont une couleur rouge/brun qui provoque une forte augmentation de la réflectance de surface dans le domaine du rouge et proche infra-rouge (PIR). Des indices radiométriques basés sur cette caractéristique de la réflectance des Sargasses permettent d'estimer la couverture des Sargasses dans un pixel (fraction de couverture). Le Maximum Chlorophyll Index (noté MCI) a été développé en 2009 pour étudier l'abondance des Sargasses dans les images Sentinel-3/OLCI. Ce type d'indice, basé sur la réflectance dans les domaines du rouge et PIR, n'est cependant pas efficace lorsque les Sargasses sont immergées sous la surface car l'eau absorbe fortement le rayonnement dans ce domaine spectral. L'objectif de cette étude est donc de proposer une méthode permettant la détection des Sargasses même lorsque celles-ci sont immergées pour pouvoir estimer leur abondance dans l'océan avec plus de précision.

La méthodologie repose sur l'inversion du modèle de transfert radiatif développé par Lee et al. (1998) qui permet de simuler la réflectance de surface d'un pixel en fonction des composants de l'eau et du fond. Dans cette étude, le modèle est adapté pour fournir la profondeur d'immersion des radeaux de Sargasses (par pixel) et leur fraction de couverture. Ce modèle adapté est ensuite inversé par une méthode d'optimisation pour estimer l'abondance et la profondeur des Sargasses à partir d'images Sentinel-3/OLCI. Les estimations de l'abondance fournies par cette méthode sont comparées à celles données par l'indice MCI qui est inefficace lorsque les Sargasses sont immergées. Une augmentation relative de 31% de la fraction de couverture sur l'ensemble de la zone d'étude est observée lors de l'utilisation de la méthode proposée par rapport à la méthode de l'indice MCI. Pour les scènes satellites analysées dans cette étude, l'abondance de Sargasses estimée par la méthode proposée avec une profondeur supérieure à 2 mètres (2-5 m) varie entre 30% et 51% par rapport à l'abondance totale (0-5 m). Cette forte abondance estimée en profondeur (2-5 m) démontre l'importance de considérer la profondeur des Sargasses pour mieux comprendre leur variabilité spatiale et temporelle dans les écosystèmes océaniques et côtiers.

Impact of surface humidity on the spectral signature of industrial and mining minerals - Implications for their detection by hyperspectral imaging

Erica UCCELLATORI^{1,2*}, Rodolphe MARION², Stéphane JACQUEMOUD¹

¹ Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, 75005 Paris, France, erica.uccellatori01@universitadipavia.it, jacquemoud@ipgp.fr

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

Keywords: Mineral detection, Soil moisture content, MARMIT model

A laboratory experiment was set up to measure the reflectance spectra of soil samples taken from industrial sites (bauxite, alumina, bauxaline®, gypsum, calcite, etc.) at different moisture levels [1]. It consisted in progressively drying these samples brought to a saturated state, then simultaneously measuring their water content (by weighing) and their spectral reflectance in the solar domain using an ASD FieldSpec® 4 spectroradiometer. These measurements allowed us to better understand the impact of moisture on their spectral signatures. They were also used to calibrate the MARMIT model [2,3] developed jointly by IPGP and ONERA. This model simulates the reflectance spectra of soils at different levels of surface moisture as a function of three input parameters and a calibration relation previously established for each soil [4]. In parallel, criteria related to the shape of the absorption bands of the minerals of interest have been defined in order to study qualitatively and eventually quantitatively the effect of moisture on the shape of these absorption bands and on their detectability.

These results are used to define a detection threshold for each material of interest. Detection on the spectra measured during the laboratory experiment and on those simulated with the MARMIT model was evaluated. Finally, two hyperspectral images containing industrial minerals (HySpex image on Gardanne and APEX image on Thann) were used to validate the approach on operational use cases.

- [1] Marion R., & Carrère V. (2018), Mineral mapping using the Automatized Gaussian Model (AGM)—Application to two industrial French sites at Gardanne and Thann, *Remote Sensing*, 10(1):146.
- [2] Bablet A., Vu P.V.H., Jacquemoud S., Viallefont-Robinet F., Fabre S., Briottet X., Sadeghi M., Whiting M.L., Baret F., & Tian J. (2018), MARMIT: a multilayer radiative transfer model of soil reflectance to estimate surface soil moisture content in the solar domain (400–2500 nm), *Remote Sensing of Environment*, 217:1-17.
- [3] Dupiau A., Jacquemoud S., Briottet X., Fabre S., Viallefont-Robinet F., Philpot W., Di Biagio C., Hébert M., & Formenti P. (2022), MARMIT 2: An improved version of the MARMIT model to predict soil reflectance as a function of surface water content in the solar domain, *Remote Sensing of Environment*, 272:112951.
- [4] <https://pss-gitlab.math.univ-paris-diderot.fr/marmit/marmit>

Atmosphère

CORATHYP: a new Atmospheric Correction Code dedicated to Satellite Hyperspectral Imagery

Xavier LENOT^{1*}, Thierry ERUDEL¹, Bruno LAFRANCE¹, Sophie COUSTANCE², Camille DESJARDINS²,
Damien RODAT², Aimé MEYGRET²

¹ CS Group France, 6 rue Brindejonn des Moulinais, Parc de la Grande Plaine, 31506 Toulouse, France, xavier.lenot@csgroup.eu,
thierry.erudel@csgroup.eu, bruno.lafrance@csgroup.eu

² CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9, France, France, sophie.coustance@cnes.fr, camille.desjardins@cnes.fr,
damien.rodatt@cnes.fr, aime.meygret@cnes.fr

Keywords: Atmospheric correction, Hyperspectral

Recent developments in hyperspectral satellite imagery lead the CNES and CS GROUP to develop conjointly CORATHYP (Correction ATmosphérique en HYPerspectral), an atmospheric correction tool dedicated to land processing in the reflective spectral domain (0.4 μm to 2.5 μm). CORATHYP has been designed to be a modular python code, able of autonomously exploiting the spectral richness of hyperspectral data in order to characterize the atmospheric composition (atmospheric pressure, water vapor content, aerosol optical thickness and model) and retrieve the ground surface spectrum.

An accurate description of the atmospheric composition during the satellite measurement is a key point in atmospheric correction. In CORATHYP, gas concentrations and aerosol properties are respectively initialized using ECMWF and CAMS [1] exogeneous data. In addition, retrieval techniques have been implemented to characterize the atmosphere from the processing image: The APDA algorithm is used to retrieve surface pressure and water vapor content [2], and two different DDV algorithms [3-4] may be employed to estimate aerosol optical thickness.

The algorithm solving the radiative transfer equation takes into account slope and altitude variations on the acquired scene. The surface reflectance is estimated with the Lambertian assumption in a three steps iteration process: first the reflectance is calculated for each pixel assuming a homogeneous neighborhood, then adjacency effects on sun-to-surface irradiance and surface-to-sensor radiance are modeled and used to correct the surface reflectance in the last step. Atmospheric radiative parameters involved in the equation (direct and diffuse transmittances, atmospheric reflectance and albedo) are extracted from simulations carried out with the SOS-ABS radiative transfer code (version of the SOS code [5] which additionally simulates the gas absorption coupling).

This algorithm has been tested and validated on synthetic images and a set of PRISMA images acquired over the La Crau Calibration site. A selection of PRISMA images acquired over AERONET sites will be processed in order to complete the validation.

- [1] Rouquié B., Hagolle O., Bréon F.M., Boucher B., Desjardins C., & Rémy S. (2017), Using Copernicus Atmosphere Monitoring Service Products to constrain the aerosol type in the atmospheric correction processor MAJA, *Remote Sensing*, 9(12):1230.
- [2] Schläpfer D., Borel C.C., Keller J., & Itten K.I. (1998), Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor, *Remote Sensing of Environment*, 65(3):353-366.
- [3] Richter R., & Schläpfer S. (2021), Atmospheric / Topographic correction for airborne Imagery – ATCOR-4 User Guide, Version 7.4.0, September 2021, 200 pp.
- [4] Hagolle O., Huc M., Desjardins C., Auer S., & Richter R. (2017), *MAJA Algorithm Theoretical Basis Document*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1209633>
- [5] Lenoble J., Herman M., Deuzé J.L., Lafrance B., Santer R., & Tanré D. (2007), A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 107(3):479-507.

Methane plumes detection on hyperspectral images with a matched filter variant and deep learning

Elyes OUERGHI^{1*}, Thibaud EHRET¹, Gabriele FACCILOLO¹, Enric MEINHARDT-LLOPIS¹, Jean-Michel MOREL¹, Carlo DE FRANCHIS², Alexis GROSHENRY², Thomas LAUVAUX³

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

² Kayros SAS, 33 rue La Fayette, 75009 Paris, France, a.groshenry@kayros.com

³ Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, Université de Reims, Moulin de la Housse, 51687 Reims cedex 2, France, thomas.lauvaux@univ-reims.fr

Keywords: Methane, Hyperspectral, Matched Filter, Deep learning

Reducing methane emissions is essential to tackle climate change. In a time lapse of 20 years, a methane (CH₄) molecule has a global warming potential 80 times larger than carbon dioxide (CO₂). Here, we address the problem of detecting automatically point source methane leaks using high resolution hyperspectral images from the PRISMA satellite. To do this, we rely on the matched filter (MF) and one of its variants: the adjusted spectral matched filter (ASMF) [1]. ASMF reduces the fraction of false detections compared to the MF and without preventing the detection of plumes. Our method involves three steps: (i) We compute the ASMF ; this variant of the matched filter highlights the plumes while reducing the number of false positives. (ii) Then, we perform a segmentation of the plumes with a deep learning model. (iii) Lastly, we compute the intersection between the result of (i) and (ii) to obtain the detected plumes. To validate the method, we use a recently proposed dataset of manually annotated plumes on PRISMA images. We also compare our detection rate to the detection rate of methods using only the deep learning aspect or only the standard matched filter. We then show that our method outperforms those methods in terms of F1 score as we can see in Table 1.

Table 1 summarizes the scores of the different methods. All methods were tested with automatic detection without manual correction. We compare our results with the standard matched filter [2] because it is the most popular method in the literature on PRISMA. It can be noticed that our method has a much lower recall than ASMF alone or the network alone. We could expect such a result, because if a plume is not detected by both ASMF and the network then it will not be detected by our method. Our hybrid method yields a much higher precision gain and a less important recall loss, thus ensuring a much higher F1 score for our method [4].

	Recall	Precision	F1
MF [2]	0.53	0.22	0.31
Network	0.88	0.42	0.57
ASMF	0.86	0.44	0.58
ASMF+network	0.62	0.83	0.71

Table 1. Numerical results using the dataset built by [3]. The method proposed here is referred as ASMF+network.

- [1] Gao L., Yang B., Du Q., & Zhang B. (2015), Adjusted spectral matched filter for target detection in hyperspectral imagery, *Remote Sensing*, 7(6):6611-6634.
- [2] Guanter L., Irakulis-Loitxate I., Gorroño J., Sánchez-García E., Cusworth D.H., Varon D.J., Cogliati S., & Colombo R. (2021), Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer, *Remote Sensing of Environment*, 265:112671.
- [3] Groshenry A., Giron C., Lauvaux T., d'Aspremont A., & Ehret T. (2022), Detecting methane plumes using PRISMA: Deep learning model and data augmentation, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.15429>
- [4] Work partly financed by Office of Naval research grant N00014-17-1-2552, MENRT, and a PhD scholarship financed by MESRI (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation).

Inversion d'images hyperspectrales satellitaires et aéroportées avec un modèle de panache gaussien pour la restitution de flux d'émission de méthane

Nicolas NESME^{1*}, Pascal PRUNET¹, Olivier LEZEAUX¹, Claude CAMY-PEYRET², Pierre-Yves FOUCHER³

¹ SPASCIA, 10 avenue de l'Europe, 31520 Ramonville-Saint-Agne, France, nicolas.nesme@spascia.fr, pascal.prunet@spascia.fr, olivier.lezeaux@spascia.fr

² Institut Pierre-Simon Laplace, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France, claude.camy-peyret@upmc.fr

³ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, pierre-yves.foucher@onera.fr

Mots-clés : Modèle gaussien, Estimation optimale, PRISMA, Méthane, Débit

Depuis l'arrivée des données du satellite PRISMA en 2019, un fossé instrumental a été comblé. Entre les imageurs hyperspectraux aéroportés à résolution spatiale métrique mais exploités aux échelles locales (e.g., HySpex-NEO) et les sondeurs/imageurs hyperspectraux satellitaires survolant tout le globe mais avec des résolutions spatiales kilométriques (e.g., TROPOMI), les données PRISMA apportent l'avantage d'une résolution spatiale décimétrique (30 m) et d'une résolution spectrale de 10 nm sur le domaine SWIR en opérant depuis l'espace avec un taux de revisite d'environ 7 jours. Ce jeu de données satellitaires s'enrichit à présent des images hyperspectrales du satellite EnMap, aux caractéristiques instrumentales similaires. L'exploitation de ces images spectrales permet d'observer sur l'ensemble du globe des panaches de gaz anthropiques à plus fine échelle, dont la caractérisation en termes de source et de débit joue un rôle important dans les inventaires des émissions de gaz à effets de serre par région, pays ou continent.

Une approche d'inversion des émissions de sources anthropiques localisées (centrales électriques, extraction de pétrole) à partir de l'imagerie satellitaire des gaz a été mise en œuvre. Elle se base sur une méthode d'estimation optimale (OE) ajustant les paramètres d'un modèle de panache gaussien et le débit de la source. La mise en œuvre spécifique de la méthode OE utilisant un modèle de panache gaussien est appelée Gaussian-OGEO (Outil Générique d'Estimation Optimale). Le modèle de panache gaussien permet de traiter une ou plusieurs sources ponctuelles et/ou étendues, et l'approche OE fournit une analyse complète de l'incertitude sur les débits restitués et de sa dépendance aux spécifications de l'observation (précision de restitution, résolution et couverture spatiale), aux hypothèses d'inversion (choix et connaissance a priori des paramètres ajustés), aux caractéristiques de la source et aux conditions atmosphériques.

La méthode Gaussian-OGEO est appliquée à des cartes de concentration de panaches de méthane restituées à partir des images PRISMA, à 30 m de résolution spatiale, ainsi qu'à des données aéroportées HySpex-NEO obtenues à une résolution spatiale de 1,4 m. Les résultats et performances de la méthode sont discutés, et comparés à ceux d'une méthode plus classique de restitution des débits (méthode Cross-Sectional-Flux ou CSF), et à des estimations indépendantes des débits disponibles dans la littérature ou issues de mesures in situ. De plus, le potentiel de la méthode Gaussian-OGEO à traiter des images de panaches réalistes à différentes résolutions spatiales, ainsi que la problématique spécifique de l'estimation du vent, sont analysés de façon plus systématique à partir de simulations de panaches turbulents de CO₂ générés par un modèle LES (Large Eddy Simulation).

Ces résultats montrent la capacité de la méthode Gaussian-OGEO à traiter l'imagerie hyperspectrale des gaz à effets de serre à une résolution spatiale modérée (de 400 m à 2 km) et élevée (de 1 m à 30 m) pour quantifier les émissions de sources localisées, et l'importance de l'information auxiliaire sur le vent pour une bonne restitution des débits.

Aerosol emission by industrial stacks using PRISMA hyperspectral imager

Pierre-Yves FOUCHER^{1*}, Gabriel CALASSOU¹, Jean-Francois LEON²

¹ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, pierre-yves.foucher@onera.fr

² Laboratoire d'Aérodynamique, CNRS, Université de Toulouse, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France, jean-francois.leon@aero.obs-mip.fr

Industrial activities such as metallurgy, coal and oil combustion, cement production and petrochemistry release aerosol particles into the atmosphere. We propose to analyze the aerosol composition of plumes emitted by different industrial stacks using PRISMA (PREcursore IperSpettrale della Missione Applicativa) satellite hyperspectral observations. PRISMA is a medium-resolution (30 m) hyperspectral imaging satellite mission launched in 2019 and carrying a camera with 239 spectral channels between 0.4 μm and 2.5 μm . Additional Sentinel-2/MSI images are also used to better estimate the surface reflectance below the plumes. The proposed retrieval method is based on a direct radiative transfer model and follows the optimal estimation formalism (Rodgers, 2000; Calassou et al., 2020). Plume aerosol optical depth and particle radius are retrieved within the plumes. The mass flow rate of particulate matter is estimated in the plume by the integrated mass enhancement method (Varon et al., 2018). Three industrial sites have been observed: a coal-fired power plant in Matla, South Africa (imaged on September 25, 2021), a steel plant in Wuhan, China (March 24, 2021), and gas flaring at an oil extraction site in Hassi Messaoud, Algeria (July 9, 2021). For the flaring emission, the retrieved aerosol radii range from 0.15 to 0.3 μm with an uncertainty of 5 to 20 nm. The corresponding mass flow rate is estimated to ~ 100 g/s for the fine aerosol mode.

Contenu en information d'interférogrammes parcellaires mesurés par un imageur hyperspectral innovant : étude de cas du monoxyde de carbone provenant d'une expérience d'occultation solaire au sol

Sébastien PAYAN^{1*}, Laurence CROIZE², Aurélien BLANCHE¹, Yann FERREC²

¹ LATMOS, CNRS, Sorbonne Université, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France, sebastien.payan@sorbonne-universite.fr

² ONERA-DOTA, Université Paris Saclay, 6 chemin de la Vauve aux Granges, 91123 Palaiseau, France, laurence.croize@onera.fr, yann.ferrec@onera.fr

Un grand nombre de missions d'observation de l'atmosphère terrestre utilise des spectromètres de Fourier. Ces instruments enregistrent alors des interférogrammes (niveau 0), qui sont traités pour être utilisés comme luminances spectrales (niveau 1). L'idée que l'information utile pour retrouver un ensemble donné de variables atmosphériques est concentrée dans une petite portion de l'interférogramme est apparue à la fin des années 1970. Plus récemment, une équipe a démontré l'intérêt d'une telle approche pour la mesure au nadir de la concentration de molécules traces (CO₂, CO, CH₄ et N₂O). Effectuer des inversions directement sur des interférogrammes permet d'améliorer le rapport signal sur bruit des données à traiter et ainsi d'améliorer la sensibilité instrumentale.

Nous développons actuellement de nouveaux spectro-imageurs basés sur l'acquisition d'interférogrammes partiels. Ils sont issus d'un concept innovant de spectro-imageur à transformée de Fourier statique appelé imSPOC. Un démonstrateur de laboratoire pour la mesure de la colonne totale de monoxyde de carbone en occultation solaire a été construit, avec comme application potentielle l'imagerie des panaches d'émissions anthropiques.

Nous avons développé un algorithme pour l'inversion des interférogrammes imSPOC. Nous présenterons les résultats et l'évaluation des performances du prototype de monoxyde de carbone et nous explorerons l'intérêt de tels concepts, avec la possibilité d'accéder simultanément aux paramètres géophysiques tels que la colonne totale de CO et H₂O, et aux paramètres instrumentaux tels que la température de l'interféromètre. Les résultats de l'analyse du contenu en information basée sur la théorie de l'estimation optimale seront présentés.

Planétologie

Analyse minéralogique utilisant le démêlage linéaire et des contraintes de groupe

Frédéric SCHMIDT^{1,2*}, Sébastien BOURGUIGNON³, Joanna GURGUREWICZ⁴, Gaspard SALOMON^{1,4},
Daniel MEGE⁴

¹ GEOPS, CNRS, Université Paris-Saclay, Rue du Belvédère, Bât. 504, 91405 Orsay, France, frederic.schmidt@universite-paris-saclay.fr

² Institut Universitaire de France

³ Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France, sebastien.bourguignon@ls2n.fr

⁴ Space Research Centre PAS, Varsovie, Pologne, jqur@cbk.waw.pl, dmege@cbk.waw.pl

Mots-clés : Minéralogie, Mars

Au cours des dernières décennies, la spectroscopie de télédétection a permis de faire de nombreuses découvertes et d'acquérir de nouvelles connaissances sur la composition de la Terre et des surfaces planétaires. Diverses méthodes ont été proposées pour interpréter ces données, en particulier : le démêlage linéaire sous contraintes de positivité et de somme à un, en utilisant une base de données spectrales connue. Etant donné la grande taille de cette base de données avec la contribution potentielle de quelques spectres seulement, en comparaison avec le nombre réduit de longueurs d'onde, il est nécessaire d'inclure une contrainte de parcimonie. Nous montrons ici comment les contraintes de parcimonie exactes, combinées à l'exclusivité de groupe, peuvent être utilisées pour proposer un outil précieux dans le but de contraindre la minéralogie des surfaces planétaires.

Des tests synthétiques sont effectués afin d'établir la robustesse de la méthodologie, et les premiers résultats sur des données réelles sont présentés. Nous montrons également comment les principales non-linéarités du transfert radiatif (taille des grains et aérosols) peuvent être traitées avec de simples spectres de pente supplémentaires dans le même algorithme.

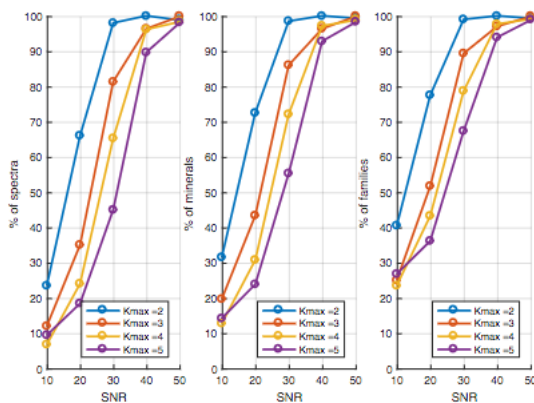


Figure 1. Taux moyen de détection correcte parmi K=2 à 5, pour SNR=10 à 50, parmi 100 exemples de simulation aléatoires. L'algorithme tient compte de la contrainte d'exclusivité des groupes de famille de minéraux. À gauche, le taux de détection correcte des spectres. Au milieu, le taux de minéraux corrects. À droite, le taux de familles correctes.

- [1] Ben Mhenni R., Bourguignon S., Ninin J., & Schmidt F. (2018), Spectral unmixing with sparsity and structuring constraints, 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 23-26 September 2018, Amsterdam (The Netherlands), 4 pp.
- [2] Gurgurewicz J., Mège D., Schmidt F., Douté S., & Langlais B. (2022), Megashears and hydrothermalism at the Martian crustal dichotomy in Valles Marineris, *Communications Earth & Environment*, 3:282.
- [3] Schmidt F. (2023), Approximation of radiative transfer for surface spectral features, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20:1-3.

Le Plexiglas® comme analogue des glaces planétaires

François ANDRIEU^{1*}, Frédéric SCHMIDT^{1,2}, Damien DEVISMES³

¹ GEOPS, CNRS, Université Paris-Saclay, Rue du Belvédère, 91405 Orsay, France, francois.andrieu@universite-paris-saclay.fr, frederic.schmidt@universite-paris-saclay.fr

² Institut Universitaire de France

³ CETIM Grand Est, 24 rue d'Alsace, CS 70051, 67402 Illkirch-Graffenstaden cedex, France, damien.devismes@cetimgrandest.fr

Mots-clés : Analogue, Glace, Modélisation, Transfert radiatif

De nombreuses surfaces du système solaire sont composées de différents types de glaces, telles que l'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Ces glaces elles-mêmes sont présentes sous plusieurs formes physiques (compacte, granulaire, cristalline/amorphe), et peuvent être en mélange plus ou moins complexes avec d'autres matériaux (poussières minérales, sels...). De par leur volatilité et leurs propriétés optiques, les glaces jouent un rôle central dans les dynamiques climatiques planétaires. La compréhension et la modélisation du transfert radiatif au sein des surfaces glacées est rendue difficile par des protocoles expérimentaux souvent complexes et coûteux. Nous proposons d'utiliser le Plexiglas® (polyméthacrylate de méthyle, PMMA) comme analogue des propriétés optiques visible et proche infrarouge des glaces planétaires. Les avantages de cette analogie sont le faible coût du matériau, ses indices optiques bien caractérisés, et sa simplicité à utiliser pour des expériences de laboratoire.

La plupart des minéraux ou éléments volatils composant les surfaces possèdent des bandes d'absorption caractéristiques dans le domaine $0.5 \mu\text{m} < \lambda < 5 \mu\text{m}$. Le domaine visible-proche infrarouge s'est donc imposé comme le domaine diagnostic pour l'étude des surfaces planétaires par imagerie hyperspectrale. Dans ce domaine spectral, les glaces présentes sur les surfaces du système solaire ont toutes en commun une haute réflectivité caractérisée par de faibles coefficients d'absorption dans le visible, et de nombreuses bandes de forte absorption dans le proche infrarouge. La Figure 1 montre que pour cet aspect, le plexiglass se comporte comme une glace, et que ce comportement est très différent de celui par exemple d'une poussière minérale classique.

Les glaces interagissent avec les surfaces et atmosphères planétaires, et sont donc souvent en mélange intime avec des matériaux granulaires minéraux, (régolite, aérosols atmosphériques...). Nous réalisons une série de mesures de plexiglass sous différentes formes (compact, broyé...), et dans différents modes de mélange pour tester la capacité des modèles de transfert radiatif disponibles à reproduire ces données (Figure 2). Ces mesures sont réalisées à l'aide d'une caméra hyperspectrale SWIR Specim similaires aux spectro-imageurs embarqués dans les missions spatiales. L'ensemble de la campagne de laboratoire sera par la suite accessible via la plateforme SSHADE.

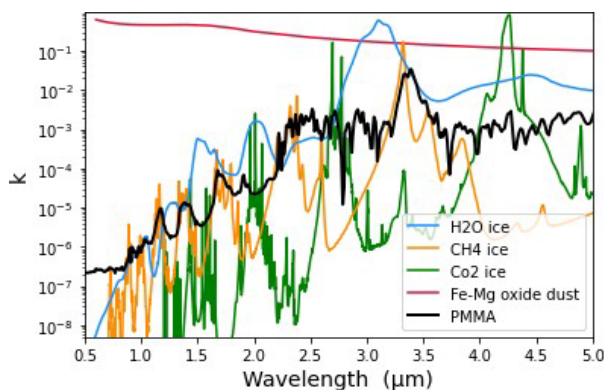


Figure 1. Partie imaginaire de l'indice optique des glaces d'eau [3], CO₂ [4] et méthane [5], d'une poussière d'oxyde de fer [6], et du Plexiglass (PMMA) [2].

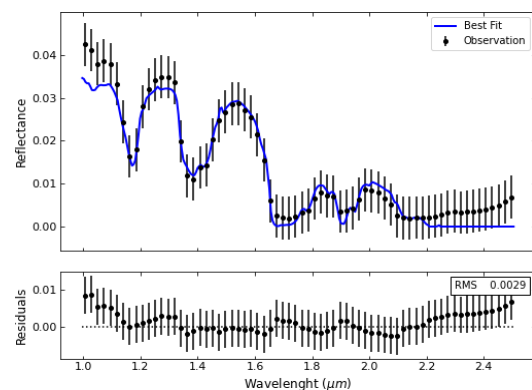


Figure 2. Résultat préliminaire d'ajustement d'un spectre mesuré d'une couche de PMMA compacte sur fond noir en utilisant un modèle de transfert radiatif multicouches [7].

[1] Schmitt et al. (1995), Springer. [2] Zhang et al. (2020), *Applied Optics*. [3] Schmitt et al. (1998), Springer infrared [4] Quirico et al. (1997), *Icarus*. [5] Grundy et al. (2002), *Icarus*. [6] Henning et al. (1995), *Astronomy & Astrophysics*. [7] Andrieu et al. (2015), *Applied Optics*. [8] Schmitt et al. (2012), OSUG Data Center Service/Database infrastructure. <https://doi.org/10.26302/SSHADE>

Microphysics of Europa's surface using Galileo/NIMS data

Guillaume CRUZ-MERMY^{1*}, Frédéric SCHMIDT^{1,2}, François ANDRIEU¹, Ines BELGACEM³, Thomas CORNET⁴

¹ GEOPS, CNRS, Université Paris-Saclay, Rue du Belvédère, 91405 Orsay, France, guillaume.cruz-mermy@universite-paris-saclay.fr, frederic.schmidt@universite-paris-saclay.fr, francois.andrieu@universite-paris-saclay.fr

² Institut Universitaire de France

³ European Space Astronomy Centre (ESAC), Camino Bajo del Castillo s/n, 28692 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain, ines.belgacem@esa.int

⁴ Aurora Technology BV for ESA, thomas.cornet@esa.int

Keywords: Europa, Dark lineament, Galileo/NIMS, Radiative Transfer, Bayesian MCMC

Europa's surface is one of the youngest in the solar system. The Jovian moon is believed to hide a global liquid water ocean under its icy crust [1] and is exposed to intense space weathering due to the continuous bombardment by electrons and ions from Jupiter's magnetosphere [2]. To understand the processes governing the evolution of the surface it is necessary to finely characterize the microphysics of the ice (volume abundance, grain size and surface roughness). However, the majority of the previous studies [3,4] do not allow to constrain precisely these parameters.

Here we report the use of a radiative transfer model [5] in a Bayesian MCMC inference framework [6,7] to retrieve microphysical properties of Europa's surface using the Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer (NIMS) hyperspectral data [8]. We present the analysis of a calibrated data from the trailing Anti-jovian hemisphere. The estimated signal-to-noise ratio (SNR) is between 5 and 50, we mainly focus on the 1.0-2.5 μm region for which the SNR is higher with an uncertainty on the absolute calibration up to 10% [8]. We selected a list of 15 different compounds that has been suggested by previous studied and tested, for the first time, all combination of 3, 4 and 5 chemical species among these 15 compounds.

We discuss the chemical species selection (called here endmember) by looking at all best-fit from all combination of 3, 4 and 5 endmembers and their associated RMS [9]. We first show that going from 3 to 4 endmembers significantly improves the quality of the fit (Figure1), while using 5 endmembers only slightly improve it. In addition, some compounds appear necessary to reproduce the observation, such as water ice and sulfuric acid octahydrate, in agreement with previous studies [3,4,10]. However, adding either hydrated sulfates or chlorine salts produces results substantially similar. Finally, when looking at the other microphysical properties, we show that the grain size of the mandatory endmembers is well constrained and similar from one combination to another [11]. The macroscopic roughness is however not well constrained [11]. Thanks to numerical optimizations we are able to invert independently every spectrum of a NIMS hyperspectral cube with the Bayesian MCMC algorithm. From this result, we present maps of microphysical properties on an entire hyperspectral image of a dark lineament.

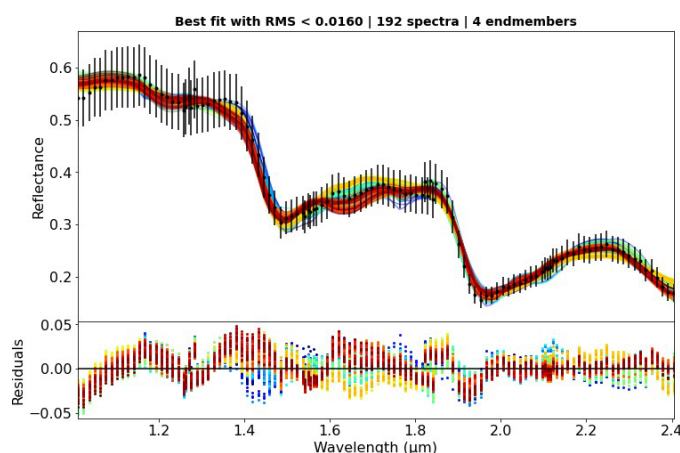


Figure 1. Results of all combination for the 4 endmembers case: only the best-fit with RMS below 0.016 are showed.

- [1] Pappalardo R. et al. (1999), *Journal of Geophysical Research*. [2] Carlson R.W. et al. (2005), *Icarus*. [3] Ligier N. et al. (2016), *The Astrophysical Journal*. [4] King O. et al. (2022), *Planetary and Space Science*. [5] Hapke B. (2012), Cambridge University Press. [6] Cubillos P. et al. (2016), *The Astrophysical Journal*. [7] Braak C.J.F. (2008), *Statistics and Computing*. [8] Carlson R. et al. (1992) ed. C. T. Russell. [9] Cruz-Mermy G. (2022), *Icarus*. [10] Mishra I. et al. (2021), *The Planetary Science Journal*. [11] Cruz-Mermy G. (2023), *in preparation*.

Un regard vers la surface : cartographie de l'albédo de surface de Titan à l'aide des données hyperspectrales infrarouges de Cassini/VIMS

Maël ES-SAYEH^{1*}, Sébastien RODRIGUEZ¹, Maëlie COUTELIER², Pascal RANNOU³, Bruno BÉZARD⁴, Luca MALTAGLIATI⁵, Thomas CORNET⁶, Björn GRIEGER⁶, Erich KARKOSCHKA⁷, Stéphane LE MOUÉLIC⁸, Alice LE GALL⁹, Catherine NEISH¹⁰, Shannon MACKENZIE¹¹, Anezina SOLOMONIDOU¹², Christophe SOTIN⁸, Athena COUSTENIS⁴

¹ Université Paris Cité, Institut de physique du globe de Paris, CNRS, Paris, France; essayeh@ipgp.fr

² LATMOS, UVSQ Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS, Guyancourt, France

³ Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique, UMR CNRS 7331, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France

⁴ LESIA, Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen, 92195, Meudon, France

⁵ Nature Astronomy, Springer Nature, 4 Crinan Street, London N1 9XW, UK

⁶ Aurora Technology B.V. for ESA, Camino Bajo del Castillo s/n, 28692 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain

⁷ Lunar and Planetary Laboratory, 1629 E University Boulevard, Tucson, AZ 85721-0092, USA

⁸ LPG, CNRS UMR 6112, Nantes Université, Université d'Angers, Université du Mans, Nantes, France

⁹ Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), UVSQ/CNRS/Paris VI, UMR 8190, 78280 Guyancourt, Institut Universitaire de France, Paris, France

¹⁰ Department of Earth Sciences, The University of Western Ontario, London, ON N6A 5B7, Canada

¹¹ Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 11100 Johns Hopkins Road, Laurel, MD 20723, USA

¹² Hellenic Space Center, Athens, Greece

Mots-clés : Titan, Transfert radiatif, Infrarouge, Atmosphères planétaires, Surfaces planétaires

Titan, satellite de Saturne, est la seule lune du système solaire à posséder une atmosphère épaisse, dominée par l'azote et les composés organiques, et des cycles climatiques basés sur le méthane et l'éthane, semblables au cycle hydrologique terrestre. Les matériaux organiques les plus lourds, résultant de la chimie atmosphérique, forment une brume omniprésente d'aérosols photochimiques et précipitent à la surface. Ici ils sont soumis à des processus géologiques variés (par exemple, l'érosion éolienne et fluviale) qui conduisent à la formation d'une variété de paysages, y compris des champs de dunes, des réseaux fluviaux, des montagnes, des terrains labyrinthiques, des canyons, des lacs et des mers analogues à leurs homologues terrestres, mais dans un contexte exotique. Titan est donc une cible privilégiée pour les recherches planétaires et astrobiologiques. Son atmosphère optiquement épaisse empêche cependant de sonder la surface dans l'ensemble de la gamme du proche infrarouge, et sa composition est encore largement inconnue, ou du moins largement débattue, ce qui empêche de comprendre et de quantifier pleinement les processus géologiques en jeu. Les radiations solaires incidentes et réfléchies sont en effet fortement affectées par l'absorption des gaz et la diffusion des aérosols dans le proche infrarouge. Ce n'est que là où l'absorption du méthane est la plus faible que quelques fenêtres de transmission permettent de détecter le rayonnement provenant de la basse atmosphère et de la surface, ce qui permet de déterminer l'albédo de la surface. L'instrument VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer, Brown et al. 2004) à bord de la sonde Cassini, qui a survolé Titan 127 fois entre 2004 et 2017, a acquis des images hyperspectrales entre 0.88 et 5.11 μm , incluses huit fenêtres de transmission étroites centrées sur 0,93, 1,08, 1,27, 1,59, 2,03, 2,69, et 2,78 μm , et dans l'intervalle 5,0-5,11 μm (Sotin et al., 2005). Même dans ces fenêtres de transmission, la géométrie variable d'observation, l'absorption gazeuse résiduelle et la diffusion par les aérosols rendent l'extraction de l'albédo de surface complexe et ses interprétations limitées. Afin de corriger au mieux le signal de surface des contributions atmosphériques, nous avons développé un modèle de transfert radiatif (Es-sayeh et al., 2023, Rodriguez et al., en préparation) avec les profils d'abondance des différents gaz présents, leurs coefficients d'absorption respectifs, et les propriétés optiques des aérosols photochimiques adaptés aux propriétés atmosphériques de Titan. Après avoir validé notre modèle en utilisant les observations *in situ* de la sonde Huygens acquises pendant la descente et après l'atterrissage, nous avons appliqué notre modèle à la zone du cratère Selk (zone d'atterrissage de la mission Dragonfly de la NASA ; Barnes et al., 2021) afin de cartographier l'albédo de surface dans les fenêtres de transmission et de discuter des propriétés de surface des différentes unités spectrales de la région. Ces cartes d'albédo, corrigées de la dépendance angulaire de la réflectivité de la surface, nous permettent d'étudier la région du cratère Selk en termes de composition de surface, de formation et d'évolution du paysage. Ces résultats fournissent des informations pour la préparation opérationnelle et scientifique de la mission Dragonfly et ouvrent la voie à l'exploration *in situ* future de la composition et de la géologie de la surface de Titan.

MIRS Imaging Spectrometer for the Martian Moon Explorer (MMX) Mission

Sonia FORNASIER^{1,2*}, Maria Antonella BARUCCI¹, Jean-Michel REESS¹, Pernelle BERNARDI¹, Alain DORESSOUDIRAM¹, and the MIRS Team

¹ LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Université Paris Cité, Sorbonne Université, 92190 Meudon, France, sonia.fornasier@obspm.fr, antonella.barucci@obspm.fr, Jean-michel.reess@obspm.fr, pernelle.bernardi@obspm.fr, alain.doressoundiram@obspm.fr

² Institut Universitaire de France

Keywords: Mars system, Spectroscopy, Instrumentation, Space exploration

The JAXA Mars Moons Exploration (MMX) mission will be launched in September 2024 to the Martian system to return samples from the surface of Phobos, make detailed observations of Phobos and Deimos, and monitor the climate of Mars. The main goals of the mission is to return samples of Phobos, and, throughout both the in situ detailed investigation of Mars satellites and the further laboratory studies of Phobos samples on Earth, to finally clarify the origin of the Mars Martian moons, and to constrain the processes of planetary formation and material transport in the inner Solar System. To reach these goals, MMX has a complex onboard instrumentation including imaging systems, infrared, neutron and gamma-ray spectrometers, a LiDAR, a mass spectrum analyzer, a dust monitoring instrument, and a rover for in situ investigation, beside the sampling and retrieval devices.

We present in this work the design and performances of the MMX InfraRed Spectrometer (MIRS), which is an imaging spectrometer operating between 0.9 and 3.6 μm . MIRS is provided by CNES and built at LESIA-Paris Observatory in collaboration with four other French laboratories (LAB, LATMOS, LAM, IRAP-OMP), and in close collaboration with JAXA and MELCO. The instrument will be delivered to JAXA on summer 2023.

MIRS is a spectrometer that uses the push-broom acquisition principle. A single detector acquisition (2D matrix) provides the image of a strip in one direction (spatial), and the spectrum of each point of the strip in the second direction (spectral). The second spatial dimension results from the motion of MIRS Line of Sight in the along-track direction either thanks to the spacecraft speed or by actuation of a scanner mounted on the instrument, with allows $\pm 20^\circ$ of optical amplitude respect to the boresight. The MIRS field of view (FOV) is $\geq \pm 1.65^\circ$.

MIRS will observe Phobos and Deimos in the 0.9-3.6 μm range with a spectral resolution better than 24 nm and with a spatial resolution of 0.35 mrad/px. For Phobos, MIRS will acquire spectra at SNR > 100 up to 3.2 micron in about 2 seconds of integration time for observations carried out at phase angle of 30° . The spatial resolution is of 13-30 m/px during the Quasi Satellite Orbit-Medium global survey (altitude varying from 37 to 84 km), down to meter to sub-meter for the selected sampling sites candidates or the sampling spot. The spectral radiometric absolute accuracy is expected to be of 10%, and the relative accuracy of 1%.

Thanks to the large wavelength coverage and high SNR, MIRS will permit to fully characterize the composition and mineralogy of Phobos and Deimos, and, in particular, to detect faint absorption features associated with minerals and materials like anhydrous and/or hydrated silicates, water ice and organic matter, if any, that will help in understanding the satellite origin. MIRS will also study Mars atmosphere, in particular the spatial and temporal changes such as clouds, dust and water vapor.

Végétation

Projet HyperMED : estimation des traits fonctionnels de forêts méditerranéennes à canopée ouverte par imagerie hyperspectrale en prévision des missions BIODIVERSITY et SBG

Karine ADELIN^{1*}, Mathilda PORTERIE¹, Romain DEMOULIN¹, Louis CHAUVET¹, Jean-Victor SCHMITT¹, Thomas MIRAGLIO¹, Sidonie LEFEBVRE¹, Xavier BRIOTTET¹, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY², Crystal SCHAAF³, Susan L. USTIN⁴, Dennis BALDOCCHI⁵

¹ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, karine.adeline@onera.fr, mathilda.porterie@onera.fr, romain.demoulin@onera.fr, louis.chauvet@onera.fr, jean-victor.schmitt@onera.fr, thomas.miraglio@gmail.com, sidonie.lefebvre@onera.fr

² CESBIO, UPS, CNES, CNRS, IRD, Université de Toulouse, 31401 Toulouse cedex 9, France, jean-philippe.gastellu@iut-tlse3.fr

³ School for the Environment, University of Massachusetts Boston, MA 02125, USA, crystal.schaaf@umb.edu

⁴ Institute of the Environment, University of California Davis, Davis, CA 95616, USA, slustin@ucdavis.edu

⁵ Department of Environmental Science, Policy & Management, University of California Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA, baldocchi@berkeley.edu

Mots-clés : Forêts ouvertes, Traits fonctionnels, Modélisation, Inversion, Hyperspectral

L'étude du biome « forêts, bois et maquis méditerranéens » est d'actualité dans un contexte où l'impact du changement climatique n'a jamais été aussi grand, ainsi que les pressions anthropiques (incendies de forêts intentionnels et accidentels, extension de l'urbanisation, intensification de la sylviculture et agriculture). L'imagerie hyperspectrale offre un service unique pour évaluer l'état sanitaire de ces forêts à travers l'accès à certains traits fonctionnels du végétal relatifs à la croissance (LAI), l'activité photosynthétique (pigments), au stress hydrique et à la biomasse (contenu en eau et matière sèche). Pour une meilleure transférabilité et généralisation, l'estimation de ces traits s'effectue avec des méthodes d'inversion dites hybrides, se basant sur l'emploi de méthodes d'apprentissage sur des bases de données simulées par des modèles de transfert radiatif. Leurs performances ont été très peu étudiées pour des forêts à canopée ouverte du fait de leur forte variabilité tant verticale qu'horizontale, menant à différents scénarios de modélisation spatiale, spectral et temporel selon l'échelle d'observation. Ces défis se posent pour les récents et futurs capteurs satellitaires hyperspectraux, dont ceux proche de l'échelle de l'arbre (@10 m) et ceux observant un paysage mixte (@30 m).

Le projet HyperMED a pour objectif de développer des méthodes adaptées pour ces milieux pour l'estimation de ces traits fonctionnels avec le code DART et l'outil d'inversion PHYTREE (intégrant les méthodes PLSR, GBT, MLP, etc.). Leurs performances sont évaluées à partir d'un jeu de données terrain sur deux sites californiens de savanes boisées (composées d'arbres et d'herbe) ayant en moyenne de faibles taux de couvertures boisées (< 50 %) et de LAI (< 1 m².m⁻²), et de données aéroportées hyperspectrales AVIRIS-C (18 m) et AVIRIS-NG (2 m) de 2013 à 2022 dont ont été utilisées pour simuler des images CNES-BIODIVERSITY (10 m) et NASA-SBG (30 m). Premièrement à partir d'une modélisation forestière simpliste comprenant les éléments ligneux des arbres à partir de données LiDAR terrestres et considérant un sol plat aux propriétés lambertiennes extraites arbitrairement dans l'image, des travaux pionniers ont mené à des résultats plutôt concluants quel que soit le capteur pour l'estimation du LAI et des pigments, mais pas pour le contenu en eau/matière sèche [1][2]. Cependant, ces derniers ainsi que le LAI ont pu ensuite être estimés avec succès à 18 m à partir d'une méthode semi-automatique et optimisée pour extraire les propriétés optiques moyennes du sous-bois, au détriment d'une bonne estimation des pigments. Ainsi, les résultats présentés ont pour objectif une estimation conjointe de tous ces traits fonctionnels en fonction de la résolution spatiale étudiée, notamment pour les missions hyperspectrales satellitaires. L'étude se limite aux dates où l'herbe est sénescence et les arbres photosynthétiquement actifs.

[1] Miraglio T. (2021), Estimation de traits de végétation de canopées ouvertes méditerranéennes par télédétection hyperspectrale (Doctoral dissertation, Toulouse, ISAE).

[2] Miraglio T., Adeline K., Huesca M., Ustin S.L., & Briottet X. (2022), Assessing vegetation traits estimates accuracies from the future SBG and biodiversity hyperspectral missions over two Mediterranean forests, *International Journal of Remote Sensing*, 43(10):3537-3562.

Cartographie de la diversité spécifique forestière des milieux tempérés à partir d'imagerie hyperspectrale

Marc LANG^{1*}, Max FERRIERE², Florian de BOISSIEU², Xavier BRIOTTET³, Sophie FABRE³, David SHEEREN¹, Jean-Baptiste FERET^{2*}

¹ DYNAFOR, Université de Toulouse, INRAE, 24 chemin de Borde-Rouge, Auzeville, 31326 Castanet Tolosane cedex, France. marc.lang@toulouse-inp.fr, david.sheeren@ensat.fr

² TETIS, INRAE, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, Université de Montpellier, 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier cedex 5, France, max.ferriere@hotmail.fr, forian.deboissieu@inrae.fr, jb.feret@teledetection.fr

³ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, sophie.fabre@onera.fr, xavier.briottet@onera.fr

Mots-clés : Hyperspectral, Télédétection, Classes spectrales, Biodiversité, Forêt tempérée.

Le développement de méthodes de suivi de la biodiversité est crucial pour endiguer l'érosion de la biodiversité en cours. Nous testons dans cette étude l'applicabilité d'une méthode d'estimation de la biodiversité basée sur l'hétérogénéité spatiale de l'information d'imagerie hyperspectrale. Les images hyperspectrales sont des images aériennes à l'aide des instruments HySpex VNIR-1600 et SWIR-320m aéroportés. L'image finale obtenue après pré-traitement est une image en réflectance avec 409 bandes spectrales couvrant le domaine de réflexion (400 - 2500 nm) et une résolution spatiale de 4 m.

Des indices de diversité spectrale taxonomique α et β sont ensuite calculés à partir d'une discrétisation d'un espace spectral réduit. Bien que non supervisée, cette méthode nécessite de définir le nombre de classes lors de la discrétisation de l'espace spectral. Nous supposons dans cette étude que la valeur de cet hyperparamètre dépend du contexte (tropical ou tempéré) dans lequel est appliquée la méthode et qu'il dépend en particulier du nombre total d'espèces présentes. Nous évaluons ainsi les performances des indices de diversité spectrale estimés en les comparant à des indices issus d'inventaires forestiers, tout en faisant une analyse de la sensibilité de la méthode au nombre de classes défini par l'utilisateur. En parallèle, des indices de diversité spectrale fonctionnelle sont également calculés pour évaluer la nécessité de discrétiser l'espace spectral.

L'étude de sensibilité du nombre de classes montre que celui-ci a bien une influence sur la précision de l'estimation de la diversité, particulièrement pour un faible nombre de classes. Par ailleurs, il existe bien des nombres de classes spectrales pour lesquelles la corrélation entre les indices de diversité spectrale estimée et les indices issus des inventaires terrain est maximisée. Ce nombre est de $k_{opt} = 23$ pour la diversité α et de $k_{opt} = 6$ pour la diversité β . Il est en revanche difficile d'établir un lien entre le nombre optimal de classes et le nombre d'espèces présentes sur le site.

Pour $k_{opt} = 23$, les indices de diversité spectrale taxonomique montrent globalement des corrélations élevées avec les indices mesurés sur le terrain pour la diversité α (ρ variant de 0.76 à 0.82) tandis que les corrélations pour les indices de diversité fonctionnelle sont plus variables (ρ variant de 0.45 à 0.63). Les corrélations avec les indices de diversité β sont en revanche moins élevées (r_p variant de 0.35 à 0.41). Par ailleurs, les cartes de diversité α montrent que la méthode permet bien de distinguer les peuplements en mélange des peuplements mono spécifiques, tout en apportant une information à une échelle plus fine que la BD Forêt V2 de l'IGN. La méthode testée semble donc adaptée au suivi de la diversité taxonomique en milieu tempéré sans que toutefois le lien entre les informations spectrales et taxonomiques soit explicité.

Exploration des sources d'incohérence dans la réflectance spectrale (spectroscopie d'imagerie aéroportée) sur la canopée des forêts tropicales

Colin PRIEUR^{1*}, Antony LAYBROS¹, Grégoire VINCENT¹, Jocelyn CHANUSSOT²

¹ UMR AMAP, IRD, CIRAD, CNRS, INRAE, Université de Montpellier, Parc Scientifique Agropolis, 2196 boulevard de la Lironde, 34980 Montpellier-sur-Lez, France, colin.prieur@gmail.com, anthony.laybros@gmail.com, gregoire.vincent@ird.fr

² GIPSA-Lab, Université de Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 11 rue des Mathématiques, 38400 Saint-Martin-d'Hères, France, jocelyn.chanussot@grenoble-inp.fr

Mots-clés : Variabilité spectrale, Conditions d'acquisition, Imagerie hyperspectrale aéroportée

Classifiers trained with airborne hyperspectral imagery can identify tree species in a hyper-diverse tropical rainforest from surface reflectance signature [1]. However, these spectral signatures can vary due to several parameters, from intrinsic parameters depending on the surface itself to extrinsic parameters such as the state of the atmosphere and/or the acquisition geometry [2].

Here we took advantage of repeated overflights of two tropical forest sites in French Guiana (CNES - Leaf ExpVal project) to investigate factors affecting spectral similarity across dates. Atmospheric corrections [3] were applied which improved spectral consistency between flights in the spectral region from 400 nm to 2000 nm but degraded spectral consistency in the 2000-2500 nm region. The SWIR-2 spectral region also showed a significantly lower SNR.

A Random Forest was trained to predict several spectral divergence metrics between different acquisitions of the same surface from their acquisition conditions. Each parameter of the random forest can then express an importance over the prediction function of the divergence, as a proxy of their impact on the variability of the spectral signature.

Acquisition parameters include viewing and sun angles, the illumination coefficient used in the ATCOR-4 atmospheric correction [3,4], the time acquisition date and the aspect and slope of a CSM (Canopy Surface Model) built from a 2016 Lidar acquisition of both Paracou and Nouragues area.

Although atmospheric corrections increase classifiers robustness from changing conditions [1], results about such spectral robustness, indicated in [3], will be presented and discussed in our work.

[1] Laybros A., Schläpfer D., Féret J.B., Descroix L., Bedeau C., Lefevre M.J., & Vincent G. (2019), "Across date species detection using airborne imaging spectroscopy, *Remote Sensing*, 11(7):789.

[2] Theiler J., Ziemann A., Matteoli S., & Diani M. (2019), Spectral variability of remotely sensed target materials: Causes, models, and strategies for mitigation and robust exploitation, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(2):8-30.

[3] Richter R., & Schläpfer D. (2019), *Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery*, DLR report DLR-IB 565-02/2019, Wessling, Germany, pp 195.

[4] Schläpfer D., Hueni A., & Richter R. (2018), Cast shadow detection to quantify the aerosol optical thickness for atmospheric correction of high spatial resolution optical imagery, *Remote Sensing*, 10(2):200.

Milieux anthropisés

Détection et caractérisation de macro et microplastiques à partir d'images hyperspectrales acquises par drone

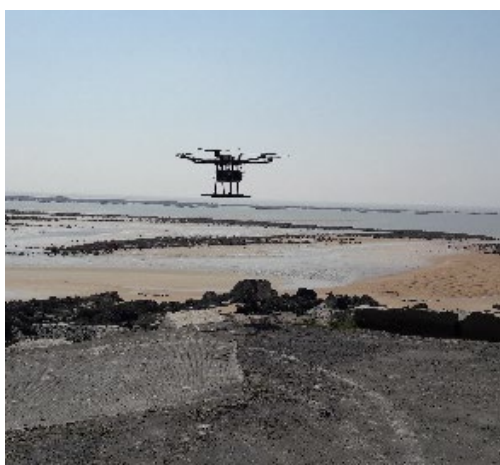
Véronique ACHARD^{1*}, Martin CUBAUD¹, Stéphanie DOZ¹, Xavier BRIOTTET¹

¹ ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, veronique.achard@onera.fr, martin.cubaud@onera.fr, stephanie.doz@onera.fr, xavier.briottet@onera.fr

Mots-Clés : Télédétection, Plastiques, Hyperspectral, Démélange spectral

Depuis 1950, on estime que 4,9 milliards de tonnes de plastiques qui ont été jetés sans être ni recyclés ni incinérés, dans des décharges ou dans l'environnement. Ce chiffre pourrait atteindre 12 milliards d'ici 2050. Cartographier la pollution par les plastiques aiderait à mettre en place les moyens adéquats pour prévenir cette pollution et pour collecter les déchets, et notamment avant qu'ils n'atteignent les océans.

Nous avons évalué le potentiel de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine 1-2,5 μm , pour la détection des macro et micro-plastiques, et pour identifier leur nature. Des images ont été acquises avec une résolution spatiale de 2,7 cm depuis un drone sur une plage de la Baie du Mont Saint-Michel où des morceaux de plastique ont été déposés. Des mesures en laboratoire de réflectances spectrales ont également été réalisées à l'aide d'un spectroradiomètre ASD FieldSpec. Des méthodes de détection et de démélange spectral ont pu être testées sur les images. Les premiers résultats ont montré qu'il était possible de détecter et de catégoriser les types polymères installés sur le site. Les plastiques d'échelle subpixellique ont également pu être détectés, en particulier à partir d'une base de données constituée avec les mesures en laboratoire. D'autre part, la méthodologie proposée de démélange spectral a permis d'extraire automatiquement la signature spectrale des plastiques et de fournir une première estimation de leur abondance.



Détection de paramètres chimiques du sol à l'aide de données hyperspectrales

Delphine NOBILEAU^{1*}, Suzanne ANGELI¹

¹ Capgemini, 109 avenue Eisenhower, 31100 Toulouse, France, delphine.nobileau@capgemini.com, suzanne.angeli@capgemini.com

Mots-clés : Hyperspectral, Transformation spectrale, Machine learning, Sols, Agriculture de précision

L'ESA lance des défis mêlant intelligence artificielle et observation de la Terre sur sa plateforme AI4EO. Capgemini a participé au challenge HYPERVIEW au premier semestre 2022 qui visait à répondre à la problématique de la détection de paramètres de composition chimique du sol à partir de données hyperspectrales. Capgemini est arrivé en 3^e position. Un jeu de données d'images hyperspectrales de parcelles agricoles et quatre paramètres du sol (taux en pH, phosphate P₂O₅, magnésium Mg et potassium K) associés à chaque image sont fournis par l'organisation du défi et servent à élaborer des modèles de prédiction.

L'exploration des jeux de données a montré une grande hétérogénéité des échantillons. En effet, les images sont de tailles différentes, allant de 73 à 14451 pixels. Le calcul pour les champs de l'indice de végétation NDVI moyen montre également une forte hétérogénéité du contenu en végétation des images, avec des images pour lesquelles on ne détecte quasiment pas de végétation et d'autres avec une abondance de végétaux verts. On peut noter que le contenu relativement réduit (1732 images) du jeu d'entraînement est potentiellement un obstacle pour l'optimisation de l'apprentissage des modèles d'intelligence artificielle. En effet, même s'il y a plusieurs pixels dans un champ, nous avons une unique valeur de chaque paramètre du sol pour le champ complet.

L'analyse de la littérature n'a pas permis d'identifier de bandes d'absorption caractéristiques pour les éléments du sol demandés dans l'intervalle de longueur d'onde disponible par le capteur du challenge. En effet, les éléments P, K, Mg sont peu abondants dans le sol et possèdent peu de propriétés spectrales caractéristiques.

Plusieurs types de modèles d'intelligence artificielle ont été réalisés et testés comme des modèles linéaires type régression ou LASSO, des Random Forest et des réseaux de neurones. Les paramètres de chaque type de modèles ont été optimisés afin d'avoir les meilleurs résultats possibles. Des transformations des spectres ont été réalisées pour les améliorer ces résultats. Nous avons implémenté des ACP (analyse en composantes principales) afin de voir s'il est possible de réduire le nombre de variable à prendre en entrée sans perdre en précision tout en décorrélant ces variables, ainsi que des ACI (analyse en composantes indépendantes). Des transformations couramment utilisées en analyse spectrale comme les dérivées spectrales d'ordre 1 et d'ordre 2 ainsi que les retraits de continuum nous ont permis d'améliorer nos résultats. D'autres types de transformations comme les transformations de Fourier ou les décompositions en ondelettes ont été testées sans améliorations significatives. Certains de ces tests n'ont pas été concluants mais nous ont permis d'aboutir à une chaîne de prétraitement servant à améliorer les résultats de nos algorithmes d'IA (Figure 1).

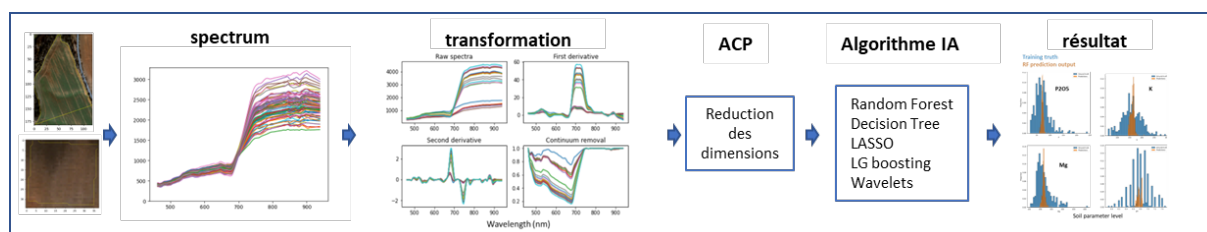


Figure 1. Illustration de la chaîne de traitement appliquées aux données hyperspectrales

Les modèles de régression non-linéaire par Random Forest sont ceux qui nous donnent les meilleurs résultats. La distribution des valeurs prédites par nos modèles démontre bien moins de variance que celle des valeurs réelles du jeu d'entraînement, ce qui reflète une taille trop réduite du jeu d'entraînement et/ou la capacité limitée du modèle Random Forest pour l'extrapolation.

Détection et caractérisation de polluants dans les eaux issues de rejets industriels par imagerie hyperspectrale aéroportée

Louis ZAUGG^{1*}, Rodolphe MARION¹, Xavier BRIOTTET², Laure ROUPIOZ², Malik CHAMI³

¹ CEA/DAM/DIF, 91297 Arpajon, France, louis.zaugg@cea.fr, rodolphe.marion@cea.fr

² ONERA-DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, xavier.briottet@onera.fr, laure.roupioz@onera.fr

³ Sorbonne Université, Laboratoire Lagrange, 96 boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice cedex 4, France, malik.chami@upmc.fr

Mots-clés : Polluants, Rejets aqueux, Détection, Caractérisation

Les rejets industriels constituent une source majeure de pollution de l'eau. L'eau utilisée dans les procédés industriels peut être stockée et traitée dans des bassins avant d'être rejetée dans l'environnement (figure 1a). Ces bassins contiennent alors des polluants sous forme dissoute et/ou en suspension. Cette étude a pour but de proposer une méthode permettant la détection et la caractérisation de polluants dans les eaux de bassins industriels à partir d'imagerie hyperspectrale. Les méthodes de télédétection actuelles sont généralement spécifiques au site et nécessitent des mesures *in situ* pour calibrer un modèle d'inversion. Les propriétés optiques inhérentes (IOPs) de ces polluants (coefficients d'absorption et de rétrodiffusion) demeurent méconnues. Il s'agit donc d'estimer les propriétés optiques des polluants majoritaires en se basant sur une approche physique telle que décrite dans le modèle semi-analytique de Lee et al. [1]. Dans le cas des eaux naturelles, les IOPs correspondent aux constituants optiquement actifs et ces paramètres sont connus et disponibles dans la littérature. Dans notre cas, il est nécessaire d'estimer les IOPs des polluants, ce qui conduit à un problème mal posé. En considérant une homogénéité spatiale de la composition chimique de ce type de bassins, nous supposons que le coefficient d'absorption $ap_0(\lambda)$ des polluants est le même pour tous les pixels du bassin et que seule son amplitude varie d'un pixel à l'autre (C_{pol}). Pour le coefficient de rétrodiffusion, nous nous basons sur la définition utilisée dans le modèle de Lee qui nécessite deux paramètres scalaires. Cette définition a été modifiée afin de prendre en compte la rétrodiffusion par les grosses particules, particulièrement importante dans notre cas. L'inversion du modèle de Lee sans prise en compte des IOPs des polluants ne permet pas une bonne estimation des spectres de réflectance mesurés dans le cas de bassins d'une soudière (Figure 1b, spectre vert). Leur prise en compte permet une bien meilleure estimation (Figure 1b, spectre rouge).

Une méthode d'inversion alternée multipixel est alors proposée afin d'estimer conjointement $ap_0(\lambda)$ et les paramètres de rétrodiffusion des grosses particules. Cette méthode s'applique de façon alternée en minimisant séparément et par itération les paramètres variant d'un pixel à l'autre (e.g. profondeur, rétrodiffusion, coefficient C_{pol}) et les paramètres communs à tous les pixels ($ap_0(\lambda)$). Une validation est effectuée à l'aide d'images hyperspectrales (Hypspec NEO), de spectres de réflectance (ASD FieldSpec), de connaissances *a priori* sur le site et de mesures *in situ* et de laboratoire.

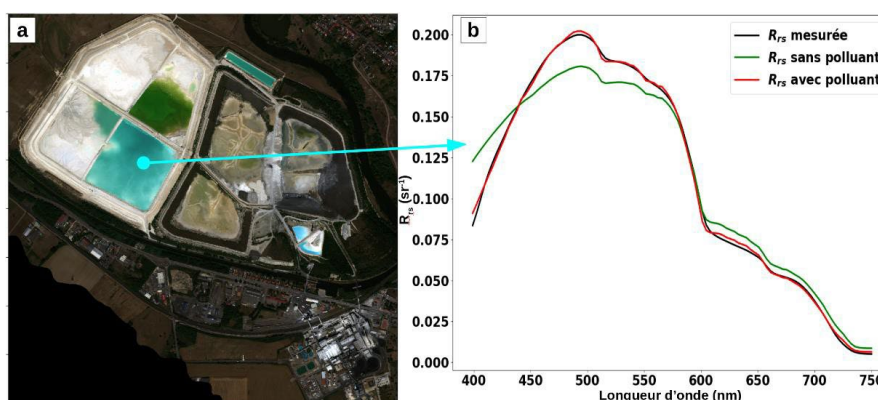


Figure 1. (a) Site industriel étudié (soude produisant du carbonate de soude). (b) Spectre mesuré dans le bassin principal (en noir), spectres simulés à partir du modèle de Lee sans polluant (en vert) et avec polluant (en rouge).

[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.