

## EDITORIAL

### Pourquoi un numéro spécial IMAGERIE HYPERSPECTRALE ?

L'objectif de ce numéro spécial de la RFPT est d'illustrer à travers un choix de publications les travaux menés par la communauté scientifique et industrielle française dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale.

En effet, la communauté française est très impliquée depuis plus de vingt ans dans l'utilisation des données de télédétection hyperspectrales sur une couverture large d'applications concernant différents domaines thématiques (végétation et sciences du sol, écosystèmes côtiers et lacustres, géosciences et sciences de la terre solide, milieu urbain, cryosphère et atmosphère), en traitant du domaine du traitement du signal et de l'image, et enfin du plan technique et technologique. Le Séminaire de Prospective Scientifique (SPS) du CNES avait recommandé dès 2004 la mise en place d'une étude afin de caractériser les besoins des chercheurs dans ces divers secteurs, alors que le Groupe de travail Hyperspectral de la Défense (GTHS) mis en place la même année par l'Etat-major des Armées (EMA) s'intéressait à son intérêt applicatif dual. A l'initiative du CNES, le Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH), coordonné par le CEA, a regroupé l'ensemble de la communauté nationale (publique et privée, civile et de défense) d'avril 2007 à septembre 2008 afin de caractériser le besoin des utilisateurs en données hyperspectrales et de s'interroger sur l'intérêt d'une mission spatiale dédiée à cette technologie. La France se classant dans le groupe de tête au niveau international en nombre de publications scientifiques dans ce domaine, il était donc **naturel de consacrer un numéro spécial de la RFPT à cette spécialité et à sa communauté.**

Jusqu'à récemment, les scientifiques se sont surtout appuyés sur l'utilisation de données aériennes acquises par les laboratoires et quelques rares sociétés de service spécialisées, par manque de capteurs satellites équipés d'instruments hyperspectraux. Ces données aéroportées permettent de combler l'écart entre les mesures de terrain et les mesures prises à plus faible résolution spatiale et échantillonnage spectral par les satellites actuels. Elles permettent également une excellente maîtrise de l'ensemble de la chaîne de traitement, depuis les mesures des observables en laboratoire et in situ, jusqu'à l'information extraite de l'image traitée. Leurs limites résident dans leur couverture au sol limitée, et dans la complexité de traitements géométriques et radiométriques qui réduisent la généralité des modèles et la généralisation des applications. Ces données ont cependant permis d'illustrer tout un panel d'applications spécifiques et sont largement utilisées pour préparer les futures missions spatiales.

Avec l'arrivée de nouveaux satellites hyperspectraux, PRISMA (Italie), lancé le 22 mars 2019, EnMAP (Allemagne), mis en orbite le 1er avril 2022, ainsi que les capteurs accueillis par la station spatiale internationale (HISUI, DESIS, EMIT), la communauté scientifique bénéficie depuis peu de données récurrentes acquises sur le domaine visible, proche infrarouge et pour certains capteurs jusqu'à l'infrarouge à courtes longueurs d'onde, avec une résolution spectrale (10-20 nm) et spatiale (30 m) fines, un échantillonnage spectral important (5-20 nm) et une fauchée appréciable (30 km) qui viennent compléter les moyens aéroportés et les drones déjà en place. Ces missions spatiales expérimentales participent au développement de pré et post-traitements appropriés afin de répondre à de nombreux défis scientifiques et thématiques. Elles préparent également à l'utilisation de la future mission opérationnelle CHIME (*Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment*) qui prendra place, dès 2029, au sein de la constellation Sentinel du programme Copernicus de l'Union Européenne (Copernicus Sentinel Expansion missions) mise en œuvre par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), qui fonctionnera en synergie avec la future mission opérationnelle SBG (Surface Biology and Geology) de la NASA, dont la mise en orbite est prévue pour 2027.

Ce numéro spécial sur l'Imagerie hyperspectrale est d'autant plus important que nous sommes arrivés, en ce moment précis, à **un tournant historique** dans lequel, aux données aériennes utilisées depuis une quarantaine d'années vont s'ajouter celles des premiers satellites hyperspectraux adaptés aux besoins alors même que l'Europe travaille à la mise en place d'une filière spatiale opérationnelle qui va favoriser l'émergence de nouvelles applications.

### Une communauté de scientifiques français qui a su se fédérer.

L'imagerie hyperspectrale est issue des techniques de la spectroscopie optique utilisées afin de décomposer, généralement via un prisme ou un réseau, le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les surfaces dans le domaine optique situé entre 350 et 12 000 nm. Des méthodes d'analyse adaptées aux données hyperspectrales (grande dimensionnalité, continuité du domaine spectral couvert) permettent alors de caractériser les matériaux composant ces surfaces. Le passage à des instruments imageurs est relativement récent, leur utilisation pour la télédétection date des années 1980.

En 1980, l'embarquement aéroporté d'un spectromètre de laboratoire a permis de mesurer, à la verticale de l'avion, des lignes d'échantillons de signatures hyperspectrales d'un paysage forestier dans l'objectif d'identifier diverses espèces et étudier leur état sanitaire. Cette technique a très vite évolué vers la génération d'images, notamment avec les projets AIS puis AVIRIS du Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA à partir de 1982. L'offre de divers capteurs aéroportés n'a cessé d'augmenter depuis avec notamment les instruments CASI (1990), DAIS et HYMAP (1994), APEX (2008), etc.

Autour des années 2000, les projets spatiaux hyperspectraux se sont orientés prioritairement vers des capteurs à basse résolution spatiale (MERIS sur ENVISAT, MODIS sur TERRA, OLCI sur Sentinel-3) dédiés plus particulièrement à des mesures de la couleur des océans. A la même période quelques démonstrateurs technologiques fournissant des données à la résolution de 30-50 m sur des fauchées d'une dizaine de kilomètres (HYPERION sur EO-1, CHRIS sur PROBA-1) sont testés en orbite pour répondre à une demande scientifique exigeante.

Il a fallu attendre 2018 pour que des systèmes spatiaux plus performants, plus proches du besoin des utilisateurs aboutissent, avec EnMAP et PRISMA, et l'installation des capteurs DESIS (Allemagne, 2018), HISUII (Japon, 2019) et EMIT (USA, 2022).

C'est dans un contexte de pénurie de données adaptées que s'est créé en 2008, comme mentionné précédemment, le GSH qui a recommandé au CNES l'étude d'un satellite hyperspectral de nouvelle génération répondant aux besoins de la communauté civile et aux besoins duaux de la Défense. Un groupe de mission scientifique multithématique et Défense a été mis en place pour définir la mission du projet HYPXIM. A la fin de cette étude d'avant-projet, afin de capitaliser les acquis et de maintenir la synergie de l'équipe, le Groupe Hyperspectral (SFPT-GH) a été créé au sein de la SFPT.

Les objectifs de ce groupe ont pour but de :

- Fédérer la communauté nationale impliquée dans la télédétection hyperspectrale terrain, aéroportée et satellite,
- Favoriser la mise en relation des utilisateurs de données hyperspectrales,
- Promouvoir la mise en place de moyens d'acquisition d'imagerie hyperspectrale,
- Animer, sensibiliser et former les utilisateurs potentiels : colloques, ateliers de formations, écoles d'été...
- Identifier et exprimer les besoins scientifiques en rapport avec l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale,
- Apporter une expertise scientifique aux techniques hyperspectrales,
- Fédérer les besoins et les moyens pour des campagnes de validation de concepts,
- Et, plus généralement favoriser le développement de l'imagerie hyperspectrale.

La SFPT-GH a participé depuis sa création aux réponses coordonnées de divers appels d'offres comme celui d'Earth Explorer de l'ESA, aux études du TOSCA qui est le groupe thématique CNES-CNRS qui anime la préparation des missions scientifiques décidées ou à venir, et aux dossiers pour le Séminaire de Prospective Scientifique du CNES. La SFPT-GH assure également une présence active au sein du groupe de mission CHIME, et est partie prenante des groupes de missions des avant-projets et projets que le CNES conduit dans le cadre de l'imagerie hyperspectrale, comme le projet dual HYPSP en 2021 et 2022.

La SFPT-GH organise un colloque annuel qui permet aux membres de présenter les résultats des recherches en cours. Les colloques de la SFPT-GH permettent à de jeunes chercheurs et des scientifiques reconnus du domaine de présenter leurs travaux, de se rencontrer et d'échanger. Sept colloques se sont déroulés depuis 2011. Après un arrêt de 2020 à 2022 dû à la crise sanitaire, le 8<sup>ème</sup> colloque est programmé les 5 et 6 juillet 2023 :

- 2011 : Paris, colloque inaugural organisé par Stéphane Jacquemoud (IPGP)
- 2012 : Toulouse, organisé par Xavier Briottet (ONERA)
- 2014 : Porquerolles, organisé par Audrey Minghelli-Roman (LSIS, Université de Toulon)
- 2016 : Grenoble, organisé par Mauro Dalla Mura et Jocelyn Chanussot (GIPSA-lab, Université de Grenoble) et Sylvain Douté (IPAG)
- 2017 : Brest, organisé par Toura Bajjouk (Ifremer)
- 2018 : Montpellier, organisé par Jean-Baptiste Féret (INRAE)
- 2019 : Toulouse, organisé par Karine Adeline (ONERA)
- 2023 : Paris, organisé par l'Université Paris Cité (en préparation)

Ces manifestations regroupent environ 80 scientifiques. Elles sont accompagnées de sessions orales et de poster, de conférences d'invités de marque, d'exposants qui viennent faire la démonstration de leurs technologies matérielles ou logicielles les plus récentes et, pour certaines années, d'écoles d'été. Plus d'informations sont à retrouver sur le portail du groupe hyperspectral (<https://www.sfpt.fr/hyperspectral/>).

Le projet de ce numéro spécial de la RFPT a été présenté lors du 7<sup>ème</sup> colloque et il a été élaboré majoritairement par les publications proposées par ses participants suite aux appels formulés en 2020 et 2021.

### Contenu du numéro spécial sur l'imagerie hyperspectrale

Ce numéro spécial ne prétend pas à l'exhaustivité mais présente un échantillon représentatif des activités scientifiques et techniques menées en France ces dernières années. Il se divise en deux grandes familles d'articles. Le premier groupe, composé de trois publications donne la parole aux maîtres d'œuvres et maîtres d'ouvrages des systèmes spatiaux étudiés et développés en Europe.

- *Ferran Gascon (ESA) et al*, présentent CHIME, satellite porteur d'un instrument hyperspectral performant qui prendra sa place au sein de la nouvelle génération de la constellation Copernicus en 2029.
- *Frédéric Pistone (TAS) et al*, décrivent les divers projets de satellites hyperspectraux qui ont permis au groupe industriel de se hisser en quelques années comme un des experts majeurs mondiaux dans ce domaine.
- *Marie-José Lefèvre-Fonollosa (CNES) et al*, présentent un article de synthèse qui retrace les principales étapes conduites par le CNES en partenariat avec la DGA, pour coordonner les diverses composantes françaises de la recherche et de l'industrie autour d'études qui doivent conduire à terme au développement d'un satellite hyperspectral de nouvelle génération.

Le deuxième groupe est constitué d'articles scientifiques qui illustrent quatre secteurs représentatifs du domaine.

- Une instrumentation performante est une condition indispensable dans le domaine de la télédétection et plus particulièrement pour l'imagerie hyperspectrale dans le domaine infrarouge. *Olivier Gazzano (ONERA) et al*, présentent un article sur l'instrument aéroporté hyperspectral infrarouge thermique SIELETTERS développé par l'ONERA avec le soutien de la DGA.
- La mission spatiale BIODIVERSITY a été soumise au SPS (Séminaire de Prospective Scientifique) en 2019 et retenue dans les quatre priorités programmatiques du CNES. *Xavier Briottet (ONERA) et al*, décrivent cette mission dont objectif principal est la caractérisation et le suivi de la biodiversité végétale (surface continentale, milieu côtier) via des mesures hyperspectrales à la résolution spatiale de 8 m.
- Les outils de traitement d'images hyperspectrales comprennent outre des procédures spécifiques de corrections géométriques, radiométriques et atmosphériques, des méthodes d'extraction de signatures spectrales ou l'utilisation de bibliothèques spectrales. Dans le futur, une des voies d'amélioration des données est la combinaison d'une voie panchromatique à très haute résolution spatiale avec des bandes hyperspectrales moins résolues. *Yohan Constans (IRAP, ONERA) et al*, publient leur travail sur la fusion Pan-hyper basée sur une nouvelle méthode bien adaptée à des paysages hétérogènes comme les milieux urbains.
- Les images hyperspectrales répondent aux besoins d'études environnementales dans un grand nombre de thématiques. Avec l'accroissement démographique dans les zones urbanisées, les problématiques sont variées et complexes. L'utilisation de données hyperspectrales ouvrent un nouveau champ d'investigation avec des enjeux applicatifs importants. *Christiane Weber (AgroParisTech) et al* présentent une synthèse des résultats obtenus dans le cadre de l'ANR HYPE dont l'objectif était de montrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale par rapport aux techniques d'imagerie multispectrale pour l'étude des milieux urbains.

L'imagerie hyperspectrale entre désormais dans une nouvelle phase avec la récente mise à disposition des données des capteurs spatiaux actuellement opérationnels. Dans les mois et années qui viennent l'apport de ces données devraient conduire à des travaux de recherche touchant une communauté plus large d'utilisateurs. Ils seront suivis par les satellites SBG et CHIME assurant une couverture globale des surfaces continentales et littorales. Cette évolution touche aussi les technologies aéroportées avec le développement de nouvelles caméras compactes qu'on peut aisément embarquer sur

avion et drone, mais aussi par l'arrivée de nouveaux capteurs sensibles dans le domaine émissif. Enfin les acteurs privés ne sont pas en reste, avec par exemple le projet de mission hyperspectrale issu d'un partenariat public-privé entre la NASA et l'opérateur Planet, dans le cadre de la mission Carbon Mapper.

Sur le plan méthodologique, on assiste au développement et à la valorisation de nouveaux outils disponibles librement, ouverts et gratuits, facilitant l'utilisation de ces données, l'apport de méthodes poussées par les capacités de calcul croissantes comme le *deep learning*, qui pourront être combinées avec des approches physiques de modélisation et de simulation de scènes, elles aussi capables de représenter les environnements complexes de plus en plus réalistes et détaillés.

Enfin, sur le plan applicatif, l'utilisation d'un domaine spectral élargi et continu, avec des caractéristiques instrumentales comme un échantillonnage spectral inférieur à 10 nm et une résolution radiométrique améliorée, permet d'obtenir de meilleures performances d'estimation et d'avoir accès à de nouvelles propriétés bio-physico-chimiques décrivant les éléments composant la scène observée. De plus, de futures missions d'une résolution spatiale inférieure à 10 m sont à l'étude ; elles permettront d'avoir une meilleure identification des objets de surface. Cette résolution spatiale, couplée à des caractéristiques spectrales riches, autorisera une meilleure caractérisation des propriétés bio-physico-chimiques non plus à l'échelle du paysage, mais à l'échelle de l'objet d'étude.

Cette évolution devrait permettre de mettre en œuvre une suite à ce numéro spécial sur l'imagerie hyperspectrale, et offrir ainsi une nouvelle opportunité de publication à notre communauté.

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

Coéditeurs du numéro spécial Imagerie Hyperspectrale

Karine ADELINÉ

Xavier BRIOTTET

Jean-Baptiste FERET

Marie-José LEFEVRE-FONOLLOSA