



7^e édition

Colloque Groupe Hyperspectral

SFPT – GH

9 - 10 juillet 2019, Toulouse



EDITO

Au cours des dernières décennies, la télédétection hyperspectrale a connu un essor considérable dans le monde de la télédétection. 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 instrumentales ont permis le développement de capteurs miniaturisés permettant l'utilisation de drones, et plusieurs missions satellite sont en préparation avec l'appui de différentes agences spatiales ou en cours (mise en orbite du satellite PRISMA de l'agence spatiale italienne ASI en mars 2019), permettant de diversifier et d'étendre les applications, tout en soulevant des nouveaux défis.

La communauté hyperspectrale française s'est structurée au sein du Groupe thématique imagerie Hyperspectrale de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection (SFPT-GH), ayant pour objectifs 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 annuellement 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 Montpellier, nous sommes heureux d'accueillir la 7^e édition du colloque SFPT-GH à Toulouse (déjà ville d'accueil en 2012), les 9 et 10 juillet 2019 dans les locaux de l'école d'ingénieur Toulouse-INP / ENSEEIHT. L'organisation est gérée cette année par l'ONERA, Toulouse INP (ENSEEIHT et ENSAT) et l'INRA (CESBIO). Le colloque traitera des dernières avancées dans des thématiques variées telles que l'étude des milieux urbains, des milieux littoraux, de la végétation et des géosciences. Les progrès méthodologiques, les développements instrumentaux récents, la synthèse des capteurs existants et à venir seront abordés. La nouveauté de cette édition est l'introduction d'une session orale sous forme de *teaser* spécifiquement dédiée aux exposants, leur apportant une meilleure visibilité afin d'inciter les participants à venir les rencontrer sur leurs stands.

Nous remercions chaleureusement nos nombreux sponsors et Toulouse INP pour leur soutien financier, ainsi que l'ENSEEIHT en particulier pour nous avoir ouvert ses locaux et permis d'organiser cet évènement dans les meilleures conditions. Nous sommes également très reconnaissants envers le professeur Jun Li pour son intervention orale, invitée grâce au programme « Distinguished Lecturer » de l'IEEE GRSS.

Le comité d'organisation

COMITÉS

Comité d'organisation

Karine Adeline - ONERA
Nadine Barriety - ONERA
Nicolas Dobigeon – Toulouse INP
Mathieu Fauvel - INRA
Aurélie Michel - ONERA
Laure Roupioz - ONERA
David Sheeren – INRA – Toulouse INP

Comité scientifique

Véronique Achard – ONERA
Josselin Aval – LABISEN
Touria Bajjouk – IFREMER
Arnaud Le Bris – IGN
Harold Clénet – PURPAN
Thomas Corpetti – COSTEL
Mauro Dalla-Mura – GIPSA-LAB
Adrien Deschamps – CNES
Sophie Fabre – ONERA
Jean-Baptiste Féret – IRSTEA
Pierre-Yves Foucher – ONERA
Cécile Gomez – IRD
Nathalie Goretta – IRSTEA
Sébastien Lefebvre – IRISA
Marie-José Lefevre Fonollosa – CNES
Marc Lennon – HYTECH Imaging
Vincent Lonjou – CNES
Vincent Mazet – ICUBE
Audrey Minghelli – LIS
Sébastien Payan – LATMOG
Sébastien Rapinel – LETG
Frédéric Schmidt – CNRS
Emmanuelle Vaudour – AgroParis Tech

EXPOSANTS



Programme SFPT – GH 2019

Mardi 9 juillet

- 8h30 Accueil
- 9h15 - 9h30 Mot de bienvenue et présentation du Groupe Hyperspectral de la SFPT, Karine Adeline – ONERA

Session 1 - SYNTHÈSE CAPTEURS

Pages 1 - 2

Animateur de session : Vincent Lonjou - CNES

- 9h30 - 9h50 **Historique et synthèse des études sur l'hyperspectral menées au CNES**
M.-J. Lefèvre-Fonollosa, A. Deschamps, V. Lonjou, G. Blanchet, S. May
- 9h50 - 10h10 **Recent scientific developments to support a future French hyperspectral space mission**
X. Briottet, T. Bajjouk, V. Carrere, M. Chami, C. Delacourt, M. Fauvel, J.-B. Féret, C. Gomez, S. Jacquemoud, R. Marion, A. Minghelli, D. Sheeren, C. Weber

Session 2 - INSTRUMENTATION

Pages 3 - 6

Animateur de session : Rodolphe Marion - CEA

- 10h10 - 10h30 **Simulation and Improvements of the Hyperspectral Images of the SIELETERS Airborne System**
O. Gazzano, Y. Ferrec, A. Kattnig, C. Coudrain, L. Rousset-Rouviere
- 10h30 - 10h50 **Instrument hyperspectral large bande (UV-Vis-NIR) pour la caractérisation de la fluorescence des matériaux organiques**
E. Gouisset, F. Bourcier, P. Walter, F. Infante
- 10h50 - 11h10 **ImSpoc : un imageur hyperspectral compact pour les sciences de l'atmosphère**
Y. Ferrec, F. de la Barrière, E. Le Coarer, L. Croizé, S. Gousset, J. Rodrigo
- 11h10 - 11h30 **Caractérisation des gaz basée sur un spectro-imageur interférométrique instantané**
A. Dolet, D. Picone, M. Dalla Mura, S. Gousset, S. Doute, E. Le Coarer

Session 3 - EXPOSANTS

Animatrice de session : Karine Adeline - ONERA

- 11h30 - 12h05 LOT - QuantumDesign, Harris Geospatial, ASD & Bonsai, HyTECH Imaging, OPTOPRIM, PRO-LITE, SILIOS technologies

12h05 - 13h30 Pause déjeuner

Session 4 – METHODOLOGIE

Pages 7 - 11

Animateur de session : Josselin Aval - Yncrea Ouest, ISEN

- 13h30 - 13h50 **Hyperspectral image reconstruction from an adaptive dual-disperser imager exploiting the spatial correlation of the panchromatic image**
I. Ardi, H. Carfantan, S. Lacroix, A. Monmayrant
- 13h50 - 14h10 **Improvement and validation of DART atmosphere thermal infrared radiative transfer modelling**
Y. Wang, J.-P. Gastellu-Etchegorry
- 14h10 - 14h30 **Séparation de spectres de galaxies fondée sur la fusion de données**
A. Guerrero, S. Hosseini, Y. Deville, T. Contini, T. Grégoire
- 14h30 - 14h50 **Démélange parcimonieux et prise en compte de contraintes structurantes par optimisation globale**
R. Ben Mhenni, S. Bourguignon, J. Ninin, F. Schmidt
- 14h50 - 15h10 **Fusion de données hyperspectrales et panchromatique par démélange spectral dans le domaine réfléchitif**
Y. Constans, S. Fabre, V. Crombez, M. Seymour, J. Chanussot, Y. Deville, X. Briottet

Session 5 – POSTERS

Pages 12 - 22

- 15h10 – 16h30 Animatrice de session : Karine Adeline - ONERA
- 16h30 - 17h30 **Oratrice invitée : Pr. Jun Li – Sun Yat Sen University, Guangzhou China**
Recent advances in spectral-spatial hyperspectral image classification

20h00 - 22h30 Dîner

Mercredi 10 juillet

8h30 Accueil

Session 6 – MILIEUX LITTORaux

Pages 23 - 26

Animatrice de session : Touria Bajjouk - IFREMER

9h00 - 9h20 **Blind unmixing based on spectral variability modeling for hyperspectral oceanic remote sensing data with adjacency effects**

Y. Deville, S.-E. Brezini, F.-Z. Benhalouche, M.S. Karoui, M. Guillaume, X. Lenot, B. Lafrance, M. Chami, S. Jay, A. Minghelli, X. Briottet, V. Serfaty

9h20 - 9h40 **Macroalgues intertidales : Apport de la télédétection hyperspectrale pour le suivi sectoriel dans le cadre de la DCE/DCSMM**

A. Le Bris, T. Perrot, P.-O. Liabot, C. Daniel, S. Richier

9h40 - 10h00 **Suivi de cordons dunaires par télédétection synchronisée Hyperspectrale et LiDar à retour d'onde complet**

G. Frati, P. Launeau, M. Giraud, S. Moussaoui, M. Robin, D. Lague, C. Michon

10h00 - 10h20 **Cartographie de vestiges archéologiques immergés à partir d'images hyperspectrales : application au site d'Er Lannic**

A. Guyot, M. Lennon, T. Lorho, N. Thomas, T. Petit, S. Guéguen, G. Sicot, S. Cassen, L. Hubert-Moy

10h20 - 10h50 Pause café

Session 7 – VEGETATION

Pages 27 - 30

Animatrice de session : Sophie Fabre - ONERA

10h50 - 11h10 **Utilisation de données hyperspectrales pour la détection et la quantification des hydrocarbures pétroliers en régions végétalisées**

G. Lassalle, S. Fabre, A. Credoz, R. Hédacq, G. Bertoni, D. Dubucq, A. Elger

11h10 - 11h30 **Identification automatique d'essences forestières : comparaison des performances entre données hyperspectrales (Hypxim) et données hypertemporelles (Sentinel 2)**

T. Erudel, S. Fabre, P. Déliot, X. Briottet, J.-B. Féret, D. Sheeren

11h30 - 11h50 **Caractérisation de la réflectance de canopée pour la cartographie de la biodiversité en forêt tropicale par modélisation physique**

D.M. Ebengo, F. de Boissieu, C. Lavalley, G. Vincent, C. Weber, J.-B. Féret

11h50 - 12h10 **Influence of forest modeling on LAI and chlorophyll content estimation with radiative transfer inversion for a woodland savanna**

T. Miraglio, K. Adeline, M. Huesca, S. Ustin, X. Briottet

12h10 - 13h30 Pause déjeuner

Session 8 – MILIEUX URBAINS

Pages 31 - 33

Animateur de session : Xavier Briottet - ONERA

13h30 - 13h50 **Apport des données hyperspectrales pour la cartographie et la caractérisation des sources lumineuses artificielles nocturnes en milieux urbains**

J. Nabucet, M. Lennon, N. Thomas, D. Moisan, L. Hubert-Moy

13h50 - 14h10 **HYEP Hyperspectral imagery for Environmental urban Planning : principaux résultats**

C. Weber, T. Houet, S. Gadal, R. Aguejda, G. Skupinski, Y. Deville, J. Chanussot, M. Dalla-Mura, X. Briottet, C. Mallet, A. Le Bris

14h10 - 14h30 **Apport d'une voie panchromatique dans le démixage d'images hyperspectrales**

S. Rebeyrol, Y. Deville, V. Achard, X. Briottet, S. May

Animatrice de session : Véronique Carrère – LPG Nantes

14h30 – 14h50 **Identification et caractérisation de minéraux : une procédure automatique de traitement d'image hyperspectrale**

R. Rialland, R. Marion, C. Soussen, V. Carrère

14h50 – 15h10 **Minéralogie de zones de cisaillement dans Valles Marineris, Mars, et évolution géologique**

F. Schmidt, J. Gurgurewicz, D. Mege

15h10 – 15h30 **Détection de sols pollués aux hydrocarbures à partir d'images hyperspectrales**

V. Achard, C. Elin, D. Dubucq

15h30 – 16h00 **Synthèse et clôture**

Session 5 : POSTERS

TERRISCOPE : Une nouvelle plateforme de télédétection optique aéroportée à partir d'avions et de drones pour la caractérisation de l'environnement et des surfaces continentales

Y. Boucher, A. Amiez, P. Barillot, C. Chatelard, C. Coudrain, P. Déliot, N. Rivière, T. Rivière, L. Roupioz

Detection of vine diseases in multispectral (UAVs and satellite) and hyperspectral (airborne) images : Preliminary results using a non-linear unmixing tool (SAGA+)

H. Clenet, S. Nakhostin, E. Laroche-Pinel, V. Cheret, S. Duthoit

Cartographie des fonds marins à partir d'images hyperspectrales aériennes par correction de l'atténuation du signal du fond par la colonne d'eau

A. Minghelli, M. Guillaume, M. Chami, B. Lafrance, X. Briottet, S. Jay, Y. Deville, V. Serfaty, M. Peirache

Integrating water column effects and bottom neighbor influence for a specific NMF seabed unmixing method

M. Guillaume, Y. Deville, X. Lenot, B. Lafrance, M. Chami, S. Jay, A. Minghelli, X. Briottet, V. Serfaty

Validation d'une méthode de correction des cirrus dans le domaine réflectif [0.4 – 2.5µm]

S. Salgado, S. Mathieu, L. Poutier, X. Briottet

L'imagerie hyperspectrale au service de nouvelles applications

J. Aval, A. Al Falou

Cofactorisation de matrices pour le démelange et la classification conjoints d'images hyperspectrales

A. Lagrange, M. Fauvel, S. May, J.M. Bioucas-Dias, N. Dobigeon

Utilisation de données optiques pour l'exploration pétrolière basée sur les effets indirects sur la végétation

S. Fabre, P. Déliot, A. Beaupere, A. Credo, D. Dubucq

Cartographie de minéralisations hydrothermales par imagerie hyperspectrale aéroportée : cas d'étude du bassin de Tabernas (Almeria, SE Espagne)

E. Ducasse, K. Adeline, V. Miegbielle, M. Larrey

Fusion of LiDAR and hyperspectral data for 3D segmentation of individual trees

E. Tusa, J.-B. Barré, J.-M. Monnet, M. Dalla-Mura, F. Berger, J. Chanussot

Hyperspectral unmixing based on a novel pixel-by-pixel NMF algorithm using a new linear mixing model to address multiplicative adjusted spectral variability

F.Z. Benhalouche, M. S. Karoui, Y. Deville

SYNTHESE CAPTEURS

Historique et synthèse des études sur l'hyperspectral menées au CNES

Marie-José Lefèvre-Fonollosa (*), Adrien Deschamps (*), Vincent Lonjou (*), Gwendoline Blanchet (*),
Stephane May (*)
(*) Centre National d'Etudes Spatiales, 18 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France
marie-jose.lefevre@cnes.fr

Le contexte international de l'hyperspectral spatial est en pleine évolution avec 3 nouvelles mission satellites lancées en 2018 et 2019 : le nanosatellite HyperScout, l'instrument HysIS sur la station orbitale et le satellite PRISMA. Par ailleurs la NASA avec SBG et l'ESA avec CHIME ont programmé des missions Sciences et Applications à couverture globale pour le moyen terme.

Dans ce contexte, le CNES, répondant aux besoins exprimés par la communauté nationale de l'hyperspectral, a toujours privilégié un axe peu exploré qui est celui de la haute résolution spatiale hyperspectrale (< 15m), afin de combler le gap existant entre les mesures in situ et aéroportées et les mesures spatiales à moyenne résolution (~30m).

Un bref historique des études de phase 0 menées depuis 10 ans au CNES et un point sur les travaux les plus avancés ainsi que leur positionnement dans le contexte international est présenté.

- Entre 2010 et 2015, les concepts HYPXIM C- P et D pour répondre à des besoins scientifiques et duaux ;
- En 2016 et 2017 : HYPEX2, proposé à l'appel d'offre de l'ESA Earth Explorer 9 par une communauté scientifique élargie au niveau européen ;
- Depuis 2018 : les opportunités de coopérations internationales sur des missions plus ciblées peut-être moins ambitieuses mais répondant à des contraintes de coûts et de masse sévères.

Par ailleurs, en parallèle à ces études d'architecture système, on décrira des activités techniques menées dans divers cadres,

- Physique de la mesure : a) modélisation 3D du transfert radiatif en milieu forestier (cadre TOSCA-modèle DART) ; b) étude d'impact des corrections atmosphériques en milieu littoral et des performances instrumentales (cadre R&T –physique de la mesure CNES) ;
- Qualité image comme a) la reprise les points de fonctionnement en partant des besoins mission de trois applications ciblées afin d'évaluer quel est le juste besoin au regard des utilisateurs finaux (phase 0 CHIMERE) ; b) au débruitage hyperspectral (cadre R&T –qualité image CNES) ;
- Études algorithmiques conjointement à de la classification et du démelange d'images hyperspectrales notamment en s'appuyant sur les informations contenues dans une voie panchromatique mieux résolue à haute ou très haute résolution (cadre de thèses- CNES/ONERA /INP-TOULOUSE). ;
- Etude sur les sources d'aérosols anthropique et de méthane- cadre Thèse ONERA, R&T et TOSCA
- Qualification de détecteurs matriciels à filtres continûment variables (R&T Démonstrateur).

Recent scientific developments to support a future French hyperspectral space mission

BRIOTTET X. (ONERA), BAJOUK T. (IFREMER, SQ2), CARRERE V. (Univ. of Nantes, France, SQ3-4), CHAMI M. (Univ. Pierre et Marie Curie, France, SQ2), DELACOURT C. (Univ. of Bretagne Occidentale, France, SQ2), FAUVEL M. (CESBIO, SQ1), FERET J.-B. (Irstea, France, SQ1), GOMEZ C. (IRD, France, SQ3), JACQUEMOUD S. (Univ. Paris Diderot, France, SQ1-3), MARION R. (CEA, France, SQ3-4), MINGHELLI A. (Univ. of Toulon, France, SQ2), SHEEREN D. (ENSAT, France, SQ1), WEBER C. (TETIS, France, SQ4)

French community is working on a new hyperspectral mission which will contribute to our knowledge of the Earth's critical zones. A particular feature of these areas is that it supports almost all human activities and is currently subject to rapid and profound changes that impact our life. The exploration of such complex and dynamic ecosystems requires an interdisciplinary approach at high spatial and temporal scales, across environmental and anthropogenic gradients. To this end, such mission aims to answer to the following scientific questions (SQ).

SQ1 - How does functional diversity of vegetation react in response to the anthropogenic influence?

Climate, land use change, and other anthropogenic activities, affect ecosystem functions and processes, contributing to biodiversity loss and habitat vulnerability. These last can be characterized by their essential biodiversity variables (EBV) including leaf chemistry and species composition.

SQ2 - What is the current bathymetry, water quality and biodiversity of selected shallow water test areas?

How much do land degradation products impact coastal and inland waters?

Coastal and inland water ecosystems are subject to high spatial and temporal variability in their bio-optical, morphological and biogeochemical properties. The main variables to be investigated will be phytoplankton functional types, bathymetry, seabed mapping, harmful algal blooms, suspended matter and colored dissolved organic matter concentrations at land-ocean interfaces, phytoplankton filaments induced by ocean circulation and turbulence.

SQ3 - What is the impact of management practices on environmental processes such as soil infiltration, surface retention, runoff and erosion?

Imaging spectroscopy proved to be a powerful tool to monitor the impact of land management on crop productivity by accurately mapping key chemical, geochemical and structural soil surface properties. To study the impact of management practices on environmental processes, the following variables will be estimated: soil primary properties, soil surface conditions and soil nutrients.

SQ4 - How do urban materials and industrial pollution impact on vulnerable surrounding?

Urban area induces specific threats (hydrologic risk, surface pollution dissemination through running water, industrial and urban pollution, urban heat island...) which will contribute to degrade our way of life. Such mission can bring information on the following variables to improve our knowledge on these threats: impervious surface, urban vegetation, soil classification, pollution.

This presentation aims to synthesize recent scientific works based on hyperspectral imagery to prepare such a mission. These results will come from works supported by CNES (APR, R&T), ANR on the four main types of applications vegetation, coastal zone, urban area and soil.

INSTRUMENTATION

Simulation and Improvements of the Hyperspectral Images of the SIELETTERS Airborne System

O. Gazzano*, Y. Ferrec, A. Kattnig, C. Coudrain, L. Rousset-Rouviere
ONERA – The French Aerospace Lab – BP 80100 – F-91123 Palaiseau Cedex – France

SIELETTERS is a dual-band airborne hyperspectral imaging system that covers the mid- and long-wavelength infrared bands (MWIR and LWIR). It is part of the SYSIPHE system that covers bands from 0.4 μm to 11.5 μm [2]. The ground sampling distance of the SIELETTERS instrument is 0.5 m with a spectral resolution of 11 cm^{-1} and 5 cm^{-1} , respectively in the MWIR and LWIR bands [1].

During this talk we will present the recent progress we have made to improve the quality of the hyperspectral images acquired by the SIELETTERS system. SIELETTERS instrument is composed of two Fourier transform spectrometers that acquire hundreds of images while the aircraft is moving to measure many optical path differences for all the targeted area. It is then necessary to perform data registrations to overlap the images and to obtain spectral information. This registration is now performed by a two-step method: we first pre-register the images by using the line of sight recorded during the flight and the digital elevation model, and then we perform images correlations on the pre-registered images. We show the method improves the geometrical quality of the spectral images and the quality of the spectrum on buildings edges.

To further understand the insights of the SIELETTERS system and further improve the images, we also developed a calculation program that simulates images taken by the SIELETTERS instrument. In particular, the calculations account for the system optical transfer function and for the pixel spectral and spatial responses. The simulation program is now used to improve and to validate the data processing programs of the SIELETTERS instruments in several cases that we will describe.

[1] C. Coudrain *et al.*, Opt. Express 23, 16164-16176 (2015)

[2] L. Rousset-Rouviere, *et al.*, 10th EARSSEL SIG Imaging Spectroscopy (2017)

*Corresponding author: olivier.gazzano@onera.fr

Instrument hyperspectral large bande (UV-Vis-NIR) pour la caractérisation de la fluorescence des matériaux organiques

Emmanuel GOUISSET³, Frédéric BOURCIER¹, Philippe WALTER², Fulvio INFANTE³

¹ CNES, 18 avenue Edouard Belin 31400 Toulouse, France,
frederic.bourcier@cnes.fr

² LAMS, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France,
philippe.walter@upmc.fr

³ INTRASPEC TECHNOLOGIES, 20 avenue Didier Daurat 31400 Toulouse, France,
emmanuel.gouisset@intraspec.com & fulvio.infante@intraspec.com

Les instruments optiques pour les applications spatiales deviennent de plus en plus sensibles à la contamination particulaire et moléculaire. Il est difficile de réaliser des caractérisations de contaminants sur des surfaces de modèles de vol en salle blanche. Les méthodes de caractérisation de matériaux telles que le FTIR et la fluorescence X nécessitent un contact physique avec les surfaces sensibles à analyser, et sont par conséquent souvent interdites sur des modèles de vol de satellites. De plus, ces instruments sont des radiomètres et ne renseignent pas sur la distribution géographique des contaminants.

Le CNES, en collaboration avec le LAMS et INTRASPEC TECHNOLOGIES, ont développé un outil d'analyse portable non invasif et sans contact pour l'AIT (Assembly, Integration and Test). Il s'agit d'un instrument compact d'imagerie hyperspectrale avec un champ de 3,86° (512 pixels) mesurant la scène par scan successif afin de reconstruire le cube. Il travaille sur une bande spectrale comprise entre 300nm et 1000nm, et celle-ci est divisée en 140 canaux spectraux de 5nm de largeur. Cet instrument peut travailler à partir de 20cm de la cible à une quinzaine de mètres.

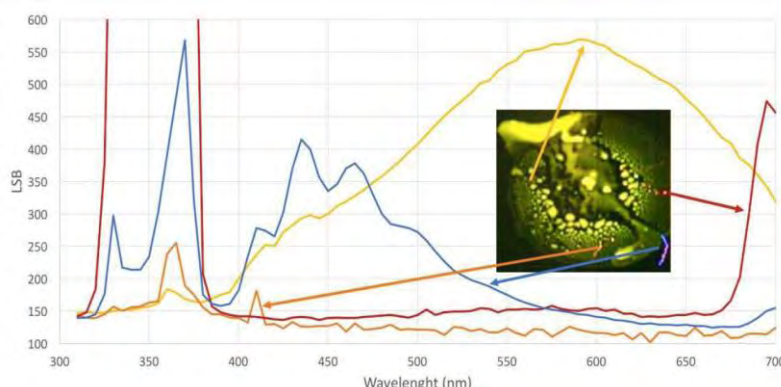


Figure 1 - Image d'un contaminant moléculaire issu du dégazage d'un adhésif noir ; Spectres des différents composants présents lors de l'analyse

Le spectromètre acquiert les spectres de fluorescence UV-Vis-NIR des contaminants et permet la caractérisation de certaines propriétés physico-chimiques de ces derniers. En effet, la forme des spectres de fluorescence de matériaux comme les adhésifs, les peintures, les vernis ont des signatures spécifiques qui peuvent être référencées dans des bases de données (ex Figure 1). La fluorescence d'éléments organiques sous forme solide présente en général des spectres larges qui peuvent s'étendre de l'UV au proche IR, ce qui renforce l'intérêt de considérer un intervalle de longueurs d'onde le plus étendu possible en une seule acquisition. Par ailleurs, la localisation de ces contaminants donne des informations supplémentaires qui permettent de statuer sur la criticité lors d'une expertise (ex Figure 2). Il est important de noter que l'instrument présente aussi un grand intérêt pour différents domaines d'application comme : le patrimoine, la minérologie, l'industrie aéronautique, l'automobile, la pétrochimie, la médecine, la criminologie...

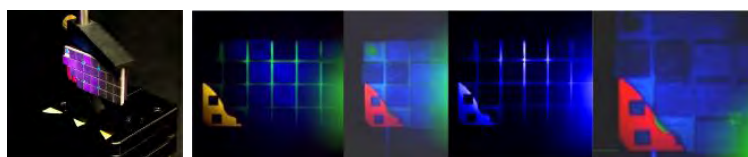


Figure 2 - Génération de couleur RGB selon les spectres de fluorescence issus de la mesure afin de localiser

Im Spoc : un imageur hyperspectral compact pour les sciences de l'atmosphère

Yann Ferrec^{1*}, Florence de la Barrière¹, Etienne Le Coarer², Laurence Croizé¹, Silvère Gousset², Juana Rodrigo²

^{1*} Onera, chemin de la Hunière BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France, yann.ferrec@onera.fr

² Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, 38000 Grenoble, France

ImSpoc est une architecture optique développée par l'ipag et l'Onera pour réaliser des spectro-imageurs compacts permettant l'acquisition simultanée de tous les points du cube hyperspectral. Ceci est réalisé en associant une matrice de minilentilles et une lame en marches d'escalier. La matrice de minilentilles forme une collection d'images de la scène, juxtaposées au niveau du détecteur matriciel. La lame en marches d'escalier est placée devant la matrice de lentilles, de sorte qu'une épaisseur de lame est associée à une image. Cette lame est un filtre de Fabry-Perot, mais si les faces sont peu réfléchissantes (quelques dizaines de pourcents) il est possible de ne considérer que deux ondes dans la cavité, la différence de marche entre ces deux ondes étant directement reliée à l'épaisseur de la lame pour cette voie. On obtient ainsi un spectro-imageur à transformée de Fourier.

Un tel composant est actuellement développé dans plusieurs projets. Dans le projet FUI ImSpocUV, la lame est une lame d'air, obtenue en plaçant face à face deux lames de verre en marches d'escaliers d'un côté et traitées anti-reflets de l'autre. Il est alors possible d'avoir des cavités très fines, et donc des différences de marche quasi-nulles, ce qui permet de mesurer l'ensemble de l'interférogramme. Le projet ImSpocUV ambitionne de réaliser un instrument dans l'ultraviolet et le visible, pour une observation multiaxiale de l'atmosphère depuis le sol.

Pour des applications plus spécifiques, notamment la mesure de gaz à effet de serre, il peut être avantageux de ne mesurer qu'une partie de l'interférogramme. En effet, si le spectre est périodique, l'information sera principalement contenue aux différences de marches correspondant à cette période. La mesure d'un petit nombre de différences de marches, mais bien choisies, permet alors d'acquérir l'essentiel de l'information tout en relâchant les contraintes sur la taille du détecteur. C'est ce principe qui a été retenu pour les projets Scarbo, SpaceObs et Halesis. Scarbo est un projet H2020 dédié à la mesure des gaz à effets de serre et des aérosols à l'aide d'une constellation de minisatellites, SpaceObs est un projet soutenu par l'université de Paris-Saclay pour la mesure de CO en occultation solaire, et Halesis est une étude pour un spectro-imageur dédié à l'observation de la signature infrarouge des phénomènes lumineux transitoires dans la haute atmosphère.

Durant cette communication, nous décrirons plus en détails le principe du composant ImSpoc, ainsi que ses avantages et ses limites, en prenant exemple sur les projets cités ci-dessus. Nous présenterons ensuite les enjeux en termes de développement technologique et de calibration, en complément avec la présentation d'Aneline Dolet (Gipsa Lab) orientée vers le traitement des images.

Le FUI ImSpocUV est soutenu par le FEDER de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le projet Scarbo est financé par le programme européen H2020 (No 769032) et est coordonné par Airbus Defense and Space. SpaceObs est une Initiative de Recherche Stratégique de l'Université Paris-Saclay. Le projet Halesis est mené en collaboration avec Sébastien Payan (Latmos) avec un soutien financier du Cnes.

Caractérisation des gaz basée sur un spectro-imageur interférométrique instantané

Aneline DOLET^{1*}, Daniele PICONE¹, Mauro DALLA MURA^{1,2}, Silvère GOUSSET³, Sylvain DOUTE³, Etienne LE COARER³

^{1*} GIPSA-lab, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-lab, Grenoble, France

² Tokyo Tech World Research Hub Initiative (WRHI), School of Computing, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

³ Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), Grenoble, France

Dans le contexte du changement climatique et de la surveillance de l'environnement, la mesure précise des gaz dans l'atmosphère par télédétection est aujourd'hui capitale. L'augmentation des résolutions spatiale, spectrale et temporelle des acquisitions est recherchée, ce qui nécessite le développement de nouveaux capteurs et de leurs méthodes de traitement du signal.

Cette étude porte sur une technologie novatrice d'acquisition d'images hyperspectrales basée sur un spectro-imageur interférométrique statique miniaturisé (instantané), appelée *Imaging Spectrometer on Chip* (ImSPOC) et caractérisée par un usage non conventionnel d'interféromètres de Fabry-Perot (FP) à faible finesse (i.e. débit élevé).

Le concept ImSPOC est composé d'une matrice de plusieurs interféromètres de FP d'épaisseurs différentes, superposée à un système d'imagerie composé d'une série de mini-lentilles et d'un réseau de détecteurs placé dans le plan focal de celles-ci.

Les détecteurs acquièrent alors un ensemble d'images, interprétables comme des répliques d'une même scène, modulées par des franges interférométriques multiplicatives dont la fréquence dépend de l'épaisseur de chaque interféromètre. Les différentes différences de chemins optiques (OPD) associées à chaque interféromètre permettent d'obtenir un ensemble d'échantillons de l'interférogramme pour chaque pixel de la scène, lesquels peuvent à leur tour être inversés pour reconstruire une image hyperspectrale. Cette conception permet d'obtenir une résolution spectrale concurrente à un coût relativement bas par rapport aux systèmes de détection à distance classiques destinés à mesurer des gaz avec des performances similaires.

Malgré ces performances intéressantes, le traitement des données nécessaire pour obtenir des mesures de gaz soulève de nombreux défis. Tout d'abord, la conception conjointe de cet ensemble d'interféromètres pose certains problèmes de calibration. Plus spécifiquement, des comportements spatialement incohérents parmi les différentes images, acquises avec des OPD différentes, peuvent être introduits par les imperfections de chaque élément de l'instrument (par exemple, l'effet de parallaxe causé par l'angle de vue spécifique de chaque interféromètre ou les petites différences dans la fabrication de ceux-ci). De plus, les interférogrammes théoriquement idéaux ne peuvent pas être obtenus en pratique en raison de contraintes physiques et de fabrication.

Le rôle du traitement du signal pour extraire une estimation précise du spectre par pixel à partir des interférogrammes obtenus est donc de la plus haute importance. Des méthodes ad-hoc doivent être développées pour la calibration du capteur ainsi que pour la reconstruction du spectre, dans le cas où l'interférogramme mesuré n'est pas directement exploitable pour les applications visées. Enfin, le spectre reconstitué doit également être traité afin de fournir une mesure précise de la concentration du gaz d'intérêt. Cette étude présente alors précisément ce capteur ainsi que ces développements.

METHODOLOGIE

Hyperspectral image reconstruction from an adaptive dual-disperser imager exploiting the spatial correlation of the panchromatic image

Ibrahim ARDI^{1,2}, Hervé CARFANTAN¹, Simon LACROIX², Antoine MONMAYRANT²

¹ Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) – Université de Toulouse/CNRS, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

² LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

We study the reconstruction of hyperspectral (HS) cubes using a recently proposed programmable dual disperser imager[1]. This instrument acquires a subsample of the information contained in the HS cube, controlled by the configuration of a Digital Micromirrors Device (DMD), without having to scan the whole cube. For example, when all the mirrors are “on”, the acquired data correspond to the panchromatic image. Our aim is to reconstruct the HS cube from a small number of acquired data (for different configurations of the DMD) using low-computation-cost reconstruction algorithms. The major contribution of this presentation concerns the exploitation of the spatial correlations of the panchromatic image in the reconstruction process to compensate for the lack of data.

The panchromatic image accurately represents the spatial structure of the HS cube. It also preserves well the discriminative feature of the spectra: for two identical spectra the panchromatic intensities are the identical, whereas they are unlikely to be the same for two different spectra, especially if they are spatially contiguous and thus exposed to the same illumination source. In practice though, the discriminative information brought by the panchromatic image is not perfectly reliable because of its alteration by noise, and it therefore should be dealt with precaution. We propose two distinct approaches that harness the panchromatic image.

In the first approach the emphasis is mainly put on the edges detected on the panchromatic image. This choice was propped by two major characteristics of edges: the intensity difference between to pixels of different regions is robust to noise, and edges mark the borders between different regions. The latter implies that edges must be preserved during the reconstruction process to faithfully match the spatial structure of the panchromatic image, and also to prevent any spectral correlation between the spectra of the different regions across their borders. The reconstruction method we propose imposes a spatio-spectral correlation over the entire HS scene via the introduction of a quadratic Tikhonov regularization, while preserving the edges, merely suppressing the regularization around the edges.

The second approach focuses on regions where the panchromatic image intensity is quasi-homogeneous. Even though quasi-homogeneous regions do not always correspond to regions where the spectrum is perfectly the same, they generally represent regions where the spectral content does not vary too much. Therefore, for such regions, the HS cube can be modeled by a separable tensor product between a unique spectrum and the panchromatic image intensity. For such a model, the reconstruction process can be performed independently on each region, simply using a regularized least square to recover the spectrum of the region. Of course, the threshold used to segment the panchromatic image in regions is key, and should be chosen carefully: not too small to withstand the noise, and not too high too ensure a proper segmentation.

The performances of the proposed methods strongly depend on the parameters choice and acquisitions configurations. We have addressed the parameters selection problem, analyzing their impact through an extensive exploration of their variation domain via real-world examples. The two proposed reconstruction approaches being fairly different, we have first made a separate assessment of their performances, where each reconstruction results are evaluated with known metrics (RMSE, SAM, SSIM). A second evaluation compares both methods, thoroughly analyzing them to highlight the drawbacks and advantages of each method.

Improvement and validation of DART atmosphere thermal infrared radiative transfer modelling

Yingjie WANG¹, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY²

^{1,2}Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère - CNES, CNRS, IRD, Université de Toulouse, 18 avenue, Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse cedex 9, France
yingjiawang1102@gmail.com

Hyperspectral Thermal Infrared (TIR) remote sensing has many Earth surface applications, such as agriculture development, water management and weather forecasting. Accurate derivation of the Earth surface temperature and emissivity from satellite and airborne TIR measurements requires accurate modeling of these remote sensing observations. Radiative transfer (RT) modeling in the atmosphere and its radiative coupling with the three dimension (3D) Earth surfaces (e.g., field crops, forests, etc.) are major difficulties for accurate simulation of remote sensing signals. Combining the RT in the 3D Earth-Atmosphere system, one of the most comprehensive RT models DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) is able to fulfill this requirement. Past works showed that DART simulated atmosphere reflectance in the short waves has an accuracy of ± 0.004 compared to MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) [1]. However, in the long waves, DART was less accurate because it neglected the vertical variation of gas absorption cross-section and it simulated the atmosphere as the superposition of layers with uniform temperature and extinction coefficients. We improved DART accuracy in the TIR domain with 2 approaches. (1) Introduction into atmosphere RT modeling of the vertical profiles of equivalent absorption cross-section of 5 most absorbing gases (H₂O, CO₂, O₃, CH₄, N₂O) in the TIR domain. These profiles are derived from MODTRAN simulations. The term “equivalent” refers to the fact that the use of Beer’s law in DART gives the same results as MODTRAN. (2) Computation of the “layer per layer” thermal emission using continuous profiles (temperature,...). This new atmosphere TIR RT modeling greatly improves the accuracy of DART TIR radiance compared to MODTRAN. In the [3.5 μ m, 20 μ m] domain, including the atmosphere absorption bands, it decreases the radiance relative difference from 12.6% to 3.2% at TOA level, and from 5.5% to 2.4% at BOA level. With this improvement, DART fulfills the brightness temperature (TB) accuracy requirements (Tab 1) of TIR bands of satellite missions such as Trishna [2], Landsat8 [3] and Sentinel3 [4] :

([1] Grau E. and Gastellu-Etchegorry J.P. 2013. *Remote Sensing Env.*, 139: 149-170. [2] Lagouarde J.P. et al. 2018. *IGARSS*. [3] Irons J. R. et al. 2012. *Remote Sensing Env.* 122: 11-21. [4] Donlon C. et al. 2012. *Remote Sensing Env.* 120: 37-57)

Tab 1. Initial and improved DART TOA BT RMSE for TIR bands of Trishna, Landsat 8, and Sentinel 3 missions.

Satellite	Launch date	Organization	Center wavelength	Bandwidth	Sensitivity (NeT)	T _B RMSE (initial)	T _B RMSE (improved)
Trishna	2024-2025 foreseen	CNES+ESRO	8.6 μ m	0.35 μ m	0.3 K@300 K	1.5 K	0.26 K
			9.1 μ m	0.35 μ m	0.3 K@300 K	2.5 K	0.18 K
			10.3 μ m	1.0 μ m	0.3 K@300 K	2.7 K	0.42 K
			11.5 μ m	1.0 μ m	0.3 K@300 K	1.7 K	0.17 K
Landsat8	2013	NASA	10.9 μ m	0.6 μ m	0.4 K@300 K	2.2 K	0.09 K
			12.0 μ m	1.0 μ m	0.4 K@300 K	2.0 K	0.19 K
Sentinel3	2016	ESA	8.8 μ m	0.6 μ m	0.25 K@293 K	1.5 K	0.29 K
			10.8 μ m	0.6 μ m	0.25 K@293 K	2.3 K	0.10 K
			12.0 μ m	0.6 μ m	0.25 K@293 K	1.9 K	0.22 K

Séparation de spectres de galaxies fondée sur la fusion de données

Andréa Guerrero, Shahram Hosseini, Yannick Deville, Thierry Contini, Tristan Grégoire
Université de Toulouse, UPS, CNRS, CNES, IRAP (Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie)

14 av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

{andrea.guerrero, shahram.hosseini, yannick.deville, thierry.contini, tristan.gregoire}@irap.omp.eu

Avec l'avancée technologique et la construction d'instruments satellitaires de plus en plus performants, les images hyperspectrales sont assez répandues de nos jours dans le domaine de l'astrophysique. Ici, nos travaux ont été développés dans le contexte de la mission EUCLID de l'Agence Spatiale Européenne, dont le lancement est prévu en 2022. Cette mission a pour but de comprendre ce qu'est l'énergie noire et son rôle dans l'accélération de l'expansion de l'univers. Pour cela, le satellite EUCLID va cartographier plus de 50 millions de galaxies, afin d'analyser leurs spectres à travers la détection de raies d'émission et la mesure de leurs redshifts (décalages vers le rouge). Le satellite sera équipé d'un spectro-photomètre proche infrarouge appelé NISP, utilisant des grismes (des prismes combinés à des réseaux de diffraction) responsables de la dispersion de la lumière en plusieurs ordres de spectres comme sur la figure 1. Ces grismes seront conçus de façon à concentrer le maximum d'énergie dans le spectre d'ordre 1. L'ordre 0 et l'ordre 2 resteront non négligeables pour les objets les plus brillants. L'ordre 0 n'étant quasiment pas dispersé comme on peut le voir sur la figure 2, il contient peu d'information spectrale et ne sera donc pas traité. Cependant, l'ordre 2 a une meilleure résolution spectrale que l'ordre 1, la fusion des informations des ordres 1 et 2 devrait alors donner une meilleure estimation du spectre de l'objet considéré.

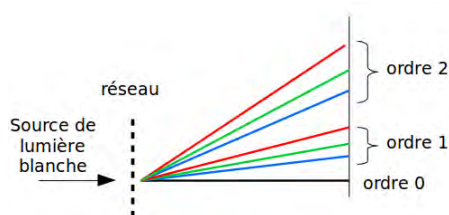


Figure 1 – Ordres de spectre créés par le réseau



Figure 2 – Spectres mélangés de 2 objets proches spatialement, observés à la sortie d'un grisme

Généralement, la spectroscopie utilise une fente pour diffracter la lumière d'une petite partie du ciel. Cependant, EUCLID utilisant la spectroscopie sans fente, les différents ordres de spectres des objets astronomiques voisins spatialement peuvent se mélanger comme sur la figure 2. On constate alors la nécessité de développer une méthode efficace de séparation de sources pour pouvoir analyser chaque spectre de galaxie observé. Dans ces travaux, nous proposons d'exploiter les propriétés optiques du grisme permettant d'établir un lien entre les spectres d'ordre 1 et d'ordre 2. Notre méthode repose sur un critère de séparation basé sur cette fusion de données, que l'on optimise en utilisant un algorithme de descente en gradient. La simulation des observations et l'estimation des matrices de mélange sont effectuées à partir du simulateur TIPS [1] développé par le consortium EUCLID modélisant l'instrument, et à partir des positions des objets supposées connues. Afin de tester l'efficacité de notre méthode, des tests ont été réalisés sur des données bruitées simulées avec TIPS. Nous avons montré que notre méthode tenant compte des informations de l'ordre 1, de l'ordre 2 et du lien entre ces deux ordres, permet d'obtenir de meilleures estimations des spectres d'ordre 2 des objets observés, par rapport à un critère tenant compte seulement des informations de l'ordre 2. Les tests montrent que plus le rapport signal sur bruit (RSB) des spectres d'ordre 2 est faible, plus notre méthode a d'intérêt : si le RSB est inférieur à 20 dB, l'ordre 2 (bien plus bruité que l'ordre 1) est difficilement exploitable. C'est la relation établie entre les deux ordres qui permet alors d'obtenir une estimation correcte du spectre.

Références : [1] TIPS simulator. <http://projects.lam.fr/projects/tips/wiki>.

Démélange parcimonieux et prise en compte de contraintes structurantes par optimisation globale

Ramzi Ben Mhenni^{1*}, Sébastien Bourguignon¹, Jordan Ninin² et Frédéric Schmidt³

^{1*} LS2N, École Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3, Ramzi.Benmhenni@ls2n.fr

² ENSTA-Bretagne, Lab-STICC, 2 rue François Verny, F-29806 Brest cedex 9

³ Université Paris-Sud, GEOPS, 1 rue du Belvédère, F-91405 Orsay, France

Nous nous intéressons au problème de démélange spectral, où l'on cherche à estimer les abondances correspondant à la décomposition d'un spectre observé en un mélange linéaire de spectres « purs », choisis dans un dictionnaire arbitrairement grand. Si l'utilisation d'un dictionnaire comprenant un grand nombre de spectres permet d'affiner le modèle (pour prendre en compte, par exemple, la variabilité des spectres de référence), elle rend le problème d'estimation particulièrement difficile, ces spectres étant très corrélés entre eux. L'apport de contraintes supplémentaires dans la procédure d'estimation est alors un levier permettant d'améliorer la qualité des mélanges estimés. Nous nous intéressons ici à des reformulations mathématiques du problème de démélange sous la forme de programmes mixtes en nombres entiers (MIP, mixed integer programs [1]), où une variable binaire encode la présence ou l'absence de chaque élément du dictionnaire dans le mélange. Cette formulation permet de modéliser **de manière exacte** une grande variété de problèmes de démélange intégrant différents types de contraintes, parmi lesquelles :

- **la parcimonie** : un faible nombre d'abondances non-nulles est recherchée dans le mélange [2]. Là où les méthodes parcimonieuses classiques s'avèrent très limitées, la reformulation MIP permet d'aborder le problème en « norme l_0 » sous sa forme exacte ;
- **la structuration du dictionnaire** en imposant, par exemple, un nombre maximal de composantes actives parmi des sous-groupes de spectres constituant le dictionnaire, ou à l'inverse, un nombre maximal de sous-groupes dans lesquels doit s'exprimer le mélange. De telles contraintes (*social sparsity*) sont habituellement traitées par des approches relâchées à base de normes mixtes [3] ;
- **l'imposition de valeurs minimales** aux abondances des composantes actives. Cette contrainte, qui semble pertinente pour modéliser la recherche de composantes significatives, n'est en général pas abordée directement, mais par le seuillage *a posteriori* des abondances estimées par ailleurs.

La résolution de problèmes d'optimisation impliquant à la fois des variables continues (les abondances recherchées) et des variables binaires (indicatrices des composantes actives dans le mélange) a fait l'objet de nombreux développements algorithmiques, permettant leur résolution exacte pour des problèmes de taille modérée, ce qui est souvent le cas des problèmes de démélange. Nous montrons en particulier que l'optimisation globale de problèmes de démélange parcimonieux en norme l_0 , intégrant d'éventuelles contraintes de structuration, est possible en un temps raisonnable lorsque le nombre de composantes actives reste faible – typiquement, inférieur à la dizaine pour un dictionnaire composé d'environ 500 *endmembers*. La reformulation MIP offre ainsi un cadre de modélisation très flexible pour prendre en compte des contraintes habituellement écartées ou, au mieux, relâchées sous la forme de contraintes plus simples.

[1] S. Bourguignon, J. Ninin, H. Carfantan, and M. Mongeau, "Exact sparse approximation problems via mixed-integer programming : Formulations and computational performance," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 6, Mars 2016.

[2] M.D. Iordache, J.M. Bioucas-Dias, and A. Plaza, "Sparse unmixing of hyperspectral data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 6, Juin 2011.

[3] L. Drumetz, T. R. Meyer, J. Chanussot, A. L. Bertozzi and C. Jutten, "Hyperspectral Image Unmixing With Endmember Bundles and Group Sparsity Inducing Mixed Norms," in *IEEE Transactions on Image Processing*, à paraître, 2019.

Fusion de données hyperspectrales et panchromatique par démélange spectral dans le domaine réflectif

Yohann CONSTANS^{1,2,*}, Sophie FABRE¹, Vincent CROMBEZ³, Michael SEYMOUR³, Jocelyn CHANUSSOT⁴,
Yannick DEVILLE², Xavier BRIOTTET¹

* yohann.constans@onera.fr

¹ Université de Toulouse, ONERA, DOTA, 31055, Toulouse, France,

² Université de Toulouse, UPS-CNRS-OMP-CNES, IRAP, 31400 Toulouse, France

³ AIRBUS Defence and Space, 31400, Toulouse, France

⁴ Grenoble INP, GIPSA-LAB, 38400, Grenoble, France

L'observation de la Terre à l'échelle locale, comme les milieux urbains, nécessite de disposer à la fois de résolutions spatiales (informations géométriques de la scène observée) et spectrales (informations sur son état et sa composition) élevées. Cependant, les capteurs ne peuvent offrir *simultanément* de telles résolutions. Une solution consiste à utiliser des images acquises à la fois par une caméra large bande (panchromatique), donnant accès à la haute résolution spatiale, et par une caméra hyperspectrale, donnant accès à une haute résolution spectrale. La fusion des images hyperspectrale (HS) et panchromatique (PAN), appelée aussi pan-sharpening, permet ainsi d'exploiter la complémentarité de ces deux types d'images au niveau du pixel, afin de générer une image hyperspectrale à haute résolution spatiale. Toutefois, les méthodes de pan-sharpening actuelles présentent plusieurs limites [1] : préservation d'une information (spatiale ou spectrale) au détriment de l'autre, rapports de résolutions spatiales des images HS et PAN souvent limités à 4, données HS et PAN couvrant le même domaine visible-NIR (0,4-1,0 μm), ou encore erreurs en présence de paysages à forte variabilité spatiale (pixels mixtes). En outre, les erreurs de registration et d'éclairement non uniforme (ombre) ne sont pas prises en compte dans la littérature. La méthode SOSU (Spatial Organisation Spectral Unmixing) a été développée dans le cadre d'une thèse visant à valider une méthode de fusion HS/PAN dans le domaine réflectif (0,4-2,5 μm), avec démélange des pixels mixtes et prise en compte des ombres [2]. Elle est composée d'une étape de démélange spectral, suivie de l'application d'un gain (calculé à partir de l'image PAN) à toutes les bandes spectrales HS. Elle a montré des améliorations par rapport aux autres méthodes de la littérature mais nécessite toutefois des évolutions pour des milieux plus complexes (notamment en présence d'ombre dans les milieux urbains [3]). L'objectif de cette présentation est d'exposer les résultats obtenus avec la méthode SOSU sur des images simulées à partir d'une image hyperspectrale aéroportée dans le domaine réflectif. La résolution spatiale de la nouvelle image hyperspectrale simulée est de 6 m, tandis que celle de l'image PAN est de 1,5 m, soit un rapport de résolutions de 4. Les images fusionnées avec la méthode SOSU sont ensuite comparées à celles obtenues avec d'autres méthodes de la littérature, à l'aide de critères de qualité spectraux, spatiaux et globaux. Ceux-ci sont calculés sur l'image entière ou bien sur chaque pixel, afin d'établir des cartes d'erreur, et ainsi de quantifier le pourcentage de pixels améliorés avec la méthode SOSU. Les résultats, obtenus pour différents domaines spectraux (VNIR, SWIR, complet) et spatiaux (pixels éclairés, à l'ombre, image complète), ainsi qu'un bilan d'erreurs de la méthode, seront présentés.

Références :

- [1] L. Loncan *et al.*, "Hyperspectral Pan-sharpening: A Review," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 27-46, Sept. 2015.
- [2] L. Loncan, *Fusion of hyperspectral and panchromatic images with very high spatial resolution*, Diss., Université Grenoble Alpes, 2016.
- [3] C. Chisense, J. Engels, M. Hahn, *et al.*, "Pan-sharpening of hyperspectral images in urban areas," in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 39-B7, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, pp. 387-392, Aug. 2012.

POSTERS

TERRISCOPE : Une nouvelle plateforme de télédétection optique aéroportée à partir d'avions et de drones pour la caractérisation de l'environnement et des surfaces continentales

Y. Boucher¹, A. Amiez², P. Barillot³, C. Chatelard³, C. Coudrain⁴, P. Déliot¹, N. Rivière¹, T. Rivière¹, L. Roupioz¹

¹ ONERA / DOTA, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, France,
*Yannick.Boucher@onera.fr

² ONERA / DTIS, Université de Toulouse, F-31055 Toulouse, France

³ ONERA / DOTA, F-13661 Salon cedex Air – France

⁴ DOTA, ONERA, Université Paris - Saclay, F-91123 Palaiseau, France

L'ONERA vient de terminer le développement de TERRISCOPE, une plateforme de télédétection optique aéroportée pour la caractérisation de l'environnement et des surfaces continentales à partir d'avions et de drones. L'objectif de cette plate-forme est de mettre à disposition de la communauté scientifique des données de qualité maîtrisée acquises avec différents capteurs optiques de haute performance lors de campagnes aéroportées coopératives. Il s'agit également de promouvoir le développement de services à partir de mesures par drones, grâce à des campagnes et des études de « preuve de concept ». Le développement de TERRISCOPE a pu être effectué grâce au soutien financier de l'Union européenne (Fonds Européen de Développement Régional), de la Région Occitanie et de l'ONERA, et des sociétés SOFRADIR, BOREAL, M3 Systems et Leosphere qui ont investi en nature dans le projet. Ce poster présente l'ensemble de l'instrumentation, et les premiers résultats acquis lors de campagnes de mesures avion et drone.

Les avions pilotés (qui ne font pas partie de TERRISCOPE), sont soit fournis par les partenaires de l'ONERA, comme l'ATR 42 et le Piper-Aztec de SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche sur l'Environnement, Unité Mixte de Service du CNRS, de Météo-France et du CNES) soit par l'ONERA lui-même avec le moto-planneur Stemme S10-VT. Différents drones ont été acquis dans le cadre du projet TERRISCOPE : Un DEIMOS-ElecNOR K75, avion autonome de maximum 80 kg, d'une capacité de charge utile de 35 kg et d'une autonomie de 300 km, et quatre drones à voilure fixe BOREAL, de masse maximale 25 kg, d'une capacité de charge utile de 7 kg à 10kg et d'une autonomie maximale de 800 km.

Plusieurs types de capteurs ont été acquis : Des caméras hyperspectrales de 0,4-2,5 μm , des caméras multispectrales visibles, des caméras infrarouges thermiques et des Lidar 3D topographiques. Chaque type de capteur, au meilleur niveau de l'état de l'art, est décliné en deux versions : une pour les avions pilotés, l'autre pour les drones. La caméra hyperspectrale pour avion est une caméra de type push-broom AISA Fenix 1k de SPECIM, d'une fauchée de plus de 1000 pixels. Cette caméra a été intégrée sur l'ATR 42 de SAFIRE conjointement avec la caméra IR et le Lidar 3D, et une campagne de mesures aéroportées a été réalisée sur différents sites de la région Occitanie. Des premiers résultats sont présentés. A terme, il s'agira de combiner les différents types de données pour améliorer les performances de détection ou caractérisation des surfaces d'intérêt. La caméra hyperspectrale pour drone est une caméra de type push-broom Hypspec Mjolnir FR de Norsk Elektro Optikk, d'une fauchée de 1240 pixels dans le VNIR et 620 dans le SWIR. Livrée début mars 2019, la caméra devait être intégrée dans le drone BOREAL, et des vols de validation réalisés.

Des systèmes d'étalonnage radiométrique et spectral pour les caméras ont également été acquis. La chaîne de traitement de données combine différents modules pour les corrections radiométriques et géométriques, le géoréférencement et le stockage des données provenant de différents capteurs de la même plateforme. Elle permet de réaliser le recalage des images hyperspectrales avec les images d'autres types, ainsi qu'avec les nuages de points Lidar.

Detection of vine diseases in multispectral (UaVs and satellite) and hyperspectral (airborned) images : Preliminary results using a non-linear unmixing tool (SAGA+)

Harold CLENET^{1*}, Sina NAKHOSTIN², Eve LAROCHE-PINEL^{1,3}, Véronique CHERET¹, Sylvie DUTHOIT³

¹Ecole d'Ingénieurs de PURPAN, UMR 1201 DYNAFOR, INRA-Toulouse INP, 75 voie du TOEC, 31076 Toulouse, France, harold.clenet@purpan.fr

²Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre - EOST, 67084 Strasbourg, France

³TerraNIS, 12 Avenue de l'Europe, 31520 Ramonville Saint-Agne, France

Vine diseases have a strong impact on vineyards sustainability, which in turns leads to strong economic consequences. Among those diseases, *Flavescence dorée* spreads quickly and is incurable, which led in France to the setup of a mandatory pest control implying the systematic use of pesticides and the prospection and uprooting of every infected plant. Remote sensing could be a very powerful tool to optimize prospection as it allows to produce quickly accurate maps over large areas. Recent studies have shown that high spatial resolution (10cm/pixel) multispectral images acquired from UAVs allow to map *Flavescence dorée* in vineyards using leaves discolorations [e.g. 1]. Nevertheless, confusion and misdetections still exist, especially with other diseases showing similar leaves discolorations and with mixtures of different materials occurring within one pixel. Mixture effects are also crucial when dealing with satellite images where spatial resolution is much lower ($\geq 10\text{m/pixel}$). This study aims at improving the detection of vine diseases in UAVs, airborne and satellite images using an innovative tool that identifies the spectral signatures of every elementary materials (e.g. healthy and sick leaves) and their relative contribution at a subpixel level.

We use three distinct datasets acquired in 2016 over the same vineyard located in the Southwest of France (AOC Gaillac): a multispectral image acquired with MicaSense sensor onboard an UAV (5 bands, 10cm/pixel), a Sentinel-2 multispectral image (12 bands, 10m/pixel) and an airborne hyperspectral image (256 bands, 1m/pixel). Ground truth for validation is available through exhaustive centimetric locations of every sick vines for several plots in the studied area. On the methodological perspective, we use an innovative method that performs an unsupervised unmixing jointly with anomaly-detection capacities and has a global linear complexity [2]. Nonlinearities are handled by decomposing the data on an overcomplete set of spectra, combined with a specific sparse projection, which guarantees the interpretability of the analysis.

This paper reports preliminary results obtained with the unmixing algorithm ran over one selected plot available in the dataset. Initial results show the algorithm can detect and separate multiple sources within the plot. Analysis of retrieved endmembers shows a good correlation with the components that can be found in the field, especially with the evidence of healthy and sick leaves' signatures. Nevertheless, initial mapping still shows some discrepancies with ground truth and further work needs to be done to fine tune the model parameters.

1. Albetis, J.; Jacquin, A.; Goulard, M.; Poilvé, H.; Rousseau, J.; Clenet, H.; Dedieu, G.; Duthoit, S. On the Potentiality of UAV Multispectral Imagery to Detect Flavescence dorée and Grapevine Trunk Diseases. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 23, doi:10.3390/rs11010023.
2. Nakhostin, S.; Clenet, H.; Corpetti, T.; Courty, N. Joint Anomaly Detection and Spectral Unmixing for Planetary Hyperspectral Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2016**, *54*, 6879–6894, doi:10.1109/TGRS.2016.2586188.

Cartographie des fonds marins à partir d'images hyperspectrales aériennes par correction de l'atténuation du signal du fond par la colonne d'eau

A.Minghelli¹, M.Guillaume², Malik Chami³, Bruno Lafrance⁴, Xavier Briottet⁵, Sylvain Jay², Yannick Deville⁶,
Véronique Serfaty⁷, Marion Peirache⁸

¹UNIVERSITE DE TOULON, CNRS, SeaTech, LIS laboratory, UMR 7296, 83041 Toulon, France
minghelli@univ-tln.fr

²AIX MARSEILLE UNIV, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

³SORBONNE UNIVERSITES, UPMC Univ Paris 06, INSU-CNRS, LATMOS, 06230 Villefranche sur Mer, France

⁴CS SYSTEMES D'INFORMATION, 31506 Toulouse Cedex 05, France

⁵ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 31055 Toulouse Cedex 4, France

⁶UNIVERSITE DE TOULOUSE, UPS-CNRS-OMP-CNES, IRAP, 31400 Toulouse, France

⁷DGA/MRIS, 75509 Paris Cedex 15, France

⁸Parc National de Port-Cros, 83406 Hyères Cedex, France

La cartographie des fonds marins est une des applications possibles de l'imagerie hyperspectrale, mais la difficulté dans ce domaine est l'influence de la colonne d'eau qui atténue la luminance provenant du fond et empêche de réaliser des classifications automatiques. Pour résoudre ce problème, une des approches possibles consiste à supprimer l'influence de l'atténuation de la colonne d'eau en estimant le coefficient d'atténuation de l'eau et la bathymétrie. Dans cette étude, différentes classifications sont appliquées après correction de l'atténuation de l'eau ainsi qu'une méthode linéaire de décomposition de pixels mixtes pour connaître la proportion de chaque type de fond à l'intérieur des pixels. Les données utilisées sont les images hyperspectrales HYPSEX qui ont été acquises en 2017 sur l'île de Porquerolles avec 50 cm de résolution. Des données de terrain ont également été acquises simultanément (concentration en chlorophylle, matières en suspension, matières organiques dissoutes). Les données Litto 3D nous permettent de valider l'estimation bathymétrique et une vérité terrain acquise par un robot sous-marin nous permet de valider la cartographie des fonds. Les résultats de validation montrent une bonne détection des différents types de fond jusqu'à 12 m de profondeur et une bonne estimation des surfaces de Posidonie, de sable et de Caulerpa taxifolia.

Remerciement à la DGA pour le financement ASTRID du projet HYPFOM.

Integrating water column effects and bottom neighbor influence for a specific NMF seabed unmixing method

Mireille GUILLAUME¹, Yannick DEVILLE², Xavier LENOT³, Bruno LAFRANCE³, Malik CHAMI⁴, Sylvain JAY¹,
Audrey MINGHELLI⁵, Xavier BRIOTTET⁶, Véronique SERFATY⁷

¹ AIX MARSEILLE UNIV, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

² UNIVERSITE DE TOULOUSE, UPS-CNRS-OMP-CNES, IRAP, 31400 Toulouse, France

³ CS SYSTEMES D'INFORMATION, 31506 Toulouse Cedex 05, France

⁴ SORBONNE UNIVERSITES, UPMC Univ Paris 06, INSU-CNRS, LATMOS, 06230 Villefranche sur Mer, France

⁵ UNIVERSITE DE TOULON, CNRS, SeaTech, LIS laboratory, UMR 7296, 83041 Toulon, France

⁶ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 31055 Toulouse Cedex 4, France

⁷ DGA/MRIS, 75509 Paris Cedex 15, France

Sea bed analysis is a great challenge for environmental and societal applications, as well as for defense or economic issues. Hyperspectral data have shown to be able to give intra pixel knowledge through unmixing techniques, however the low signal to noise ratio obtained with water surface observation requires advanced methods to capture the information from the sea bottom. We propose to integrate an advanced water column radiative model into the unmixing scheme developed for sea bed analysis. Actually photon scattering that occurs into the water column is the origin of adjacency optical effects in the subsurface upward radiance in shallow water. We make use of the radiative transfer equation with adjacency effects, and introduce linear unmixing for each bottom pixel, to obtain a specific mixing model, that is used to solve the problem of bottom endmember and abundance estimation with a non-negative matrix factorization approach (NMF). This work is based on the assumption that the water column radiative terms are known, and in practice computed with the OSOAA software distributed by CNES, for a given water quality. The results of simulations show that in some situations such as clear water and medium depth range (5 m - 10 m), the proposed method indeed increases the underwater unmixing performance, compared to unmixing the seabed without integrating the adjacency model. The improvement depends on the depth, and can attain 50% for abundances at a depth of 10 m and clear water conditions. Results of the NMF 'adjacency unmixing' on the Porquerolles coastal zone acquisitions are presented and are compared to spectra coefficients estimation with fixed endmembers, pointing out that abundances maps obtained with NMF show better discrimination between benthic species than the coefficients maps obtained with least square estimation and fixed endmembers. Let precise that for the estimation those fixed endmembers are extracted from the available specific spectral library, which has been constructed with local benthic species reflectance spectra.

This work was funded by the French Defense Agency : **HypFoM** project, ANR / astrid 15-ASTR-0019.

Validation d'une méthode de correction des cirrus dans le domaine réfléchitif [0.4 – 2.5 μ m]

Sandra SALGADO^{1,2}, Sandrine MATHIEU³, Laurent POUTIER¹, Xavier BRIOTTET¹

^{1*} ONERA The French Aerospace Lab, 2 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex 4, France,
sandra.salgado@onera.fr

² Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, 41 Allées Jules Guesde - CS 61321, 31013 Toulouse Cedex 6, France

³ Thales Alenia Space, 5 Allée des Gabians, 06156 Cannes la Bocca Cedex – France

Dans le domaine réfléchitif [0.4 – 2.5 μ m], la télédétection par spectro-imagerie depuis l'espace permet d'accéder aux propriétés intrinsèques des surfaces, la réflectance, après correction des effets de l'atmosphère sur le signal mesuré. Cette correction atmosphérique est aujourd'hui très bien maîtrisée pour des scènes sans relief et sous hypothèse lambertienne, mais limitée aux conditions de ciel clair. Or les nuages recouvrent statistiquement environs les 2/3 de la couverture terrestre globale, modifiant les effets radiatifs sur la scène et rendant ainsi la correction plus complexe.

Un type de nuage se distingue des autres : les cirrus. Leur nature semi-transparente laissant entrevoir la surface sous-jacente nous permet d'en extraire le signal qui nous intéresse. Une méthode empirique de correction des effets radiatifs liés à leur présence a ainsi été proposée par Gao et al. [1] pour des cirrus fins ($p^*(1.38\mu\text{m}) < 0.04$) dans le domaine [0.4 – 1.0 μ m], où le cirrus est spectralement gris et ne présente que des effets de diffusion (pas d'absorption). Cette méthode repose sur la soustraction d'un biais systématique proportionnel à la réflectance apparente mesurée dans la bande cirrus (1.38 μ m) à l'aide d'un coefficient de corrélation K_a , dont l'estimation joue un rôle fondamental dans la précision de la correction. Plus récemment, Gao et al. [2] ont étendu cette méthode au domaine du SWIR. Bien que largement utilisée, cette méthode n'a pas fait l'objet d'une validation précise.

L'objectif de cette présentation est de valider ce modèle de correction à partir d'images acquises par le capteur multispectral Sentinel-2 en comparant des spectres des images corrigées de la présence de cirrus avec ceux d'images acquises en conditions de ciel clair sur les mêmes zones. Ces couples sont acquis dans un intervalle de temps suffisamment réduit afin de ne pas être affecté par les changements du paysage.

Les analyses effectuées sur des scènes d'eau montrent des résultats probants sur l'ensemble du spectre, pour des cirrus fins mais également épais, avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 0.015. En revanche, pour des scènes mixtes avec des surfaces très signées spectralement, les résultats sont dégradés dans le SWIR ainsi qu'entre 0.7 et 0.9 μ m, domaines où, pour une même surface, le comportement observé ne peut pas se réduire à un biais, et menant donc parfois à une sur-correction. Diverses simulations effectuées nous permettent d'expliquer ces écarts par le fait que Gao suppose un cirrus uniforme et homogène sur l'ensemble de la scène, alors qu'il peut n'être situé que sur le trajet soleil-sol ou sur le trajet sol-capteur, rendant le comportement du signal différent.

La compréhension de ce phénomène va nous permettre de proposer une amélioration du modèle de Gao.

[1] Gao B.C., Kaufman Y.J., Han W. and Wiscombe W.J., « Correction of thin cirrus path radiance in the 0.4-1.0 μ m spectral region using the sensitive 1.38 μ m cirrus detecting channel », Journal of Geophysical Research, Vol.103, No. D24, pp.32,169-32,176, 1998

[2] Gao B.C. and Li R.R., « Removal of thin cirrus scattering effects in Landsat 8 OLI images using the cirrus detecting channel », Remote Sensing, 9, 834, 2017

L'imagerie hyperspectrale au service de nouvelles applications

Josselin AVAL^{1*}, Ayman AL FALOU¹

^{1*} LABISEN, AIDE Lab., Yncréa Ouest, 20 Rue Cuirassé Bretagne, 29200 Brest, France

Dans les années 1990, l'imagerie hyperspectrale s'est développée au sein de la communauté « télédétection » [1]. L'année dernière (2018), plus de 750 articles contenant le « terme » hyperspectral ont été publiés au sein des journaux de cette communauté scientifique : *Remote Sensing Of Environment*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, etc (contre une vingtaine en 1994). Cela montre l'intérêt croissant que les chercheurs portent à cette technologie. Mais l'imagerie hyperspectrale trouve aussi sa place dans d'autres communautés, pour d'autres applications, par exemple dans le domaine du médical ou de l'inspection de produits alimentaires. Un grand nombre de méthodologies développées par la communauté « télédétection » sont à présent utilisées, voire améliorées par ces scientifiques. Même si les applications, donc les contextes, sont différentes, les verrous scientifiques peuvent avoir des similarités [2].

Depuis novembre dernier, notre laboratoire (LABISEN, Brest) s'est doté d'une caméra hyperspectrale Pika L (pushbroom, 0.4-1 μm , 281 bandes spectrales, 0.6 kg), dans le but de développer notre expertise en matière d'imagerie hyperspectrale. Dans un premier temps, nous avons décidé de créer une expérience hyperspectrale en laboratoire. En particulier, nous avons conçu un dispositif d'éclairage, de fixation de la caméra et de déplacement de l'échantillon (figure 1). Il a été important de considérer les prétraitements géométriques et radiométriques. Pour la géométrie, nous avons synchronisé de manière automatique la vitesse d'acquisition de la caméra et de la platine de déplacement de l'échantillon, grâce à des échantillons de référence. Concernant la radiométrie, nous sommes en train de développer une méthode pour corriger l'hétérogénéité de la mesure due au relief. Enfin, nous cherchons actuellement à transposer notre expertise en matière de caractérisation de la végétation par télédétection [3], à l'étude de fruits et légumes, pour développer notre expertise en matière d'interprétation et de compréhension du signal spectral (figure 2).

Les futures étapes de notre projet sont (1) *Finaliser le développement de l'expérience hyperspectrale en laboratoire*, (2) *Comparer les signatures spectrales de la végétation à celles de fruits et légumes*, (3) *Comparer une approche physique et une approche « Machine Learning » pour la quantification de la teneur en eau dans des fruits et légumes* (4), *Concevoir une plateforme à base de drone pour appliquer l'imagerie hyperspectrale au suivi zones agricoles et des milieux côtiers (rade de Brest)* (5).

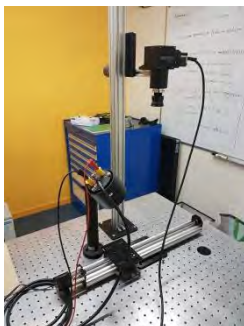


Figure 1 : Banc hyperspectral

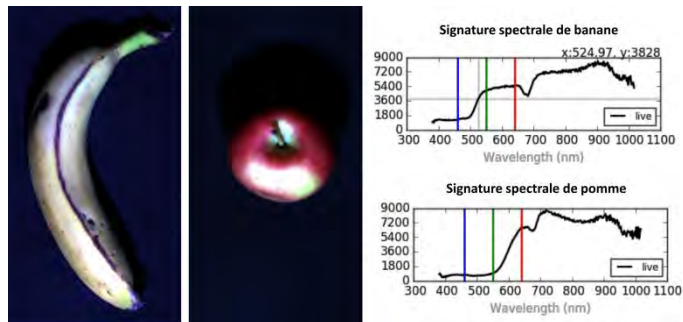


Figure 2 : Exemples de signatures spectrales

[1] Bioucas-Dias, José M., et al. "Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges." *IEEE Geoscience and remote sensing magazine* 1.2 (2013): 6-36.

[2] Pu, Yuan-Yuan, Yao-Ze Feng, and Da-Wen Sun. "Recent progress of hyperspectral imaging on quality and safety inspection of fruits and vegetables: a review." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 14.2 (2015): 176-188.

[3] Aval, Josselin, et al. "Object-based fusion for urban tree species classification from hyperspectral, panchromatic and nDSM data." *International Journal of Remote Sensing* (2019): 1-27.

Cofactorisation de matrices pour le démélange et la classification conjoints d'images hyperspectrales

Adrien LAGRANGE¹, Mathieu FAUVEL², Stéphane MAY³, José M. BIOUCAS-DIAS⁴, Nicolas DOBIGEON¹

¹IRIT/INP-ENSEEIH, 2 rue Camichel, 31000 Toulouse

²Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), 18 avenue Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse cedex 9

³Centre national d'études spatiales (CNES), 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse cedex 9

⁴Instituto de Telecomunicações, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal

prenom.nom@{enseeih, inra, cnes, enseeiht}.fr, bioucas@lx.it.pt

TABLE 1 – Résultats de classification et démélange (moyenné sur 20 essais).

Model	Kappa	F1-moy	RMSE	RE	Time (s)
RF	0.882	0.922	N\A	N\A	0.1
FCLS	N\A	N\A	0.0448	0.155	0.04
CBPDN	N\A	N\A	0.127	0.314	0.05
D-KSVD	0.259	0.352	N\A	0.392	278
Cofact.	0.905	0.934	0.0210	0.227	152

La classification supervisée et le démélange spectral sont parmi les techniques les plus utilisées pour extraire l'information d'images hyperspectrales. Bien que ces deux méthodes sont couramment utilisées, elles n'ont que très rarement été envisagées conjointement. Au lieu d'utiliser ces méthodes de manière séquentielle, comme on le voit les travaux déjà réalisés [1], nous proposons ici d'introduire le concept de démélange et classification conjoints.

Méthodes proposées – La méthode proposée est formulée comme un problème de cofactorisation qui sont des modèles ayant prouvés leur efficacité dans d'autres domaines comme la séparation de source audio. Le concept général est de formuler classification et démélange comme des problèmes de factorisation de matrices puis d'ajouter un terme de couplage. En s'inspirant de [2], le terme de couplage est construit comme un terme de partitionnement qui sépare les vecteurs d'abondances en plusieurs groupes puis les vecteurs d'attribution aux groupes sont utilisés comme vecteurs de descripteurs pour la classification.

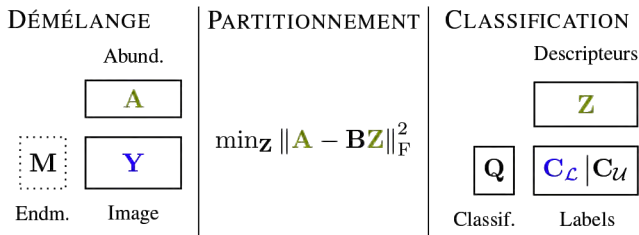


FIGURE 1 – Modèle de cofactorisation. Bleu : observations ou données annexes, vert : variables couplées, en pointillé : variable supposée connue.

Expérimentation – Une image hyperspectrale, présentée Figure 2, semi-synthétique est utilisée pour ces expérimentations. L'image a été générée en utilisant une image réelle qui a été démélangée de sorte à récupérer les cartes d'abondances qui ont été réutilisées pour recréer une image à partir de spectres réels connus. La vérité terrain associée à l'image d'origine a été réutilisée avec ces 4 classes. Les résultats de classification ont été comparés à ceux obtenus avec un algorithme de forêt aléatoire (RF) et ceux d'un K-SVD discriminatif, le premier étant reconnu pour son efficacité et le deuxième étant basé sur

une méthode de cofactorisation minimale. Les résultats du démélange sont comparés à deux algorithmes classiques que sont la méthode des moindres carrés entièrement contrainte (FCLS) et un débruitage de type *basis pursuit* (CBPDN).



FIGURE 2 – Image semi-synthétique : composition colorée de la HS Y (gauche), vérité terrain de la classification (droite).

Résultats – Pour réaliser l'évaluation quantitative présentée dans le tableau 1, la classification a été évaluée avec deux métriques conventionnelles que sont le kappa de Cohen et le score F1 moyen. Les résultats du démélange sont évalués en utilisant l'erreur de reconstruction (RE) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats montrent que le modèle de cofactorisation proposé est plus performant autant en terme de classification que de démélange même s'il est plus lent que les autres qui ne réalisent cependant qu'une seule des deux tâches. Il est aussi important de noter que la cofactorisation génère de très intéressants produits annexes aidant à l'interprétation des résultats. Par exemple, il est possible de visualiser les centroïdes des partitions, comme montré figure 3, qui permettent de visualiser la multi-modalité de certaines classes.

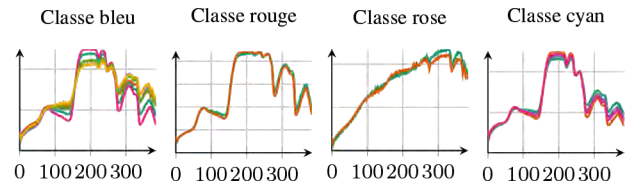


FIGURE 3 – Centroïdes spectraux des différents clusters pour chaque classe.

- [1] A. Villa, J. Chanussot, J. A. Benediktsson, and C. Jutten, "Spectral unmixing for the classification of hyperspectral images at a finer spatial resolution," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 5, no. 3, pp. 521–533, 2011.
- [2] A. Lagrange, M. Fauvel, S. May, and N. Dobigeon, "Hierarchical Bayesian image analysis : From low-level modeling to robust supervised learning," *Pattern Recognit.*, vol. 85, pp. 26–36, 2019.

Utilisation de données optiques pour l'exploration pétrolière basée sur les effets indirects sur la végétation

Sophie FABRE¹, Philippe DELIOT¹, Anne BEAUPERE¹, Anthony CREDOZ², Dominique DUBUCQ²

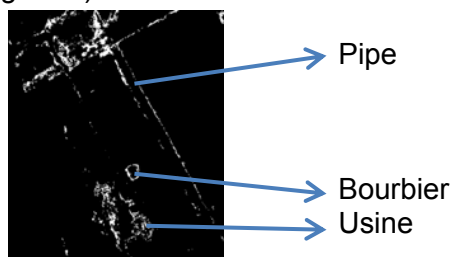
¹ ONERA "The French Aerospace Lab, 2 Av. Edouard Belin, 31000 Toulouse, France,
sophie.fabre@onera.fr

² TOTAL, avenue Larribau, 64000 Pau, France

L'état de la végétation est essentiel non seulement pour le suivi des changements environnementaux, mais également pour une multitude d'applications, notamment celles concernant la détection indirecte des polluants ou le suivi de la réhabilitation d'une zone anciennement polluée (décharge, mine...). L'intérêt d'utiliser la télédétection optique du domaine [0.4-2.5 μm] pour surveiller et quantifier les changements dans la végétation sur de grandes surfaces avec une répétitivité importante est aujourd'hui largement reconnu [1][2]. La photosynthèse est la fonction physiologique la plus impactée par l'exposition directe à des contaminants dans le sol et par les effets indirects de cette contamination (effets sur le sol), responsables de la réduction en pigments photosynthétiques dans le domaine visible (V – Visible domain) [3][4]. Le déficit en eau des feuilles engendre des effets sur leur anatomie et peut provoquer la destruction des tissus détectables dans le domaine du proche infrarouge (NIR – Near InfraRed domain). Les effets induits par les polluants sur la nutrition hydrique de la plante, pouvant engendrer des répercussions sur les contenus en lignines et en cellulose, ont un impact sur les propriétés optiques dans le domaine SWIR (SWIR - Short Wave InfraRed domain). L'information spectrale sur la végétation dans le domaine spectral [0.4-2.5 μm] peut ainsi aider efficacement à l'étude des contaminants présents dans les milieux de croissance de la végétation.

L'objectif de cette étude, réalisée en collaboration Onera-Total, est la détection de la végétation stressée autour des bourbiers en zone tropicale à partir de données hyperspectrales aéroportées à très haute résolution spatiale (0.65 m). L'impact de la dégradation des résolutions spatiales et spectrales pour se placer dans une configuration proche de celle de l'instrument satellitaire multispectral WV-3 est abordé. Les résultats obtenus sont validés à partir de l'identification sur le terrain de zones de végétation stressée et de la position des bourbiers. La méthodologie est basée sur l'exploitation d'une base de données d'indices de végétation couvrant le domaine réflectif VNIR-SWIR composée d'indices spectraux développés pour la caractérisation de la fraction de couvert, du contenu en pigments, du contenu en lignine, du stress hydrique... et d'indices spécifiés pour la détection du en présence de polluants dans le sol (gaz, hydrocarbure, métaux). Les résultats obtenus montrent que la végétation stressée est détectée dans différentes zones, notamment le long d'une conduite (un *pipe*), autour du bourbier et à proximité d'une usine (Figure 1).

Figure 1 - Carte de végétation stressée (en blanc : végétation stressée)



[1] Noomen, M. F.; van der Werff, H. M. A.; van der Meer, F. D. Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. *Ecol. Inform.* 2012, 8, 55–64.

[2] Arellano, P.; Tansey, K.; Balzter, H.; Boyd, D. S. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environ. Pollut.* 2015, 205, 225–239.

[3] G. Lassalle, A. Credoza, R. Hédacq, S. Fabre, D. Dubucq, A. Elger, "Assessing soil contamination from oil and gas production using vegetation hyperspectral reflectance", *Env. Science & Technology*, 2018 Feb 20;52(4):1756-1764.

[4] Lassalle, G., Fabre, S., Credoza, A., Hédacq, and al. (2018) Detection and discrimination of various oil-contaminated soils using vegetation reflectance. *Sci. Tot. Environ.*

Cartographie de minéralisations hydrothermales par imagerie hyperspectrale aéroportée : cas d'étude du bassin de Tabernas (Almeria, SE Espagne)

Etienne Ducasse¹, Karine Adeline², Véronique Mieggebielle¹, Marine Larrey³

¹ TOTAL S.A., Centre Scientifique et Technique Jean-Féger, 64000 Pau, France

² ONERA, The French Aerospace Lab, 2 av. Edouard Belin, Université de Toulouse, France

³ GET-OMP, Université de Toulouse, France

Le projet de recherche NAOMI (New Advanced Observation Methods Integration) a pour objectif de créer des technologies innovantes en télédétection pour l'exploration pétrolière onshore et offshore. Dans le cadre de l'exploration onshore, la cartographie lithologique et minéralogique sont des enjeux importants pour (i) la compréhension des circulations de fluides à la faveur d'accidents (ex. failles), de roches poreuses et perméables, et pour (ii) la recherche d'indices de présence d'hydrocarbures associés à ces minéralisations (gaz, seeps...) et la qualité réservoir des roches. Le bassin de Tabernas (SE Espagne) a été choisi comme cas d'étude car il présente une diversité lithologique (roches sédimentaires, majoritairement clastiques & des roches métamorphiques) et des minéralisations carbonatées (travertins) et siliceuses (quartzites) d'échelle locale, marqueurs de paléo-circulations de fluides.

De nombreuses méthodes utilisant l'imagerie hyperspectrale sont employées pour la détection et la classification de minéraux [1,2]. Dans le bassin de Tabernas, les minéralisations ont une extension spatiale inframétriques jusqu'à la dizaine de mètres, ce qui nous a conduit à utiliser des méthodes de démixage pour caractériser ces objets. L'objectif de cette étude est d'évaluer et comparer les performances des méthodes spectrales locales telles que le Continuum Removal Band-Depth (CR-BD) et Band Ratios (BR) par rapport aux méthodes d'analyse non-locales, comme le Spectral Angle Mapper (SAM) et le Spectral Information Divergence (SID), avec celles obtenues par les méthodes de démixage telles que le Matched Filtering (MF) et l'Iterative Spectral Mixture Analysis (ISMA) pour caractériser les minéralisations particulières au sein de formations géologiques.

Cette étude s'appuie sur plusieurs campagnes de mesure réalisées sur une zone du bassin de Tabernas, avec des images hyperspectrales Hypspx aéroportées de 1m de résolution spatiale dans le VNIR (0,4 – 1 µm) et 2m dans le SWIR (1 – 2,5 µm) en juin 2017. Les méthodes supervisées (SAM, SID, MF, ISMA) sont utilisées avec (i) des spectres de minéraux issus de la bibliothèque spectrale USGS ou (ii) issus de l'image hyperspectrale à l'aide de la détection semi-automatique des minéraux purs avec le Purity Pixel Index (PPI). Les cartes minéralogiques sont validées par des points de contrôle terrain: (i) des mesures spectrales acquises avec un spectroradiomètre portable et (ii) la caractérisation minéralogique (DRX) et pétrographique (étude de lames minces) d'échantillons. Les résultats cartographiques sont comparés aux cartes géologiques/minéralogiques établies par photo-interprétation à partir d'images satellites très haute résolution WorldView-2 (50 cm de résolution) et aux cartes géologiques régionales (échelle 1:50 000).

Les résultats préliminaires montrent que ces méthodes permettent de détecter et de caractériser les minéralisations de quartzite et de travertin sur un ensemble de roches métamorphiques. Les résultats sont toutefois affectés par plusieurs facteurs : l'état de surface en lien avec l'altération météoritique, la présence de dépôts salins, la présence de végétation rase ou de lichens, et la résolution spatiale du capteur, versus la taille des minéralisations que l'on cherche à caractériser.

[1] Asadzadeh et al., A review on spectral processing methods for geological remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47:69–90, 2016.

[2] F. van der Meer et al., Multi- and hyperspectral geologic remote sensing : A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1):112–128, 2012.

Fusion of LiDAR and hyperspectral data for 3D segmentation of individual trees

Eduardo Tusa^{1,2*}, Jean-Baptiste BARRÉ¹, Jean-Matthieu MONNET¹, Mauro DALLA-MURA², Frédéric BERGER¹,
Jocelyn CHANUSSOT²

^{1*} UNIV. GRENOBLE ALPES, IRSTEA, LESSEM, 2 Rue de la Papeterie-BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères,
France, eduardo.tusa-jumbo@irstea.fr

² UNIV. GRENOBLE ALPES, CNRS, GRENOBLE INP*, 38000 Grenoble, France

* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

The availability of remotely-sensed data with high spatial and spectral resolution are becoming more widespread in forestry management, having important contributions in the development of new applications for monitoring these ecosystems. In particular, it is possible to consider studies of an entire stand by elaborating findings at tree level. However, this raises the question about the data fusion from different sensors such as LiDAR and Hyperspectral images (HI). This study presents a fusion methodology between high-density LiDAR data - (45 pts/m² minimum) and VNIR HI - (0.80 m spatial resolution) acquired on French Alpine temperate forests along an altitude gradient. The aim is to extract the main geometric characteristics of each individual tree, such as crown dimensions, height and treetop coordinates. The methodology is based on the integration of HI and LiDAR data at low level of fusion by following the idea of non-parametric clustering based on Mean Shift (MS) algorithm proposed as a segmentation strategy in [1]. In LiDAR data, this technique is called Adaptive Mean Shift (AMS) and it has been applied as a 3D segmentation approach [2, 3], obtaining satisfactory results for individual tree delineation. Other authors have implemented MS as a complementary step of 2D segmentation of trees [4] and species discrimination [5] in hyperspectral data, by considering three bands: red, green and blue [6]. We are interested on evaluating the effect of including all the spectral information together with the AMS in the 3D segmentation which takes into account spatial data given by the LiDAR data. The integration of this additional information together with the segmentation algorithm provides an essential fusion strategy for LiDAR points located in the lower part of the canopy. Finally, the main dimensions of the crowns and associated trees are extracted from the 3D segmentation.

Références :

- [1] D. Comaniciu and P. Meer, "Mean shift: A robust approach toward feature space analysis," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, no. 5, pp. 603–619, 2002.
- [2] A. Ferraz et al., "3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 121, pp. 210–223, Jun. 2012.
- [3] A. Ferraz, S. Saatchi, C. Mallet, and V. Meyer, "Lidar detection of individual tree size in tropical forests," *Remote Sens. Environ.*, vol. 183, pp. 318–333, Sep. 2016.
- [4] G. Tochon et al., "On the use of binary partition trees for the tree crown segmentation of tropical rainforest hyperspectral images," *Remote Sens. Environ.*, vol. 159, pp. 318–331, Mar. 2015.
- [5] J. Feret and G. P. Asner, "Tree Species Discrimination in Tropical Forests Using Airborne Imaging Spectroscopy," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 1, pp. 73–84, Jan. 2013.
- [6] M. C. Christopher, M. Christoudias, and P. Meer, "Synergism in Low Level Vision," in *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02) Volume, 2002*, vol. 4, p. 4015.

Hyperspectral unmixing based on a novel pixel-by-pixel NMF algorithm using a new linear mixing model to address multiplicatively adjusted spectral variability

Fatima Zohra Benhalouch^{1'2'3}, Moussa Sofiane Karoui^{1'2'3} and Yannick Deville²

¹ Centre des Techniques Spatiales (CTS), Arzew, Algeria

² IRAP, Université de Toulouse, UPS, CNRS, OMP, CNES, Toulouse, France

³ LSI, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Oran, Algeria
{Fatima.Benhalouche, Sofiane.Karoui, Yannick.Deville@irap.omp.eu}

Hyperspectral imaging sensors collect data in the visible and infrared wavelength domains, which allows precise identification of classes of pure materials (i.e. endmembers) present in imaged areas. Commonly, these sensors are characterized by a low spatial resolution, but their spectral resolution is high. Due to this limited spatial resolution, pixels of such data are mixed: each observed pixel-spectrum is usually a mixture of contributions from a number of endmember-spectra that are present in the imaged scene. These contributions are commonly assumed to be mixed in a linear manner and unsupervised linear spectral unmixing (LSU) techniques are used to linearly and blindly unmix all provided pixel-spectra in order to recover a collection of unknown endmember-spectra, and their associated unknown abundance coefficients. Standard LSU techniques, that can be viewed as classic linear blind source separation (BSS) methods, consider that each endmember is represented by a unique spectrum in all image pixels. However, in order to describe other phenomena, which may occur in some practical applications, more complex models are necessary, wherein each endmember is no more represented by a unique spectrum, but by a set of different, but close, spectra in all pixels of the considered image. Consequently, the concept of endmembers is replaced by classes of endmembers. This phenomenon, which principally occurs due to varying illumination and atmospheric conditions or material composition, is known as spectral/intra-class variability, and not addressing this problem may yield errors that spread throughout the analysis process of these remote sensing data. Recently, some blind unmixing methods were developed to address the spectral variability issue. These methods, which are based on nonnegative matrix factorization (NMF), derive a different estimated spectrum for each class of endmembers in each pixel. In this work, a novel linear mixing model that handles the spectral variability phenomenon, modeled in a multiplicative form, is firstly introduced. Then, an algorithm, based on pixel-by-pixel NMF, is proposed for unmixing the considered data. This proposed algorithm, which estimates, for each class of endmembers, pixel-by-pixel slightly different spectra, minimizes a cost function, based on the introduced linear mixing model, by means of iterative and multiplicative update rules and some additional constraints that are related to the introduced mixing model. Experiments, based on realistic synthetic data, are conducted to evaluate the performance of the proposed algorithm. The obtained results are also compared to those of three methods from the literature: the standard (i.e. without taking into account the spectral variability phenomenon) Vertex Component Analysis (VCA) technique, the Unconstrained Pixel-by-pixel NMF (UP-NMF) and Inertia-constrained Pixel-by-pixel NMF (IPNMF) methods that consider this phenomenon. These test results show that the proposed approach outperforms all other tested methods and proves to be very attractive for unmixing hyperspectral remote sensing data with spectral variability.

Oratrice invitée



Pr. Jun Li

Sun Yat-Sen University,

Guangzhou

Mardi 9 juillet - 16h30

Recent advances in spectral-spatial hyperspectral image classification

Imaging spectroscopy, also known as hyperspectral imaging, has been transformed in the last four decades from being a sparse research tool into a commodity product available to a broad user community. Particularly, in the last 10 years, a significant number of new techniques have been introduced in the domain of hyperspectral image classification. Most of these techniques are characterized by their capacity to take into account both the spatial and spectral characteristics of the hyperspectral data, as opposed to classic techniques for hyperspectral classification that perform in pixel-by-pixel fashion. Spectral-spatial hyperspectral image classification techniques can achieve better performance than their pixel-wise counterparts, as they can combine the rich spectral information contained in the data with spatial-contextual information. In this talk, we provide a comprehensive overview of recent developments in spectral-spatial techniques for hyperspectral image classification in a unified context. The idea of spatial dependency system is first introduced, which involves pixel dependency and label dependency. Resulting from this concept, we categorize available approaches into fixed, adaptive, and global. Then, existing spectral-spatial methods are grouped into four categories according to the fusion stages in which spatial information becomes effective, i.e., preprocessing-based, integrated, postprocessing-based, and hybrid techniques. Finally, typical methodologies are outlined. The talk concludes with a detailed comparison of representative spectral-spatial classification methods using hyperspectral images collected by several instruments, in the context of different applications.

MILIEUX LITTORAU

Blind unmixing based on spectral-variability modeling for hyperspectral oceanic remote sensing data with adjacency effects

Yannick DEVILLE¹, Salah-eddine BREZINI^{1'2}, Fatima Zohra BENHALOUCHE^{1'2'3}, Moussa Sofiane KAROUI^{1'2'3}, Mireille GUILLAUME⁴, Xavier LENOT⁵, Bruno LAFRANCE⁵, Malik CHAMI⁶, Sylvain JAY⁴, Audrey MINGHELLI⁷, Xavier BRIOTTET⁸, Véronique SERFATY⁹

¹UNIVERSITE DE TOULOUSE, UPS-CNRS-OMP-CNES, IRAP, 31400 Toulouse, France,
yannick.deville@irap.omp.eu

²UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN-MOHAMED BOUDIAF, LSI,
Oran, Algeria

³ALGERIAN SPACE AGENCY (ASAL), Centre des Techniques Spatiales (CTS), Arzew, Algeria

⁴AIX MARSEILLE UNIV, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

⁵CS SYSTEMES D'INFORMATION, 31506 Toulouse Cedex 05, France

⁶SORBONNE UNIVERSITES, UPMC Univ Paris 06, INSU-CNRS, LATMOS, 06230 Villefranche sur Mer, France

⁷UNIVERSITE DE TOULON, CNRS, SeaTech, LIS laboratory, UMR 7296, 83041 Toulon, France

⁸ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 31055 Toulouse Cedex 4, France

⁹DGA/MRIS, 75509 Paris Cedex 15, France

Hyperspectral sensors have a limited spatial resolution so that, when observing the Earth, each pixel of a hyperspectral image corresponds to a surface on Earth which is often composed of different pure materials. The radiance or reflectance spectrum of such a pixel is then a mixture of the spectra of the corresponding pure materials. In particular, we very recently introduced (i) a specific hyperspectral mixing model for the sea bottom, based on a detailed physical analysis which moreover includes the adjacency effect, and (ii) an associated unmixing method for retrieving pure material spectra from an observed hyperspectral image. That unmixing method is not blind in the sense that it requires a prior estimation of various parameters of that mixing model. We here proceed much further, by first analytically showing that this model can be seen as a specific member of the general class of linear mixing models involving spectral (or intra-class) variability, i.e. models where each class of pure materials yields a somewhat different spectrum in each pixel of an observed image, as opposed to the standard model where each class of pure materials is represented by the same spectrum in all observed pixels. Whereas standard blind unmixing methods do not take spectral variability into account, we recently proposed two methods (IP-NMF and UP-NMF), which handle this variability by deriving a different estimated spectrum in each pixel for any given class of pure materials and by constraining, to some extent, all estimates for one class to remain close to one another. We here apply these two methods to synthetic but realistic coastal remote sensing data. We show that they yield significantly better pure spectra estimation than a classical method from the literature which was not designed to handle such a variability. A better performance is particularly obtained when sea depth significantly varies over the considered scene, because spectral variability especially occurs in that case.

This work was funded by the French Defense Agency : “ANR/Astrid HypFoM 15-ASTR-0019” project.

Macroalgues intertidales : Apport de la télédétection hyperspectrale pour le suivi sectorial dans le cadre de la DCE/DCSMM

Anthony LE BRIS^{1*}, Thierry PERROT¹, Pierre-Olivier LIABOT², Clément DANIEL¹, Sophie RICHIER¹

^{1*} CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues), 89 Rue Presqu'île de Pen Lan, France, anthony.lebris@ceva.fr

² IFREMER, 1625 Route de Sainte-Anne, 29280 Plouzané, France

Le suivi stationnel de la couverture végétale des macroalgues intertidales, tel que prévu par la DCE, permet, sur des points de référence, de suivre très finement mais localement l'évolution des peuplements et des ceintures de macroalgues. A des échelles spatiales plus importantes, ce type de suivi n'est plus adapté. Il ne permet pas de rendre compte, à l'échelle de la masse d'eau, des changements de la répartition des grandes communautés algales et de suivre l'évolution des ceintures d'algues, garante du maintien de la biodiversité des estrans rocheux. Ce suivi de l'évolution de la couverture algale étant particulièrement important dans le contexte actuel de changement climatique et d'eutrophisation, l'objectif de cette étude est de montrer, la complémentarité de la télédétection hyperspectrale appliquée à une échelle sectorielle au suivi stationnel existant, pour le calcul de l'indicateur biologique macroalgues intertidales,

Pour cette étude, des données aéroportées ont été acquises en 2018 à l'aide du capteur hyperspectral AISA Eagle 1k au niveau d'un platier rocheux de Grandcamp-Maisy en Normandie (49°23'43.9"N, 1°02'55.3"W). Les images sont constituées d'une résolution spectrale de 5 nm sur 126 bandes entre 400 et 970 nm, et d'une résolution spatiale de 60 cm. Une librairie de signatures spectrales a conjointement été acquise *in situ*. Les images et les spectres de terrain ont été corrigés radiométriquement puis une procédure de traitement pour retirer le continuum des spectres a été appliquée. L'emplacement et l'intensité des pics d'absorption des pigments photosynthétiques à des longueurs d'ondes spécifiques ont été comparés à l'aide d'une procédure de shape matching.

L'analyse des images hyperspectrales, à partir d'une classification VCI (Vegetal Cover Index), permet d'obtenir clairement la répartition spatiale des algues brune, verte et rouge avec une précision sur leur taux de recouvrement. Les données hyperspectrales offrent également la possibilité de discriminer les surfaces constituées d'un mélange des 3 groupes d'algues, ainsi que les substrats rocheux ou vaseux colonisés par un biofilm de microorganismes photosynthétiques (microphytobenthos). Les résultats ont été confrontés aux données biologiques acquises sur le terrain et géolocalisées, ainsi qu'à une image multispectrale (RVB-IR) acquise par un drone, avec une résolution spatiale centimétrique. Des données hyperspectrales acquises en 2007 sur la même zone d'étude ont également permis de suivre l'évolution des communautés et leur saisonnalité.

Les premiers résultats mettent en évidence l'intérêt de la télédétection hyperspectrale pour le suivi de la composition, la répartition et la densité des ceintures de macroalgues à une échelle sectorielle. La méthode développée est complémentaire au suivi DCE qui est réalisé à une échelle stationnelle et pourrait constituer une nouvelle métrique pour le calcul des indicateurs de la qualité écologique des masses d'eau côtières.

Suivi de cordons dunaires par télédétection synchronisée Hyperspectrale et LiDAR à retour d'onde complet

Giovanni FRATI^{1,3}, Patrick LAUNEAU¹, Manuel GIRAUD¹, Saïd MOUSSAOUI⁴, Marc ROBIN², Dimitri LAGUE⁵,
Cyril MICHON³

¹ Laboratoire de Planétologie et Géo dynamique (LPG) CNRS : UMR6112, INSU Université de Nantes, OSUNA, Université d'Angers, 2 Rue de la Houssinière – BP 92208 4432 NANTES CEDEX 3, 2 bd Lavoisier, 49045, Angers cedex – France, giovanni.frati@univ-nantes.fr

² Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (IGARUN/Géolittomer- UMR6554, LETG CNRS) CNRS : UMR6554, Chemin de la Censive du Tertre BP 81227 – 44312 NANTES Cedex – France

³ GEOFIT-expert, 1 route de Gacher – 44307 NANTES CEDEX 3 – France

⁴ Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes Ecole Centrale de Nantes, Ecole Centrale de Nantes – 2 Chemin de la Houssinière (Bâtiment 34) – BP 92208, 44322 Nantes Cedex 3 – France

⁵ Géosciences Rennes, UMR CNRS 6118, Université de Rennes 1, Campus Beaulieu, 35042 Rennes, France

Le suivi des cordons dunaires en Pays de la Loire nécessite à la fois une cartographie de leur morphologie, pour l'établissement de stocks sédimentaires précis, et une cartographie des associations végétales types formant des habitats caractéristiques de la dynamique des dunes. Ces deux opérations peuvent être réalisées sur l'ensemble de ce littoral en quelques heures grâce à la mise en œuvre aéroportée commune d'un LiDAR bi-spectral à retour d'onde complet et du jeu de deux caméras hyperspectrales couvrant un spectre de réflexion solaire allant de 400nm à 2450nm. La synchronisation des acquisitions repose sur une planification des acquisitions aéroportées à partir d'une plateforme unique bi-trappe permettant d'associer à chaque pixel hyperspectral un aller-retour LiDAR. Un couplage parfait entre les deux types de données est assuré par la projection de deux signaux en chaque pixel sur un même plan image avec un même angle d'incidence. Le retour d'onde permet alors d'associer à chaque pixel hyperspectrale de 3,6nm à 9nm de résolution une longueur d'interaction entre un sol et toutes les couches de végétation traversées lors de leur trajet vers le capteur avec une résolution de 0,15m le long d'un enregistrement télémétrique ou range de 60m.

Le sable sec diffusant la lumière de façon uniforme la somme de leurs retours d'onde est comparable à la réflectance solaire observée dans la même longueur d'onde ce qui permet une inter-calibration des deux signaux. La végétation, comme l'eau et d'autres matériaux, présentent en revanche des réflexions spéculaires qui provoquent des retours d'onde LiDAR plus intenses, utiles pour détecter l'imbrication des structures végétales ou des rides de vague à la surface de l'eau. Les écarts ainsi constatés entre formes de retours d'onde de végétation et sable permettent la détection des végétations basses habituellement confondues avec leur sol. A l'inverse, des indéterminations entre végétaux de même composition pigmentaire peuvent être levées grâce à des signatures de retours d'onde caractéristiques de différentes structures végétales. C'est, par exemple, le cas d'herbes pionnières décimétriques en hauts de plages, des oyats métriques de stabilisation des dunes dont les variations d'état physiologique peuvent inverser des diagnostics de composition pigmentaire.

L'intérêt de ce couplage LiDAR hyperspectral est également de fournir un diagnostic complet à l'échelle d'un seul pixel, ce qui est parfois nécessaire le long de corridors étroits cartographiés sur des centaines de kilomètres pour lequel la détermination du trait de côte est l'objectif principal. Hauteur, étagement et composition moyenne d'un pixel peuvent alors être comparés directement à des bibliothèques de simulation plus pertinentes des mélanges produits. A titre d'exemple, un signal rejoignant le sol implique un mélange avec celui-ci alors qu'une végétation plus haute sans traversée pourra être traitée sans contribution du sol.

Cartographie de vestiges archéologiques immergés à partir d'images hyperspectrales : application au site d'Er Lannic

Alexandre Guyot^{1,2}, Marc Lennon¹, Thierry Lorho⁴, Nicolas Thomas¹, Tristan Petit¹, Simon Guéguen¹, Guillaume Sicot³, Serge Cassen⁵, Laurence Hubert-Moy²

¹Hytech-imaging, Brest, France,
alexandre.guyot@hytech-imaging.fr

²Université Rennes 2, Laboratoire LETG - UMR6554, Rennes, France

³ENSTA-Bretagne, Brest, France

⁴Service régional de l'archéologie / Drac Bretagne, Rennes, France

⁵Université de Nantes, Laboratoire LARA - UMR6566, Nantes, France

Le Golfe du Morbihan recèle l'un des plus importants patrimoines d'architecture mégalithique au monde. Par leur densité et leur caractère exceptionnel, ces monuments du Néolithiques, bâtis entre le 5^{ème} et le 3^{ème} millénaire avant notre ère, font aujourd'hui l'objet d'un projet d'inscription sur la liste du Patrimoine mondial de l'UNESCO. L'un des sites les plus emblématiques de cette région est l'îlot d'Er Lannic et ses deux arcs d'enceintes, dont la partie la plus méridionale gît sous les eaux du Golfe. Cet ouvrage de stèles est étudié par les archéologues depuis la fin du XIX^{ème} siècle, mais les recherches in-situ, notamment sur la partie immergée, sont contraintes par l'un des courants de marée les plus puissants d'Europe. Les effets de l'érosion sur la frange littorale menacent cette structure et sa protection passe par une meilleure connaissance, notamment cartographique, et un suivi densifié.

Bien que les données de télédétection telles que les points LiDAR ou l'imagerie satellitaire soient fréquemment utilisées pour détecter ou documenter les traces du passé, l'imagerie hyperspectrale aéroportée a été jusqu'alors peu utilisée pour la cartographie archéologique. Dans un contexte de vestiges immergés, cette approche est même inédite.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale aéroportée pour la cartographie de sites archéologiques en zone de petits fonds. Dans le cadre de cette étude, des données hyperspectrales aéroportées ont été enregistrées dans le domaine spectral VNIR (400-1000 nm) à une résolution spatiale de 50 cm. La méthode mise en œuvre pour traiter ces données comprend deux approches : (1) la détection d'anomalies qui est effectuée à partir des réflectances de surface ; (2) la caractérisation spectrale et morphologique des structures archéologiques à partir des spectres de réflectance du fond marin et d'un modèle numérique de bathymétrie issu de l'inversion d'un modèle de transfert radiatif dans la colonne d'eau. Les résultats sont comparés aux données de référence archéologiques issues du dernier relevé in-situ qui date de 2018.

VEGETATION

Utilisation de données hyperspectrales pour la détection et la quantification des hydrocarbures pétroliers en régions végétalisées

Guillaume Lassalle^{a,b}, Sophie Fabre^a, Anthony Credo^b, Rémy Hédacq^b, Georges Berton^c, Dominique Dubucq^d, Arnaud Elger^e

^a Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), Toulouse, France

^b TOTAL S.A., Pôle d'Études et de Recherches de Lacq, Lacq, France

^c DynaFor, Université de Toulouse, INRA, Castanet-Tolosan, France

^d TOTAL S.A., Centre Scientifique et Technique Jean-Féger, Pau, France

^e EcoLab, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France
guillaume.lassalle@onera.fr

Naturellement présents en surface (suintements) ou déversés accidentellement lors de défaillances d'installations pétrolières, les hydrocarbures (HC) demeurent difficiles à détecter en régions végétalisées. De récents travaux ont néanmoins rendu possible la détection des HC de manière indirecte, au travers de leurs effets sur l'état de santé (pigments) et la signature spectrale de la végétation [1]. Dans la continuité de ces travaux, cette étude propose une méthode basée sur l'utilisation des modèles de transfert radiatif PROSPECT et PROSAIL pour quantifier les HC à partir de données hyperspectrales acquises sur la végétation, de l'échelle de la feuille à celle d'images aéroportées [2]. Pour cela, un site contaminé par les HC (17 à 39 g.kg⁻¹) et colonisé par la ronce (*Rubus fruticosus* L.) a été identifié et 10 zones d'étude ont été matérialisées. La réflectance de l'espèce (400 – 2500 nm) a été mesurée sur ces zones en juillet 2017, à l'échelle de la feuille et du couvert. Des images hyperspectrales aéroportées ont également été acquises sur le site à la même date, à une résolution spatiale d'1 m et spectrale de 5,2 et 7,8 nm dans les domaines 400 – 1000 et 1000 – 2500 nm respectivement. L'ensemble des signatures spectrales disponibles sur les zones (terrain et images) a ensuite été utilisée pour estimer le contenu en pigments des feuilles, par inversion des modèles PROSPECT (feuille) et PROSAIL (couvert et images). Une démarche analogue a été menée sur un site témoin (non contaminé), également colonisé par la ronce. Une forte cohérence des contenus en pigments estimés par les modèles a été observée entre les trois échelles (feuille – couvert : $R^2 = 0,95$; RMSE = 1,05 $\mu\text{g.cm}^{-2}$ et feuille – images : $R^2 = 0,85$; RMSE = 3,70 $\mu\text{g.cm}^{-2}$ pour les chlorophylles). Ces estimations ont été confirmées par des analyses biochimiques et ont révélé une altération du contenu en chlorophylles chez les ronces exposées aux HC (t-test, $p < 0,001$), permettant de détecter ces derniers. De plus, le niveau d'altération de ces pigments s'est montré étroitement corrélé à la concentration en HC du sol à toutes les échelles d'étude ($R^2 = 0,87$ et $0,74$ à l'échelle de la feuille et des images, respectivement). Cette relation a permis de prédire les concentrations en HC avec précision, à partir des teneurs en pigments estimées. Le passage de l'échelle de la feuille à celle du couvert et des images s'est toutefois accompagné d'une dégradation de la qualité des prédictions des HC (RMSE = 2,62 et 3,20 g.kg⁻¹ à l'échelle de la feuille et des images, respectivement). La méthode a également été testée sur les images ré-échantillonnées aux résolutions spectrales des capteurs satellitaires Sentinel⁻³ (multispectral, 16 bandes) et Hypxim (hyperspectral, résolution prévue de 10 nm). La méthode s'est montrée robuste à la résolution spectrale d'Hypxim. En revanche, les estimations de contenu en pigments ont été légèrement dégradées à celle de Sentinel⁻³ (feuille – images : $R^2 = 0,70$; RMSE = 4,23 $\mu\text{g.cm}^{-2}$), affectant de ce fait les prédictions des HC ($R^2 = 0,43$; RMSE = 4,69 g.kg⁻¹). Cette étude démontre le potentiel de la télédétection hyperspectrale pour la quantification des HC pétroliers en régions végétalisées, ainsi que son intérêt par rapport à la télédétection multispectrale. La méthode proposée sera prochainement validée sur d'autres sites sujets à une contamination du sol.

[1] Arellano, P., Tansey, K., Balzter, H., Boyd, D.S. (2015) Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environ. Pollut.* 205, 225–239.

[2] Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., Ustin, S.L. (2009) PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sens. Environ.* 113, S56–S66.

Identification automatique d'essences forestières : comparaison des performances entre données hyperspectrales (Hypxim) et données hypertemporelles (Sentinel-2)

Thierry ERUDEL^{1*}, Sophie FABRE², Philippe DÉLIOT², Xavier BRIOTTET²,
Jean-Baptiste FÉRET³, David SHEEREN¹

^{1*}DYNAFOR, Université de Toulouse, INRA/INP-ENSAT, Toulouse, France

*thierry.erudel@ensat.fr

²ONERA/DOTA, Toulouse, France

³TETIS, AgroParisTech/CIRAD/IRSTEA/CNRS, Montpellier, France

L'identification automatique d'essences forestières à partir d'images optiques est une question déjà ancienne en télédétection. Si les travaux antérieurs ont montré une nette supériorité des données hyperspectrales par rapport aux données multispectrales dans le cas d'une acquisition mono-date, la question reste ouverte vis-à-vis des nouvelles séries temporelles à haute résolution spatiale. Est-il préférable de s'appuyer sur les variations phénologiques entre essences (périodes de feuillaison, floraison, sénescence et chute des feuilles) pour les distinguer ou plutôt, sur les variations de leurs propriétés biochimiques (teneur en pigments, contenu en eau, cellulose et lignine) à un instant donné ? Cette étude, réalisée dans le cadre du projet TOSCA HyperBIO, vise à apporter une première réponse. Elle a pour objectif, de comparer les performances de classification d'essences forestières en utilisant d'une part, une série temporelle de données Sentinel-2 et d'autre part, une image hyperspectrale simulée du futur capteur Hypxim.

L'étude a été réalisée sur le massif forestier de Fabas situé en Haute-Garonne (France) couvrant une superficie proche de 500 ha. Les données de référence relatives aux essences (8 classes incluant 3 essences de feuillus et 5 essences de conifères) sont constituées de 410 points repérés par GPS sur le terrain et par photo-interprétation. Les données hyperspectrales sont issues d'une campagne aérienne effectuée le 18 septembre 2015 avec deux imageurs HySpex, l'un dans le VNIR (400–1000nm, 160 bandes de 3,6 nm) et l'autre dans le SWIR (1000–2500nm, 256 bandes de 6 nm) à une résolution spatiale native de 1 m. Ces données hyperspectrales ont été utilisées pour générer, par simulation, une image hyperspectrale en réflectance de surface avec les caractéristiques du futur capteur Hypxim (10m de résolution spatiale, 10nm de résolution spectrale dans le domaine 400-2500nm). Concernant la série temporelle Sentinel-2, les images sont réparties sur toute l'année incluant 11 dates sans nuages depuis le 2 février jusqu'au 27 novembre 2017. Les bandes natives à 20m (*Red-Edge* et SWIR) ont été rééchantillonnées à 10m. Quatre jeux de données (images en réflectance de surface) ont été constitués pour la série S2 :

- le jeu VNIR n'incluant que les bandes du visible et du proche-infrarouge à 10m en natif (4 bandes par date),
- le jeu VNIR' incluant les bandes VNIR ainsi que celles dans le *Red-Edge* rééchantillonnées à 10m (8 bandes par date),
- le jeu VNSW' incluant uniquement les bandes du *Red-Edge* et du SWIR rééchantillonnées à 10m (6 bandes par date),
- le jeu VNSW'' incluant toutes les bandes de S2 rééchantillonnées à 10m (10 bandes par date).

Pour les données Hypxim, deux jeux d'images ont été générés : un jeu ne contenant que les bandes dans le VNIR et un jeu intégrant tout le domaine spectral VNIR+SWIR.

Les classifications supervisées ont été réalisées à l'échelle du pixel en mobilisant plusieurs algorithmes pour s'assurer de la stabilité des résultats (SVM linéaire, SVM gaussien, Régression Logistique Régularisée, *Random Forest*). Deux niveaux de classification ont été analysés : distinction entre feuillus et résineux (niveau 1) et distinction entre 8 essences (niveau 2).

Les premiers résultats montrent qu'au niveau 1 de la nomenclature, les jeux d'images hyperspectrales Hypxim offrent des performances de classification significativement plus élevées que les données Sentinel-2 ($p < 0.05$; *Wilcoxon sum-rank test*) avec une très bonne capacité de discrimination ($\kappa > 0.9$). En revanche, pour la séparation des essences au niveau 2, les classifications obtenues avec Sentinel-2 sont significativement plus élevées que celles obtenues avec Hypxim, quels que soient le classifieur utilisé et la combinaison des bandes exploitées (OA > 80 %, $\kappa > 0.7$). Les différences sont ténues en utilisant le jeu VNSW' ($\Delta \kappa = 0,008$). Les écarts sont légèrement plus marqués avec les jeux VNIR, VNIR' et VNSW'' ($\Delta \kappa = 0,04$ en moyenne).

Plusieurs perspectives sont envisagées : comparer les résultats avec un nombre de paramètres équivalent pour chaque jeu de données (en sélectionnant les longueurs d'onde hyperspectrales les plus pertinentes), évaluer l'impact des caractéristiques spectrales (échantillonnage, résolution) dans le cas Hypxim, appliquer la méthode à un autre site forestier.

Caractérisation de la réflectance de canopée pour la cartographie de la biodiversité en forêt tropicale par modélisation physique

Dav M. Ebengo¹, Florian de Boissieu¹, Claudia Lavalley¹, Grégoire Vincent², Christiane Weber¹, Jean-Baptiste Féret

¹ TETIS, Irstea, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, Université de Montpellier, Montpellier, France, dav.ebengo@teledetection.fr

² AMAP, IRD, CIRAD, INRA, CNRS, Université Montpellier, Montpellier, Montpellier, France

Les forêts tropicales couvrent 7 % de la surface de la terre, mais abritent les deux tiers de la biodiversité des écosystèmes terrestres. L'érosion de la biodiversité y est particulièrement problématique car ces écosystèmes jouent un rôle important dans le maintien de multiples services écosystémiques et interviennent substantiellement dans la dynamique du climat à l'échelle mondiale. Les données issues de la télédétection montrent un fort potentiel pour quantifier la biodiversité et suivre son évolution dans le temps et l'espace aussi bien à échelle locale qu'à échelle régionale, mais de nombreuses questions méthodologiques et techniques nécessitent d'être étudiées. La diversité spécifique est associée à une diversité de traits chimiques foliaires et de structure de canopée, qui influencent directement le signal mesuré par des capteurs optiques passifs. Les outils de modélisation du transfert radiatif 3D s'avèrent particulièrement intéressants pour étudier plus en détail ce lien entre biodiversité et hétérogénéité spectrale en suivant l'hypothèse de variation spectrale, notamment pour identifier les limites méthodologiques. En effet, le modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) utilisé dans cette étude permet de simuler l'acquisition de capteurs optiques à partir d'une représentation 3D de la structure de la végétation et de propriétés optiques spécifiées pour les différents éléments (feuilles, tronc, sol). DART intègre notamment le modèle PROSPECT qui permet de générer des propriétés optiques foliaires à partir de propriétés biochimiques (concentrations en pigments) et biophysiques (LMA – Leaf mass per area, EWT – Equivalent water thickness). L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence de la représentation de la végétation sur la variabilité spatiale de l'information spectrale simulée par DART, notamment pour savoir laquelle nous permet de reproduire au mieux les patrons d'hétérogénéité spectrale observés par télédétection. Les données utilisées dans le cadre de ce travail sont issues de deux campagnes effectuées en 2015 et 2016 en Guyane Française dans le cadre des projets CNES TOSCA LEAF-EXPEVAL et HYPERTROPIK. Ces campagnes ont permis d'acquérir simultanément des données hyperspectrales (capteurs Hypspx) et LiDAR (LMS Q780 RIEGL) aéroportées (ALS – Airborne laser scanning). Des mesures *in situ* ont également été effectuées pendant la même période sur la parcelle du dispositif GuyaFlux situé sur le site de Paracou. Outre les données d'inventaire (position, taxon), elles comprennent, pour un certain nombre d'individus émergents de la canopée, des mesures spectroradiométriques (400-2500 nm) de propriétés optiques (réflectance, transmittance) et des traits foliaires. L'étude se concentre sur une zone de 200x200 m pour laquelle une maquette de la forêt a été produite. La structure de la maquette a été réalisée par discrétisation de l'espace 3D des données lidar (voxélisation) grâce au logiciel AMAPVox. Cette voxélisation, définie avec une résolution de 1x1x1 m, permet de caractériser chaque voxel (pixel 3D) de la scène par une densité de surface foliaire. Les propriétés optiques de la maquette ont été attribuées de deux manières différentes : soit à l'échelle de l'arbre, soit à l'échelle du voxel. Dans la première approche, les arbres ont été délinéés manuellement à partir du modèle numérique de canopée issu des données LiDAR ALS. Les propriétés optiques collectées pour chaque individu sont alors assignées à l'ensemble des voxels à la verticale de la couronne correspondante. Dans la seconde représentation, les principaux traits foliaires (pigments, LMA, EWT) sont estimés pour chaque pixel de l'image hyperspectrale à partir de modèles statistiques simples permettant de convertir des indices spectraux en traits foliaires. Ces traits foliaires sont ensuite injectés dans le modèle PROSPECT pour simuler les propriétés optiques foliaires correspondantes. Celles-ci sont assignées à l'ensemble de voxels à la verticale du pixel correspondant. DART est ensuite paramétré pour simuler les acquisitions d'images hyperspectrales effectivement réalisées sur ce site (conditions d'acquisition et caractéristiques instrumentales). L'analyse de la similarité spectrale entre les images simulées et acquises est réalisée à partir de différentes de l'angle spectral [1], du SID (Spectral information divergence) et la distance euclidienne [2]. De manière relative, le potentiel de discrimination d'espèces à partir de données simulées est évalué par rapport aux données mesurées par des méthodes d'apprentissage automatique (Random Forest, Support-Vector Machines). Cette comparaison permet en effet d'identifier le mode de représentation de la diversité biochimique le plus adéquat pour la simulation de la variabilité spectrale dans les données optiques. Les résultats mettent en évidence la nécessité d'une caractérisation précise du ratio éléments ligneux – feuille pour l'amélioration du compromis radiométrique entre données simulées et mesurées.

[1] Price, C. (1994). How unique are spectral signatures? Remote Sensing of Environment. 49, 181–186.

[2] Ding, J. G., Li, X. B., & Huang, L. Q. (2015). A Novel Method for Spectral Similarity Measure by Fusing Shape and Amplitude Features. Journal of Engineering Science & Technology Review, 8(5).

Influence of forest modeling on LAI and chlorophyll content estimation with radiative transfer inversion for a woodland savanna

Thomas Miraglio^{1,2}, Karine Adeline¹, Margarita Huesca³, Susan Ustin³, Xavier Briottet¹

¹ ONERA/DOTA, Université de Toulouse, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, thomas.miraglio@onera.fr

² Université fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, 41 Allées Jules Guesde, 31013 Toulouse

³ CSTARS, University of California, Davis, One Shield Avenue, 95616 Davis, CA, USA

The “Mediterranean forests, woodlands, and scrubs” biome is estimated to be proportionally the most affected by biodiversity change due to climate and anthropic pressures by 2100 [1]. A better understanding of these ecosystems is required to guide conservation policies. Scientists have defined essential biodiversity variables to observe biodiversity variations: some can be assessed at the species level by hyperspectral remote sensing, such as C_{ab} (leaf chlorophyll a+b content) and forest LAI (Leaf Area Index) which are well-known indicators of vegetation health. However when using remote sensing data difficulties arise for sparse forests such as woodland savannas, due to their site-specific low LAI values and their large range of CC (Canopy cover) values. Therefore both the canopy structure and environmental context play an important role in the estimation of LAI and C_{ab} depending on the spatial scale of observation. At the tree scale (high spatial resolutions) reflectance is mainly sensitive to characteristics such as LAI, woody elements, clumping and crown shape, while at the population scale (low spatial resolutions) general characteristics of the ecosystem such as CC, soil type or species distribution also contribute. A wide-spread method to estimate C_{ab} and LAI from remote sensing is based on the inversion of hyperspectral acquisitions with LUTs (Look-Up Tables) generated by radiative transfer models.

The objective of this work is to evaluate the influence of both tree and population modeling during LUT building on LAI and C_{ab} estimations: while a “simple forest representation” (turbid canopy, branch/clumping-less ellipsoidal trees) is usually assumed, a refined forest modeling may prove to be more suited to very sparse forests. The study site is a woodland savanna in central California (mean CC and LAI of 50% and $0.8\text{m}^2/\text{m}^2$, respectively) having both high (>90%) and low (<50%) CC regions. AVIRIS-Next Generation (2m spatial resolution) and AVIRIS (18m) hyperspectral airborne images were acquired in summer 2014, as well as field data. LUTs are generated using leaf and canopy radiative transfer models PROSPECT [2] and DART [3]. Several inversion strategies (use of spectral RMSE/SAM and vegetation indices) are considered, as well as several structural parameters such as woody elements, crown shape, tree height, leaf clumping and LAD (Leaf Angle Distribution).

Preliminary results show that C_{ab} estimations have relative substantial variations of around $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ and $3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ when leaf clumping and LAD are taken into account, respectively. For LAI estimations, the combined effects of tree height, LAD, leaf clumping and woody elements lead to variations up to $0.5\text{m}^2/\text{m}^2$, which is not negligible given the site average specificities previously mentioned. As a consequence, these structural parameters should be considered as much as possible (requiring sometimes some a-priori knowledge about the study site or ecosystem type) in mock-up building for LUT-based inversion with radiative transfer model, especially for sparse forests with very low LAI if accurate estimations of LAI and C_{ab} are targeted.

[1] – Sala O. E. et al., 2000. *Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100*, Science 287, pp.1770-1774

[2] – Féret J.-B. et al., 2017. *PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle*, Remote Sensing of Environment 193, pp.204-214

[3] – Gastellu-Etchegorry J.-P. et al., 1996. *Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies*, Remote Sensing of Environment 58(2), pp.131-156

MILIEUX URBAINS

Apport des données hyperspectrales pour la cartographie et la caractérisation des sources lumineuses artificielles nocturnes en milieux urbains

Jean NABUCET^{1*}, Marc LENNON², Nicolas THOMAS², David MOISAN³, Laurence HUBERT-MOY¹

^{1*} CNRS UMR 6554 LETG, Jean NABUCET, Place du recteur Henri le Moal 35043 Rennes, France, jean.nabucet@univ-rennes2.fr

² Hytech Imaging, 115 Rue Claude Chappe, 29280 Plouzane, France

³ Rennes Métropole, 4 avenue Henri Fréville, 35000 Rennes, France

Les politiques actuelles de mise en œuvre d'une transition énergétique et écologique durable nous amènent à analyser nos usages passés et actuels de l'énergie. De nouvelles orientations de gestion durable des territoires interrogent tous les domaines de nos sociétés et plus particulièrement les milieux urbains qui se densifient continuellement.

L'éclairage artificiel, public comme privé, se pose aujourd'hui comme un enjeu fort de cette transition énergétique des grandes métropoles mondiales. En effet, de nombreuses recherches portant sur le sujet illustrent les effets néfastes sur la santé ou encore sur la biodiversité en fonction des flux lumineux utilisés [1][2][3]. Cependant, très peu d'études ont été menées à l'échelle d'une métropole, faute de données exhaustives et représentatives de la diversité des types d'éclairages utilisés. Les moyens d'observation nocturnes restent encore très limités sur le plan spatial (cf : étude PASO du CNES Fev 2017,[4]) ne permettant pas aujourd'hui la mise en œuvre de suivis pour les opérateurs gestionnaires d'un territoire.

Dans le cadre de ces travaux, une acquisition de donnée hyperspectrale a été réalisée de nuit dans le domaine 0,4 – 1µm sur la ville de Rennes. Cette acquisition a été réalisée sur le site urbain de la Zone Atelier Armorique (LTER-Europe) par la société Hytech Imaging avec un capteur Hypspec. L'objectif de cette mission était 1) d'évaluer la faisabilité de ce type d'acquisition, 2) d'évaluer ce type de donnée pour la cartographie de la répartition des sources lumineuses artificielles nocturnes et 3) de caractériser plus finement la nature des spectres lumineux propre à chaque type de lampes utilisées.

Les résultats de cette étude illustrent un très fort potentiel de ce type d'image pour la cartographie, l'identification et la caractérisation des sources lumineuses artificielles nocturnes.

- [1] Chepesiuk, R., 2009. Missing the Dark: Health Effects of Light Pollution. *Environmental Health Perspectives* 117, A20–A27.
- [2] Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E.K., Tockner, K., 2010. Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution* 25, 681–682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- [3] Navara, K.J., Nelson, R.J., 2007. The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* 43, 215–224. <https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2007.00473.x>
- [4] Kyba, C., Garz, S., Kuechly, H., de Miguel, A., Zamorano, J., Fischer, J., Hölker, F., 2014. High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges. *Remote Sensing* 7, 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs70100001>

HYEP HYperspectral imagery for Environmental urban Planning : principaux résultats

Christiane Weber¹ Thomas Houet² Sebastien Gadal³ R Aguejda¹, Grzegorz Skupinski⁸, Yannick Deville⁴, Jocelyn Chanussot⁵, Mauro Dalla Mura⁵, Xavier Briottet⁶, Clément Mallet⁷, Arnaud Le Bris⁷

¹ TETIS, CNRS AgroParisTech, CIRAD, CNRS, Université de Montpellier, Montpellier, France

² LETG CNRS, Univ. Rennes, Rennes, France

³ ESPACE CNRS, Univ. Aix Marseille, Aix en Provence, France

⁴ IRAP CNRS, Toulouse

⁵ GIPSA-Lab, CNRS, Grenoble

⁶ ONERA-DotA, Université de Toulouse

⁷ IGN, Paris

⁸ LIVE, UMR 7213 Univ. Strasbourg, France

Le projet HYEP a permis de mesurer la nécessité d'une approche globale du milieu urbain par télédétection. Les développements réalisés ont été appliqués et évalués sur des images aéroportées hyperspectrales acquises sur Toulouse, utilisées également pour synthétiser des systèmes spatiaux : Sentinel-2, Hypxim et Pléiades. Les principaux résultats présentés portent sur les points suivants.

Plusieurs méthodes de correction atmosphériques ont été évaluées dont les performances dépendent de la résolution spatiale (2). (Roussel et al. 2018). Une base de données de signatures spectrales (BDS) a été construite à partir d'éléments de la littérature, de données *in situ* (sur Toulouse et Kaunas) et de mesures de laboratoire afin d'évaluer leur apport sur la classification supervisée. La réduction de dimension dans le cas des données IH est une étape utile avant la classification des types de sols (ACP, MNF etc.)(3)(4).

Ainsi à la même résolution spatiale : HPYXIM (0.4-2.5 μm) donne de meilleurs résultats que Pléiades et aux résolutions nominales, les performances sont équivalentes. A noter qu'à performances égales l'IH fournit de meilleures discriminations de matériaux que le capteur Pléiades grâce au domaine spectral SWIR. L'influence de la résolution spatiale pour une même configuration spectrale a été étudiée à la fois sur la structure générale du paysage urbain mais aussi sur la végétation plus précisément à diverses résolutions. Cette influence a été étudiée avec différents classifieurs courants : SVM est le plus performant surtout s'il est précédé par une réduction de dimension (MNF). Les verrous liés à l'amélioration des capacités spatiales des capteurs et aux changements d'échelle spatiale ont été en partie levés par les approches de fusion, de sharpening, qui se sont avérées concluantes. Des méthodes d'extraction, de fusion ou de classification ont été utilisées à différentes résolutions spatiales afin de qualifier les gains et la complémentarité de l'IH par rapport à d'autres capteurs : classification par fusion (5), Pan-sharpening (6). Enfin, une méthode d'estimation des superficies des panneaux solaires en milieux urbains, par imagerie hyperspectrale couplée à une méthode de démixage, s'est montrée beaucoup plus précise qu'une méthode classique de la littérature (7) ; (8).

Références

- (1) C. Weber, T. Houet, S. Gadal, R. Aguejda, G. Skupinski, et al.. ANR HYEP ANR 14-CE22-0016-01 Hyperspectral imagery for Environmental urban Planning Hyep Pro- gramme Mobilit. et systèmes urbains 2014. [Rapport de recherche] CNRS UMR TETIS, ESPACE, LETG; ONERA; GIPSA-lab; IRAP; IGN. 2018. <hal-01888126>
- (2) G. Roussel, C. Weber, X. Briottet and X. Ceamanos, "Comparison of two atmospheric correction meth-ods for the classification of spaceborne urban hyperspectral data depending on the spatial resolution", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 39(5), pp. 1593-1614, 2018.
- (3) A. Le Bris, N. Chehata, X. Briottet, N. Paparoditis, Extraction of optimal spectral bands using hierarchical band merging out of hyperspectral data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 15 (3/W3), pp. 459-465, Oct. 2015
- (4) C. Brabant, Alvarez-Vanhard E., Morin G., Thanh Nguyen K., Laribi A., Houet T. (2018) Evaluation of dimensional reduction methods on urban vegetation classification performance using hyperspectral data, *IGARSS 2018, Valencia*, (E), 2018.
- (5) W. Ouerghemmi, A. Le_Bris, N. Chehata, C. Mallet, A two-step decision fusion strategy: application to hyperspectral and multispectral images for urban classification, *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017
- (6) L. Loncan, L. B. Almeida, J. M. Bioucas-Dias, X. Briottet, J. Chanussot, N. Dobigeon, S. Fabre, W. Liao, G. Licciardi, M. Simoes, J-Y. Tourneret, M. Veganzones, G. Vivone, Q. Wei and N. Yokoya, "Hyperspectral pansharpening: a review," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* vol. 3(3), 2015. arxiv.org/pdf/1504.04531.pdf
- (7) F. Z. Benhalouche, M. S. Karoui, Y. Deville, "Linear-quadratic NMF-based urban hyperspectral data unmixing with some known endmembers", *Proceedings of the 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS 2018)*, Sept. 23-26, 2018, Amsterdam, The Netherlands
- (8) M. Karoui, F. Benhalouche, Y. Deville, K. Djerriri, X. Briottet, A. Le Bris. Detection and area estimation for photovoltaic panels in urban hyperspectral remote sensing data by an original NMF-based unmixing method. in *Proc. of the IEEE IGRS Symposium (IGARSS 2018)*, 20-27 July 2018, Valencia, (E)

Apport d'une voie panchromatique dans le démixage d'images hyperspectrales

Simon Rebeyrol^{1,2,*}, Yannick Deville², Véronique Achard¹, Xavier Briottet¹, Stéphane May³

¹ ONERA, Université de Toulouse, 31055 Toulouse CEDEX, France, {simon.rebeyrol, veronique.achard,[xavier.briottet](mailto:xavier.briottet@onera.fr)}@onera.fr

² Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Université de Toulouse, UPS, CNRS, CNES, OMP, 31400 Toulouse, France, {yannick.deville, simon.rebeyrol}@irap.omp.eu

³ CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse, France, stephane.may@cnes.fr

En télédétection hyperspectrale, les méthodes de démixage spectral aveugle [1] ont pour but d'estimer ou d'extraire les spectres des matériaux présents dans l'image ainsi que leurs fractions d'abondance dans chaque pixel. De telles méthodes reposent en général sur l'utilisation d'une loi de mélange linéaire et exploitent la richesse spectrale de l'image hyperspectrale et parfois ses informations de contexte spatial.

Dans cette présentation, on se place dans la perspective d'une future mission spatiale HYPXIM [2] composée d'une caméra hyperspectrale et d'une caméra panchromatique dotée d'une meilleure résolution spatiale, et recalées entre elles. S'ouvre alors la possibilité d'utiliser cette dernière caméra pour concevoir de nouvelles méthodes de démixage tirant parti de la meilleure résolution spatiale de l'image panchromatique.

La méthodologie originale présentée consiste dans un premier temps en la détection des pixels purs (c.-à-d. couverts par un unique matériau) dans l'image hyperspectrale, grâce à un critère d'homogénéité appliqué sur l'image panchromatique. Une étape de classification permet de regrouper les pixels purs ainsi obtenus en classes de matériaux. Les spectres représentatifs de ces différentes classes sont alors utilisés comme pôles de mélange pour effectuer le démixage spectral. Cette première approche conduit à la même limitation que les autres méthodes de démixage fondées sur l'hypothèse de pixel purs, c'est-à-dire qu'elle ne permet pas d'extraire les spectres des matériaux non représentés par des pixels purs dans l'image observée. Dans le cas présent, une méthode est ensuite proposée pour compléter l'ensemble des pôles de mélange trouvés précédemment. Pour tester ces méthodes, une image hyperspectrale et une image panchromatique sont simulées aux caractéristiques d'HYPXIM-P, à partir d'images hyperspectrales aéroportées. Les performances de ces méthodes sont comparées à celles de méthodes standard de la littérature.

[1] Bioucas-Dias, J. et al. Hyperspectral unmixing overview: geometrical, statistical and sparse regression-based approaches *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **2012**, 5, 354-379

[2] Carrère, V. et al. The french eo high spatial resolution hyperspectral dual mission hypxim – an update, *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, **2014**

SOL ET PLANETOLOGIE

Identification et caractérisation de minéraux : une procédure automatique de traitement d'image hyperspectrale

Ronan Rialland¹, Rodolphe Marion¹, Charles Soussen², Véronique Carrere³

¹Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives, CEA/DAM/DIF, F-91297 Arpajon, France ;

²L2S, CentraleSupélec-CNRS-Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91192 Gif-sur-Yvette, France ;

³LPG Nantes, Université de Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes CEDEX 3, France ;

Le développement de nouveaux capteurs hyperspectraux, aériens ou satellitaires, permet d'envisager, dans le cadre de la surveillance environnementale, l'étude minéralogique aussi bien de larges zones géologiques que de sites industriels. En effet, les spectres de réflectance des minéraux, dans les domaines VNIR (Visible Near-InfraRed) et SWIR (Short-Wave InfraRed) donnent accès à de nombreuses de leurs propriétés physiques et chimiques.

Dans le cadre de travaux précédents, la procédure AGM [1] [2] (Automatized Gaussian Model) a été mise en place pour permettre un traitement automatique des images en réflectance sans connaissances expertes a priori dans le but d'extraire plusieurs informations minéralogiques. Cette procédure se base sur le modèle paramétrique EGO [3] [4] (Exponential Gaussian Optimization) qui permet de décomposer un spectre de réflectance de minéral en une somme d'un continuum et de plusieurs gaussiennes modifiées. Ainsi, ces dernières correspondent aux différentes absorptions du spectre et l'exploitation de leurs paramètres permet d'accéder à des informations comme la composition chimique, la concentration, la granulométrie. L'étude du continuum permet quant à elle d'accéder à des propriétés comme l'humidité ou l'état de surface du minéral.

L'objectif de ce travail est de présenter les évolutions de la procédure AGM qui s'articulent autour de trois principaux axes. Tout d'abord, le développement et l'intérêt d'un modèle de bruit dépendant du signal sont mis en évidence. Ensuite, une procédure complète, automatique et modulaire de traitement de spectres de réflectance pour l'estimation des paramètres du modèle EGO est proposée. Cette procédure utilise en particulier une approche parcimonieuse [5] pour la reconstruction des absorptions ainsi qu'une approche par moindres carrés non linéaire telle que l'estimation optimale [6] pour ajuster le spectre complet et obtenir les incertitudes sur l'estimation des paramètres. Enfin, une approche par logique floue [7], utilisant un ensemble de lois expertes et les incertitudes estimées à l'étape précédente, est mise en œuvre pour l'identification et la caractérisation des minéraux.

Les principales évolutions de la procédure AGM sont validées sur des données simulées et appliquées à des cas réels, spectres et/ou images hyperspectrales. Un accent est également mis sur la possible utilisation de la procédure pour la gestion des mélanges spectraux et son fort potentiel pour la caractérisation de minéraux. Tous ces résultats seront présentés lors des journées SFPT-GH.

Références :

- [1] Rodolphe Marion and Véronique Carrere. Mineral mapping using the Automatized Gaussian Model (AGM) - Application to two industrial french sites at Gardanne and Thann. *Remote Sensing*, 10(1), 2018.
- [2] Martin Brossard, Rodolphe Marion, and Véronique Carrere. Deconvolution of swir reflectance spectra for automatic mineral identification in hyperspectral imaging. *Remote Sensing Letters*, 7(6) :581{590, 2016.
- [3] Loredana Pompilio, Giuseppe Pedrazzi, Maria Sgavetti, Edward A. Cloutis, Michael A. Craig, and Ted L. Roush. Exponential Gaussian approach for spectral modeling : The EGO algorithm I. Band saturation. *Icarus*, 201(2) :781 { 794, 2009.
- [4] Loredana Pompilio, Giuseppe Pedrazzi, Edward A. Cloutis, Michael A. Craig, and Ted L. Roush. Exponential Gaussian approach for spectral modelling : The EGO algorithm II. Band asymmetry. *Icarus*, 208(2) :811 { 823, 2010.
- [5] Thi Thanh Nguyen, Charles Soussen, J_er^ome Idier, and El-Hadi Djermoune. An optimized version of non-negative OMP. In XXVIe Colloque GRETSI Traitement du Signal & des Images, GRETSI 2017, Juan-les-Pins, France, September 2017.
- [6] Albert Tarantola. *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.
- [7] Jean-Philippe Poli and Laurence Boudet. A fuzzy expert system architecture for data and event stream processing. *Fuzzy Sets and Systems*, 343 :20 { 34, 2018. Special Issue : Fuzzy Logic and Applications, Selected Papers from the French Fuzzy Set Conference LFA 2015.

Minéralogie de zones de cisaillement dans Valles Marineris, Mars, et évolution géologique

Frédéric SCHMIDT¹, Joanna GURGUREWICZ², Daniel MEGE²

¹ Géosciences Paris-Sud, UMR CNRS-UPS 8148, Orsay, France

² Space Research Centre PAS, Varsovie, Pologne

Valles Marineris est un complexe de canyons de 4000 km de long et jusqu'à 10 km de profondeur, situé à l'équateur de Mars. La présence de dykes orientés E-W de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur dans les parties les plus profondes du canyon d'Ophir Chasma indique que des kilomètres de substrat rocheux ont dû être érodés dans cette partie de Valles Marineris [1]. Nous rapportons l'existence de zones de cisaillement fragile-plastique dextres, orientées NE-SW, exposées de la même manière dans les parties les plus profondes d'Ophir Chasma, ainsi que de Hebes Chasma. Nous discutons leur identification, leur cinématique, leur âge, la nature de la roche déformée et leur rôle dans l'évolution tectonique et géomorphologique de Valles Marineris. Nous insistons sur les informations minéralogiques apportées par l'analyse des données hyperspectrales de l'instrument CRISM à bord de Mars Reconnaissance Orbiter.

Les cisaillements affectent vraisemblablement des roches du socle. Leur caractérisation est rendue difficile par les affleurements de la formation « dépôts intérieurs stratifiés » (ILD), qui les recouvrent, d'albedo similaire, et par l'abondance de sables noirs qui drapent l'ensemble. Les ILD ne semblent pas déformés. Les roches de socle sont claires, massives mais intensément fracturées et apparaissent mécaniquement résistantes. Un facies de pseudotachylite est parfois observé. Les ILD sont suffisamment abondants et distribués de telle façon qu'ils dominent les spectres CRISM dans le proche infrarouge, avec une signature de sulfates [2]. Les affleurements des unités de socle rappellent une unité précédemment identifiée dans les versants de Coprates Chasma, interprétée également comme du socle, ou comme un complexe magmatique intrusif, directement recouvert par l'épaisse succession volcanique stratifiée qui constitue la roche de surface du plateau autour de Valles Marineris [3]. L'analyse de la minéralogie du socle identifié dans Coprates Chasma a révélé du pyroxène et du plagioclase à faible teneur en calcium [4,5]. Des affleurements semblables ont été reconnus parmi les roches exhumées dans certains pics centraux de cratères d'impact ailleurs sur Mars [6, 7]. Nous montrons en quoi l'analyse des cubes hyperspectraux CRISM aide à estimer la composition de l'unité de socle dans Ophir Chasma, et discutons les implications géologiques.

[1] Mège D et al. (2017) 48th LPSC, 1087 [2] Wendt L. et al. (2011) Icarus 213, 86-103. [3] Williams J.-P. et al. (2003), Geophys. Res. Lett. 30, 1623. [4] Flahaut J. et al. (2012) Icarus 221, 420-435. [5] Viviano-Beck C.E. et al. (2017) Icarus 284, 43-58. [6] Ding N., et al. (2015) Icarus 252, 255-270. [7] Brustel C. et al. (2018) EPSC Abstracts 12, EPSC2018-804.

Détection de sols pollués aux hydrocarbures à partir d'images hyperspectrales

Véronique Achard^a, C. Elin^a, Dominique Dubucq^b,

^aONERA - The French Aerospace Lab., 2 Av. Edouard Belin, 31000 Toulouse, France

^bTOTAL, avenue Larribau, 64000 Pau, France

La détection des hydrocarbures onshore est d'un intérêt primordial que ce soit dans un contexte HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) ou exploration. Leur présence peut en effet être due à une pollution accidentelle ou provoquée intentionnellement, ou encore être occasionnée par des suintements naturels indiquant la présence de bassin pétrolifère. Lorsque les hydrocarbures (désigné par « HC » par la suite) ne sont pas visibles en surface, certains indices peuvent indiquer de façon indirecte une présence éventuelle d'HC dans le sol, car ils peuvent avoir un impact sur la végétation ou sur la minéralogie du sol. Dans ce cas présent, on s'intéresse à la détection des HC lorsque qu'ils sont présents en surface, soit en recouvrant le sol, soit l'imprégnant (mélange intime sol/HC).

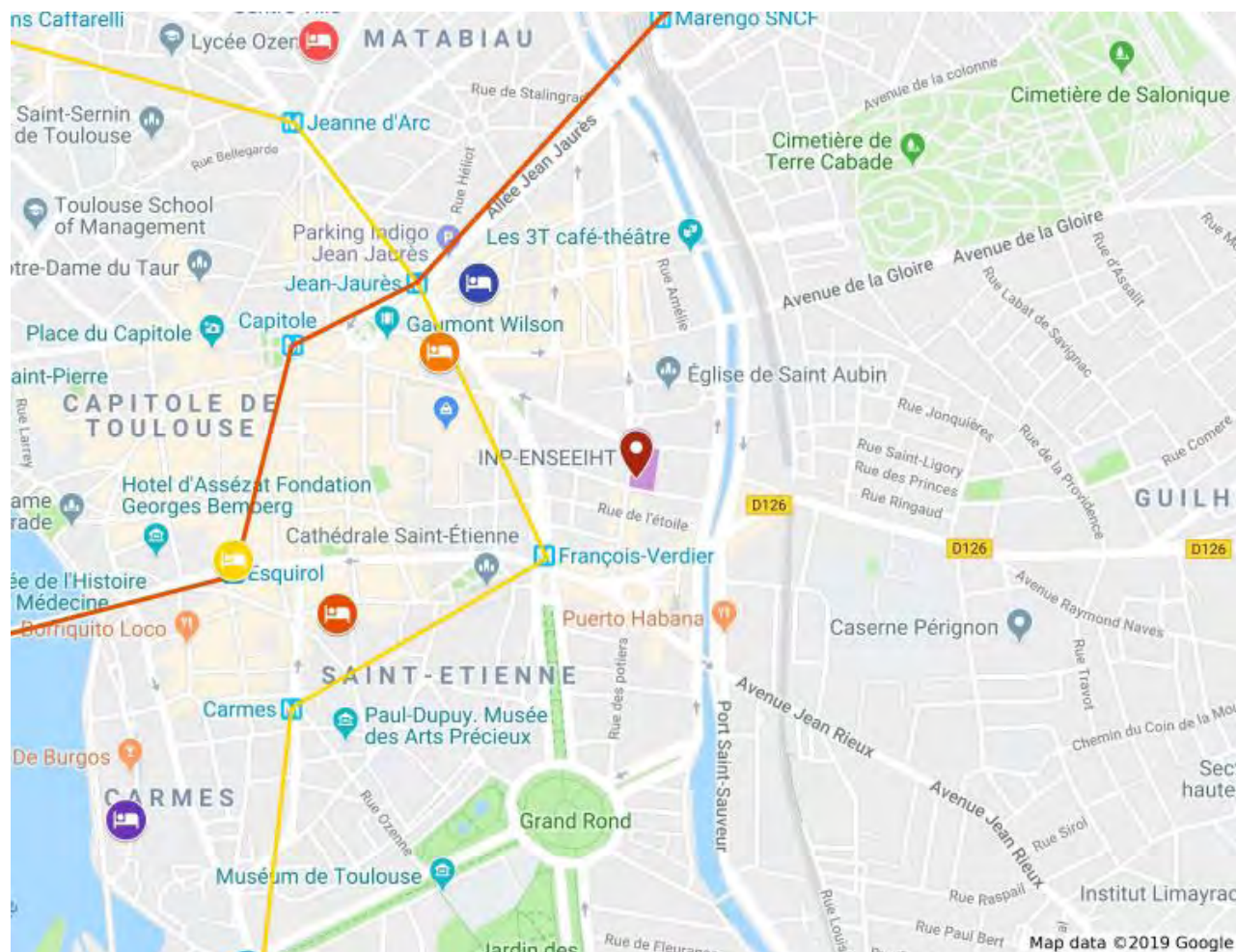
Dans le domaine SWIR (Short Wave InfraRed), les matériaux hydrocarbonés présentent des caractéristiques spectrales qui peuvent permettre de les détecter, les principales étant la bande d'absorption vers 1,73 μm (bande de vibration de la liaison C-H) et la bande autour de 2,3 μm (combinaison de bandes de vibration C-H). L'imagerie hyperspectrale, grâce à sa haute résolution spectrale, doit permettre la détection de ces caractéristiques spectrales. Des indices spectraux ont été définis et ont montré leur potentiel à détecter les HC en mélange avec le sol [1]. Cependant ces bandes d'absorption ne sont plus visibles si les HC sont trop anciens et biodégradés. De plus, d'autres matériaux hydrocarbonés présentent des bandes d'absorption similaires, tels que les plastiques et la végétation sèche.

Dans ce travail, des méthodologies pour la détection non supervisée et automatique des HC sont présentées. Elles ont été appliquées à trois cas d'études : une zone tropicale (« TROPIC ») comportant un bournier d'HC ancien et très bio-dégradé, une zone tempérée comportant une petite surface de terre argileuse polluée aux HC (« TEMP ») et une zone affectée par la pollution due à la marée noire consécutive à l'explosion de la plateforme pétrolière Deep Water Horizon (« DWH »). Les méthodologies mises en œuvre comportent des méthodes de détection d'anomalies, ce qui se justifie dans les cas où la proportion de surface affectée par les HC est faible, les pixels impactés étant alors des événements rares dans l'image, et/ou des calculs d'indices spectraux. Un nouvel indice HC basé sur la bande à 1,73 μm est proposé, plus robuste au bruit et moins sensible à la position exacte de la bande d'absorption (qui varie avec la composition des HC), que les indices définis dans la littérature. Ces méthodes sont éventuellement complétées par des tests, adaptés au contexte, visant à réduire les taux de fausses alarmes. Dans le cas DWH, la méthode proposée permet d'obtenir une carte des côtes polluées, qui est en très bon accord avec celle établie à l'aide d'observations sur le terrain et avec celles obtenues par des méthodes non automatiques [2] ou nécessitant des mesures in-situ [3]. Dans le cas TROPIC, le bournier est détecté avec une seule fausse alarme [4]. Le cas TEMP est plus complexe car la pollution est faible (environ 2,5 % massique) et ancienne, et la zone de sol nu affectée est très petite. Les résultats de détection sont malgré tout satisfaisants, et comportent un nombre faible de fausses alarmes.

- [1] Kühn, F. "Hydrocarbon Index - An algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons". Int. Journal of Remote Sensing - 25, 2467-2473, (2004).
- [2] Arslan, M. D, Oil Spill Detection and Mapping Along the Gulf of Mexico Coastline Based on Imaging Spectrometer Data. Texas: Texas A & M University PhD report, 2013
- [3] Kokaly, R. F., B. R. Couvillion, J. A. M. Holloway, D. A. Roberts, S. L. Ustin, S. H. Peterson, S. Khanna, S.C. Piazza, Spectroscopic remote sensing of the distribution and persistence of oil from the Deepwater Horizon spill in Barataria Bay marshes. Remote Sensing of Environment, 129, 210-230, 2013
- [4] V. Achard, S. Fabre, A. Alakian, D. Dubucq, P. Déliot, Direct or indirect on-shore hydrocarbon detection methods applied to hyperspectral data in tropical area, Proc. SPIE 10790, 2018, doi: 10.1117/12.2325097

ACCÈS À L'ENSEEIH

Entrée 2 rue Camichel, 31000 Toulouse



Lieu du colloque

 SFPT - GH 2019

 INP-ENSEEIH

Hôtels

-  Privilège Hôtel Mermoz
-  Hôtel Croix Baragnon
-  Hôtel Ibis Centre
-  Hôtel Le Père Léon
-  Hotel Castellane
-  Hôtel ROYAL WILSON
-  ResidHotel

Transports

-  Terminus Aéroport
-  Terminus Palais de justice
-  Tramway
-  Metro Ligne A
-  Metro Ligne B

DÎNER

Brasserie Les Arcades – mardi 9 juillet – 20H

14 place du Capitole, Toulouse

