

RETROSPECTIVE DES ETUDES D'AVANT-PROJETS D'IMAGERIE HYPERSPECTRALE MENEES AU CNES POUR LES BESOINS SCIENTIFIQUES

Marie-José Lefèvre-Fonollosa^{1,2}, Aimé Meygret¹, Vincent Lonjou¹

1 : Centre National d'Etudes Spatiales, 18 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse CEDEX

2 : marie.lefevre-fonollosa@outlook.com (Retraitée du CNES)

Résumé :

Entre 2009 et 2022, le Centre National d'Etudes Spatiales a conduit et financé des études préliminaires (phases 0, phases A et phase B1) afin de répondre aux besoins exprimés principalement par la communauté scientifique nationale et par la Défense, qui utilisent des données d'imagerie hyperspectrales à haute résolution spatiale aéroportées à des fins de recherche dans divers domaines thématiques. Les besoins de haut niveau sont : une spectro-imagerie de qualité dans le domaine VNIR-SWIR (400-2400nm) à bande étroites (10-20nm) contiguës et pour une résolution spatiale de moins de 15m. Afin de répondre aux exigences du groupe de mission mis en place à l'occasion de l'avant-projet HYPXIM, divers concepts de systèmes spatiaux ont été envisagés avec le soutien industriel d'Airbus Defence & Space (ADS) et de Thales Alenia Space (TAS) en collaboration avec la Défense. Les trois principaux scénarii étudiés sont présentés dans cet article.: a) HYPXIM-P (P pour Performance) répond strictement aux besoins exprimés en termes d'imagerie hyperspectrale avec un satellite de la classe « mini » (600 kg au lancement) positionné sur une orbite héliosynchrone à 660 km ; b) HYPXIM-C (C pour Challenging) est composé de 2 « micro » satellites de 200kg identiques sur une orbite à 650 km ; c) HYPXIM-D (D pour Démonstrateur) accueille le même instrument que HYPXIM-C (80kg / 110w) mais sa performance de résolution spatiale est identique à celle d'HYPXIM-P grâce à son orbite, dite VLEO, à 360 km d'altitude.

Ce dernier concept, rebaptisé HYPEX-2, a été revisité et proposé en 2017 à l'appel d'offre de l'ESA EE9 par une communauté scientifique élargie au niveau européen. Rebaptisé BIODIVERSITY en 2019, il a été retenu comme un des 4 projets prioritaires de la France lors du dernier séminaire de Prospective Scientifique. Par ailleurs, des opportunités de coopérations internationales sont apparues sur des missions plus ciblées peut-être moins ambitieuses mais répondant à des contraintes de coûts et de masse sévères. Cette étude a été à l'initiative d'actions variées qui se sont déployées dans divers cadres afin de couvrir l'ensemble de la problématique : état de l'art des technologies nano-microsatellites, modélisation du signal physique, études de sensibilité paramétriques en qualité image, études algorithmiques, prédimensionnements instrumentaux, et satellites. Un point sur les travaux les plus avancés est présenté dans cet article.

Mots-clés : Etudes préliminaires de satellites Hyperspectraux, instruments innovants, haute résolution spectrale et spatiale.

Abstract :

Between 2009 and 2022, the National Center for Space Studies conducted and funded preliminary studies (phases 0, phases A and phase B1) in order to meet the needs expressed mainly by the national scientific community and by the Defence which uses imagery data at high spatial resolution hyperspectral imagery (mainly airborne) for research purposes in various thematic areas. High-level requirements of the mission group set up during the HYPXIM preliminary project are, spectral-imagery in the VNIR-SWIR domain (400-2400 nm) with contiguous narrow bands (10nm) for a spatial resolution of less than 15m. During the preliminary studies, three main scenarios were studied and are presented in this article : a) HYPXIM-P (P for Performance) strictly meets the needs expressed with a "mini" satellite class (600 kg at launch), orbiting in a sun-synchronous orbit at 660 km; b) HYPXIM-C (C for Challenging) is made up of 2 identical 200kg « micro » class satellites in orbit around 650 km; c) HYPXIM-D (D for Demonstrator) accommodates the same instrument as HYPXIM-C (80kg / 110w) but, in addition, its spatial resolution performance is identical to that of HYPXIM-P but for a field limited to 8-10 km in due to its VLEO orbit at 360 km.

It is this last concept, renamed HYPEX2, which was revisited and proposed in 2017 to the call for tenders of ESA EE9 by a scientific community enlarged at European level. In 2019, this concept was renamed BIODIVERSITY by the national scientific community and was selected as one of the 4 main projects in France. In addition, opportunities for international cooperation have appeared on more targeted missions, perhaps less ambitious, but responding to severe cost and mass constraints. This study is the starting point for various actions that have been deployed in various settings in order to cover the whole issue: state of the art of nano-micro satellite technologies, physical signal modeling, parametric sensitivity studies in image quality, algorithmic studies, instrument pre-sizing, and satellites. A point on the most advanced works is presented in this article.

Keywords: Preliminary studies of Hyperspectral satellites, innovative instruments, spatial and spectral high resolution.

1. Introduction

Après quasiment 20 ans de stagnation, le contexte international de l'hyperspectral spatial est aujourd'hui en pleine expansion avec 5 nouvelles missions lancées en 2018 et 2022 : HyperScout, nanosatellite des Pays-Bas et de la Belgique associés à l'Agence Spatiale Européenne (Février 2018), GaoFen-5, de l'agence Chinoise (Mars 2018), l'instrument DESIS du Centre Allemand pour l'Aéronautique et l'Astronautique (DLR) sur la station spatiale internationale (Juin 2018), le satellite PRISMA, de l'Agence Spatiale Italienne (mars 2019), ENMAP, du DLR (4 avril 2022).

Par ailleurs les agences comme la NASA (National Aeronautics and Space Administration) avec la mission SBG et l'ESA (Agence Spatiale Européenne) avec la mission CHIME ont programmé des missions hyperspectrales à couverture globale à partir de 2028. L'agence spatiale française, le CNES, a été pionnière dans le domaine même si elle n'a pas, jusqu'à présent, de satellite dédié. En effet, répondant aux besoins exprimés par la communauté nationale scientifique et par la Défense, le CNES a lancé des activités de R&T (Recherche et Technologie) depuis 1999, puis a piloté des études d'architecture système en privilégiant un axe encore aujourd'hui peu exploré, celui de la combinaison entre la haute résolution spectrale (< 10 nm) et de la haute résolution spatiale (< 15m), afin de combler le gap entre les mesures *in situ* et aéroportées à très haute résolution et les mesures spatiales qui sont au mieux à la résolution de 20-30m (Figure 1).

C'est ainsi que se sont positionné les études et avant projets de la mission HYPXIM, puis ses dérivés HYPERX-2, HYSP, HYPE et BIODIVERSITY conduits en étroite collaboration avec la Défense, les laboratoires et les industriels français, Airbus Defence and Space (ADS) et Thales Alenia Space (TAS).

2. Historique des études du CNES sur l'imagerie hyperspectrale pour les besoins scientifiques

Les séminaires de prospective scientifiques (SPS) du CNES sont organisés tous les cinq ans avec l'ensemble de la communauté scientifique utilisatrice des données spatiales. Cet exercice réalise le bilan des activités scientifiques et techniques menées depuis le séminaire précédent et décide des grandes orientations de la recherche spatiale en France pour les 4 à 5 années suivantes (Figure 2).

Les besoins de la communauté scientifique française en données hyperspectrales ont été exprimés depuis le début des années 2000 :

- **2004** : dans ses conclusions, le séminaire de Paris, a recommandé d'évaluer pour le long terme les besoins pour une mission d'imagerie hyperspectrale. Cela a conduit à la mise en place par le CNES d'un groupe de travail multithématique et dual, chapeauté par le CEA, le GTHS (Groupe de Travail HyperSpectral);
- **2009** : au séminaire de Biarritz, suite à la présentation des conclusions du GTHS, il a été recommandé de consolider les besoins d'une mission spatiale hyperspectrale en conduisant à une étude de Phase 0.

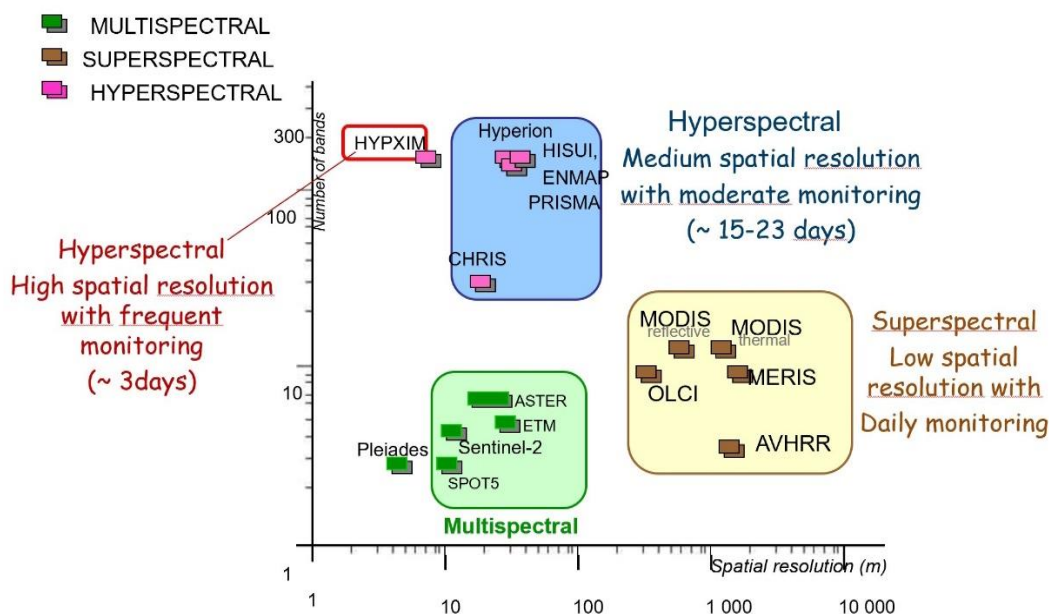


Figure 1: Positionnement des performances d'HYPXIM dans le paysage des satellites multi et hyperspectraux.

La mission HYPXIM, qui fera l'objet des propositions HYPEX puis HYPEX-2 aux programmes Earth Explorer 8 et 9 de l'ESA ;

- **2014** : au séminaire de la Rochelle, la mission HYPXIM du CNES combinant à la fois la haute résolution spatiale et spectrales est présentée à la communauté spatiale et ressort comme une priorité à moyen terme pour la communauté scientifique. Plusieurs recommandations sont proposées comme la consolidation des besoins de la mission à travers des acquisitions aéroportées et des simulations du futur satellite HYPXIM, ainsi que des activités algorithmiques de traitements de données ;

- **2019** : Séminaire du Havre, le concept BIODIVERSITY (issue de l'avant-projet HYPEX-2) fait partie des 4 missions recommandées par la communauté scientifique.

Entre les SPS de 2009 et 2019 trois types d'activités ont été menées par le CNES et ses partenaires :

A/ Les études de concepts système (avant-projets satellites en phases 0 et A) menées par le CNES avec le support des industriels ADS et TAS. C'est dans ce cadre que se sont menés les phases 0/A HYPXIM, HYPEX, VLEO-HYPERION et les études en coopérations internationales comme HYPSP ; ce volet est plus spécifiquement développé dans cet article ;

B/ Des activités techniques et technologiques dans le cadre du programme Pluriannuel de Recherche et Technologie du CNES (PPRT), conduites auprès : (i) d'industriels équipementiers (spectromètre compact, optimisation de détecteurs HgCdTe, études de filtres,...); (ii) d'entreprises de service du numérique (compression hyperspectrale, intelligence artificielle à bord, simulateurs

physiques,...); (iii) et de laboratoires techniques spécialistes de modélisations physiques et d'algorithmes de traitement d'image (classifications, fusions de données complémentaires, ...);

C/ Des projets scientifiques thématiques dans le cadre du programme Ad Hoc (APR) piloté par le CNES et comité TOSCA. Ce sont des activités d'accompagnement et de validation souvent basées sur du travail de terrain et des données aéroportées. Ces études s'adressent plus particulièrement aux laboratoires thématiques impliqués dans les avant-projets.

2.1 Constitution du groupe thématique Hyperspectral de la SFPT (SFPT-GH)

Le groupe de mission d'HYPXIM coordonné par Véronique Carrère de l'Université de Nantes a été mis en place en 2009 par le CNES pour rédiger les spécifications de besoin scientifique (MRD, Mission Requirement Document). En 2012, à l'issue de la phase 0/A, ce collectif s'est constitué en groupe thématique de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, le Groupe Hyperspectral (SFPT-GH), qui a pour vocation de coordonner l'animation de la recherche dans le domaine en répondant notamment aux appels d'offres annuels et en incitant les chercheurs à publier dans des revues nationales et internationales.

Le groupe, véritable vitrine nationale de la recherche dans le domaine, organise également un colloque pris en charge tous les ans par un de ses membres : Paris, 2013 (IPGP), Toulouse 2014 (ONERA), Porquerolles 2015 (Université de Toulon), Grenoble, 2015 (Université de Grenoble), Brest, 2017, (IFREMER), Montpellier, 2018 (IRSTEA), Toulouse, 2019 (ONERA et l'INP-ENSEEIH).

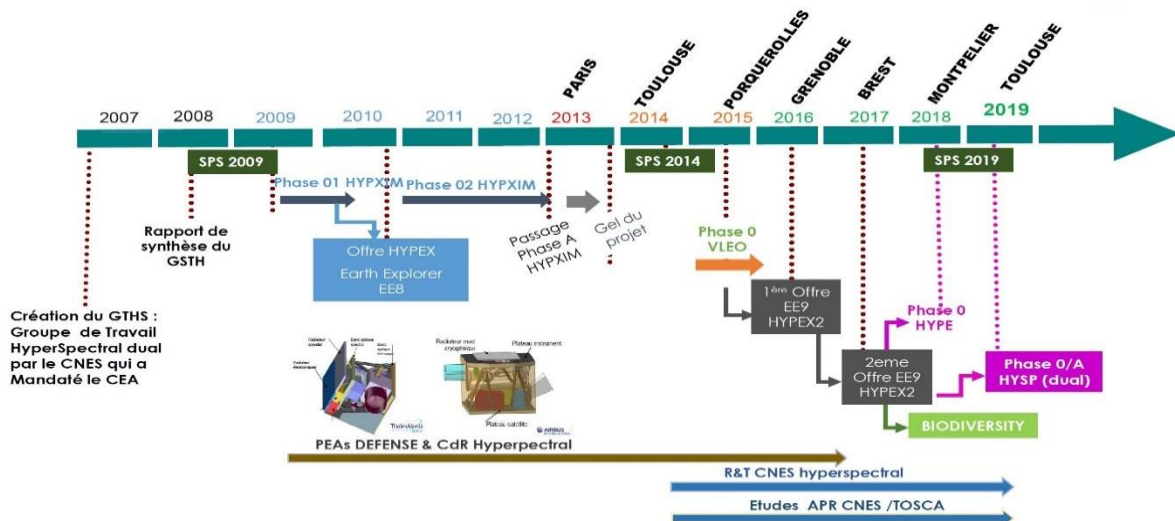


Figure 2 : Rétrospective des études menées par le CNES entre 2007 et 2021.

La SFPT-GH a été régulièrement mise à contribution lors des avant-projets du CNES et de la DGA ou des propositions de missions dans le cadre des appels d'offres de l'ESA (Earth Explorer 8 et 9) et il s'est constitué, selon le contexte, en groupe de mission pour la mission HYPEX (coordinatrice Véronique Carrère de l'Université de Nantes), puis HYPEX-2, HYSIP, BIODIVERSITY (coordinateur Xavier Briottet de l'ONERA).

Par ailleurs, le groupe SFPT-GH a piloté de nombreux projets d'accompagnement thématique dans le cadre des APR du CNES et du TOSCA, et il est intervenu en supports aux études technico-thématiques du programme de R&T du CNES.

2.2 Programme d'accompagnement thématique (APR CNES/TOSCA).

Chaque année, le CNES lance un appel à propositions de recherche (APR) auprès des laboratoires thématiques spécialistes de l'utilisation des données spatiales. Les propositions du domaine des sciences de la Terre, Environnement et Climat sont examinées par le comité TOSCA (Terre, Océan, Surfaces continentales, Atmosphère), constitué d'experts chargés de l'évaluation des besoins spatiaux des différentes disciplines. Vis-à-vis de ce programme annuel de recherche, six projets thématiques coordonnés par le SFPT-GH ont notamment été sélectionnés à partir de 2014, pour l'accompagnement de la mission HYPXIM dans le cadre de recherches validant les besoins de la mission (Tableau 1). Les thèmes sélectionnés illustrent des problématiques d'environnement critiques, comme la perte de la biodiversité, ou la dégradation des sols, pour lesquelles, les données hyperspectrales sont jugées indispensables. Ces projets couvrent les objectifs prioritaires de la mission d'HYPXIM. Ils reposent sur des études terrain, de la modélisation physique et des campagnes aéroportées. Ils visent particulièrement à consolider les besoins en termes de résolution spatiale et de rapport signal à bruit.

D'autres projets de recherche ont été sélectionnés à partir de 2017, comme :

-HyperBIO (IRSTEA, INRA, ONERA) basé sur des images aéroportées pour l'identification des espèces d'arbre et l'estimation de variables de Biodiversité sur des zones forestières.

-HyperMED (ONERA, CESBIO, University of California Davis et Berkeley) a pour but de montrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour des missions HYPXIM et HYSPIRI pour la caractérisation de l'état de santé des forêts clairsemées de type méditerranéennes.

-BIOHERM (BIOdiversité Hyperspectrale et Etat des Récifs d'herMelles, IFREMER, ONERA, GIPSA-Lab, TELECOM) a pour but de discriminer les bio-constructions d'hermelles (*Sabellaria alveolata*) du substrat (rocheux, meuble ou mixte) et d'évaluer leur état de santé.

-HypCoLac (LSIS, LATMOS, Institut Fresnel) cartographie la composition de l'eau (en chlorophylle, matières en suspension et matières organiques dissoutes), la bathymétrie et la composition des fonds aquatiques à partir d'images simulées au-dessus des surfaces d'eau continentales et en zone littorale

-MOLIERE (MOdeLing soll rEfectance as a function of water content, IPGP, ONERA, LPGN, CEA) a pour but d'améliorer modèle de sol MARMIT capable de simuler la réflectance spectrale et directionnelle de sols "rugueux" à différents états d'humidité. Elle impliquera des mesures de laboratoire et de terrain, de la modélisation informatique, et de l'imagerie aéroportée ou satellite.

-IMHYS (Apport de l'IMagerie HyperspectralE satellite pour le suivi des sources d'aérosols anthropiques, ONERA, OMP/LA) a pour but la caractérisation des sources d'aérosols locales d'origine anthropique.

NAME	TOPICS	MAIN OBJECTIVES	LABORATORIES
HYPERTROPIK	FOREST BIODIVERSITY	Consolidation of Hypxim mission for the theme "Biodiversity of Tropical Forests" contribution of 3D radiative transfer model (DART).	CESBIO, CIRAD, AMAP/IRD, ECO&SOIL/INRA, TETIS/Irstea et ESE/Paris Sud
SAMSAT2	RIVER SEDIMENTOLOGY	Bio-optical properties analysis of Amazona delta water from hyperspectral data, in order to modelize the signal of the matters in suspension (MES).	GET (Geoscience & Environment lab of Toulouse)
HUMPER	SOILS DEGRADATION	Spatial resolution needs for the study of soil texture. Setting up a complete simulation chain to compare with different hyperspectral cameras.	ONERA, LISAH/IRD, CESBIO
MiHySpecSol		Impact of Spectral resolution for perennial properties of Mediterranean soils mapping	LISAH/IRD, ITAP/IRSTEA
HYPERCORAL	COASTAL BIOTOPES	Physical environmental parameters extracted from airborne hyperspectral images for mapping and monitoring of fragil habitats reef (Coral reef area -Reunion Island)	LDO, IFREMER, LETG, LPG, SEAS-OI, ESPACE-DEV, ECOMAR
URBHYP	URBAN PLANIFICATION	Hypxim requirements, to provide relevant information with the complexity of the environment for urban development and planning	LIVE, ONERA, in coordination with ANR project HYPE

Tableau 1 : Principaux projets d'accompagnement HYPXIM.

2.3 Principales orientations d'études algorithmiques dans le cadre du programme de R&T du CNES

A/ Fusion Panchromatique/Hyperspectral :

- Etat de l'art et comparaison d'algorithmes de fusion ;
- Analyse d'approches joignant la fusion et le démixage ;
- Démélange d'images hyperspectrales notamment en s'appuyant sur les informations contenues dans une voie panchromatique mieux résolue à haute ou très haute résolution.

B/ Classifications hyperspectrales :

- Comparaison d'algorithmes : hyper vs multi-spectral
- Construction d'un modèle statistique en tenant compte des aspects fonctionnels, spatiaux et temporels.

C/ CORATHYP: Code de correction atmosphérique pour données hyperspectrales

Mise en place d'une méthodologie pour la correction atmosphérique d'images satellites hyper-spectrales (~ 10-20 nm de résolution spectrale / 1-30 m de résolution spatiale) se basant au maximum sur l'information hyper-spectrale disponible dans les bandes d'absorption atmosphérique pour estimer les contenus atmosphériques nécessaires à une correction efficace en limitant le recours à des données exogènes.

2.4 Etudes de sensibilités dans le domaine de la physique de la mesure

En parallèle aux travaux d'ingénierie système, des études de physique de la mesure ont été mise en place afin d'optimiser la qualité des images pour les applications visées. Le projet CHIMERE réalisé entre 2019-2021 en support à l'étude de mission HYSP a eu pour objectif de trouver les points dits de « juste besoin », visant à consolider voire relâcher les spécifications en entrée de l'instrument et ainsi optimiser l'instrumentation.

Deux études ont été menées en partenariat avec la société Hytech Imaging et l'ONERA.

Apport des images hyperspectrales aux applications couleur de l'eau. Développement d'un algorithme de corrections atmosphériques optimisé pour le milieu côtier et détermination du point de fonctionnement instrumental optimal pour l'inversion de la colonne d'eau en milieu côtier.

Apport des images HR multi et hyperspectrales pour des applications « couleur de l'eau ». Les principaux verrous dans l'inversion de la colonne d'eau sont la capacité à mesurer la réflectance du fond marin, la qualité radiométrique des données et les corrections atmosphériques ; des études de sensibilité ont été

menées. Cette étude a montré que l'inversion de la Chlorophylle a (Ch-a) et des matières en suspension (m_s) par modèle de transfert radiatif fonctionne avec un capteur de type HYPXIM. Elle est impossible avec les données multispectrales MSI de Sentinel-2 et encore moins avec Pléiades en raison notamment de leur largeur de bande spectrale trop importante ; un $\Delta\lambda$ de 10 nm semble être optimal

OPHELIA - Oil Pollution characterization using HypERSpectral ImAgery : l'étude de sensibilité montre que l'imagerie hyperspectrale permet de répondre à la caractérisation des pollutions hydrocarbures en mer, mais que cette application nécessite un certain niveau de performance pour y parvenir. En particulier, il faut une résolution spatiale d'au moins 10m compte-tenu de la géométrie allongée des nappes de pollution dans le sillage des bateaux. Les missions hyperspectrales européennes actuellement en vol, PRISMA et ENMAP, ayant une résolution de 30m, elles ne sont donc pas adaptées à cette application.

Ainsi, autour de l'avant-projet HYPXIM et des variantes qui ont suivi, il s'est progressivement créé un environnement thématique et technique, très riche, mêlant de manière complémentaire des laboratoires de recherche, des industriels et des sociétés à valeur ajoutée. Cet ensemble, centré sur le même objectif : croître en compétence dans un domaine relativement nouveau et complexe, évoluant au fur et à mesure des enjeux posés par la programmation

3. Etudes système : l'avant-projet HYPXIM et ses variantes.

HYPXIM est une étude préliminaire (phase 0) dirigée par le CNES entre 2009 et 2012 donc les objectifs, duaux, devaient répondre aux besoins exprimés, d'une part, la communauté scientifique nationale qui utilise les données hyperspectrales à haute résolution (principalement aéroportées) pour des études environnementales et cherche à explorer les diverses zones critiques de la planète, et, d'autre part, la Défense, essentiellement pour du renseignement militaire en complément de données d'imagerie à Très Haute Résolution spatiale (THR).

Différents concepts dans les gammes mini (0,5 à 1 tonne) et microsatellites (100 à 400 kg) ont été étudiés, avec les supports industriels d'Airbus Defense & Space (ADS) et Thales Alenia Space (TAS), et en collaboration avec la Défense.

Une phase A a été décidée en 2012 et gelée en 2013 pour des raisons budgétaires.

3.1 Rencontre entre les besoins exprimés et les avancées technologiques.

Dès 2009, le groupe de mission scientifique a rédigé les spécifications de besoin de la mission HYPXM, qui se traduisent à haut niveau par les caractéristiques suivantes :

- Continuum spectral entre (0.4 - 2.5 μm)
- Résolution spectrale : entre 10 et 15 nm
- Résolution spatiale : autour de 10m
- Rapport signal-à-bruit (SNR) : VIS : 250 , NIR : 200 , SWIR :100 pour la luminance de référence
- Fauchée : a minima autour de 10 km
- Période de revisite : une revisite quotidienne est demandée pour certaines applications (notamment pour la Défense) mais une période de revisite de 3- 5 jours est acceptable.

Face aux besoins exigeants d'une mission hyperspectrale, de nouvelles technologies innovantes, permettent de concevoir un concept instrumental performant et compact :

- Télescope TMA léger en SIC
- Spectromètre à prisme très compact à double passage
- Plan focal unique couvrant l'ensemble de la plage allant de 0,4 à 2,5 microns
- Détecteurs HgCdTe (Sofradir): SATURN puis NGP
- Plan focal refroidi à 170° ou 150° K avec le MPTC
- TMI performante (antenne Myriade @160 Mbps), donc, pas de compression à ce stade .

3.2 Classes de satellites répondant aux besoins duaux

Le concept HYPXIM P (pour Performance) correspond à un satellite de classe Mini (600km au lancement), qui répond strictement aux besoins exprimés en termes de résolution spatiale (8m) et de qualité des données.

HYPXIM C (pour Challenging) est une option étudiée afin de réduire le coût du système en embarquant un instrument plus léger sur une plateforme de classe Micro (115 kg) ; cela est possible au prix de la résolution spatiale (15 m), sans cependant déroger à la qualité image, notamment de rapport signal-à-bruit (SNR).

Les démonstrateurs HYPEX-2 et HYPERION sont également des concepts de microsatellites, mais qui visent une résolution spatiale de 8m. Cela est rendu possible car l'orbite est fortement abaissée, respectivement à 500 et 360 km, ce qui implique un ralenti du satellite afin de respecter les besoins de SNR, mais limite le taux de couverture au sol, respectivement 12 000 km² et 7 000 km², contre 100 000 km² pour le modèle le plus performant. Le Tableau 2 récapitule les principales caractéristiques de ces systèmes.

4. HYPEX-2 mission proposé à l'ESA dans le cadre des programme Earth Explorer 8 et 9

L'Agence Spatiale européenne a mis en place un programme d'observation de la terre depuis l'espace intitulé « Programme Living Planet », alimenté notamment par les missions « Earth Explorer » tournées vers des objectifs et des défis scientifiques. Ces missions font l'objet d'appels à propositions techniques et financières récurrents. Le concept HYPXIM-C rebaptisé HYPEX a été proposé lors de l'appel Earth Explorer 8, en 2011. Il n'est pas retenu mais les commentaires des rapporteurs sont encourageants et le groupe de mission scientifique d'HYPXIM est rejoint par de nombreux laboratoires européens. L'appel à propositions Earth Explorer 9 est lancé en décembre 2016 et vise un avant-projet de niveau fin de phase 0, relativement mature techniquement et financièrement afin d'éviter toute dérive de coût dans les phases ultérieures.

4.1 Mission HYPEX-2 pour l'étude de la biodiversité

Le groupe de mission scientifique élargi au niveau européen, décide de se recentrer sur la question de l'estimation de la perte de la biodiversité dans quatre principaux milieux : la végétation, notamment tropicale où se trouve la plus grande réserve de biodiversité de la planète, les sols, les milieux littoraux et urbains où la pression anthropique est la plus importante (Tableau 3). Le groupe bénéficie de plusieurs années d'études scientifiques menées sur de nombreux sites répartis dans le monde, d'un panel important de données de terrain et d'images aériennes ainsi que de solides collaborations.

En synthèse, les besoins de la mission HYPEX-2 pour l'étude de la biodiversité sont couverts par un spectro-imageur spatial couvrant le domaine 0,4-2,5 microns, à haute résolution spectrale (10nm), spatiale (8m) et temporelle (5j).

	HX-Performance	HX-Challenging	HX-Demonstrator	
Name	HYPXIM-P	HYPXIM-C	HYPERIUM	HYPEX-2
Altitude	660 km	650 km	380 km	500 km
Payload	TMA or Korsch Diameter 450 mm	TMA telescope Diameter 150 mm	TMA telescope Diameter 150 mm	Korsch telescope Diameter 200 mm
	Detector HgCdTe 2000*360 pixels	Detector VNIR-SWIR 1000*255 pixels	Detector VNIR-SWIR 1000*255 pixels (pitch 30 μm)	Detector VNIR-SWIR 1000*255 pixels (pitch 15 μm)
HX GSD /Swath	8m / 16 km	15m / 15 km	8m / 8 km	8m / 8 km
Panchromatic GSD	Resolution 1,85 m	Resolution 3,75 m	Resolution 1,85 m	Resolution 3,5 m
Spectral bandwidth / δλ	400-2400 nm / 10 nm	400-2400 nm / <14 nm	400-2400 nm / <14 nm	400-2400 nm / <14 nm
Signal to Noise	VNIR : 250 ; NIR : 200 ; SWIR : 100 [@δλ, @GSD ; @Lref]			
L _{ref} [400 -700 nm]	Moy= 45 W/m ² /sr/μm	Moy= 73 W/m ² /sr/μm	Moy= 45 W/m ² /sr/μm	Moy= 82 W/m ² /sr/μm
Slow down	6	6	11	5-6
Payload budget (Mass / Power)	115 kg / < 150 W (Imaging mode)	70 kg / 110 W (Imaging mode)	70-90 kg / 110 W (Imaging mode)	60 kg / 70 W (Imaging mode)
Satellite mass	600 kg at launch	195 kg at launch	350 kg (electric propu.) 500 kg (chemical propu.)	400 kg at launch
Revisiting period	+/-20° across-track imaging : 2-3 days	+/-20° across-track imaging : 2-3 days	+/-20° across-track imaging : 3 days (theater)	+/-20° across-track imaging : 5 days
Imaging capacity (for one satellite)	100 000 km ² / day 450 images / day	63 000 km ² / day 280 images / day	7 000 km ² / day ~110 sites / day	12 000 km ² / day ~200 sites / day
Link to Ground (possible mobile stations capabilities)	X-band link @620 Mbps	X-band link @160 Mbps	X-band link @160 Mbps	X-band link @160 Mbps
Expected lifetime (Including end-of- life operations)	10 years	5 years	5 years	7,5 years

Tableau 2 : Quatre des principaux concepts satellites étudiées en phase préliminaire.





	Spectral range (μm)	Spectral resolution (nm)	SNR	Revisit period (days)	Area size (km ²)	GSD (m)
	VIS [0.4-0.7]	A: 15 G:10	A > 250	10	50-100	A < 10 G: 8
	NIR [0.7-1.0]]	A: 15 G:10	A > 250			
	SWIR [1.0-2.5]	A: 15 G:15	A: > 100 G: > 150			
	VIS [0.4-0.7]	A: 15 G:10	A > 200 G > 200	10	60	A-G~10
	NIR [0.7-1.0]]	A: 15 G:10	A > 200 G > 200			
	SWIR [1.0-2.5]	A: 15 G:10	A > 100* G > 150-200**			
	VIS [0.4-0.7]	A > 15 G > 10	A > 250 G > 400	A ~15 G ~10	60	A ~15 G ~10
	NIR [0.7-1.0]]		A > 250 G > 400			
	SWIR [1.0-2.5]	-	-	-	-	
	VIS [0.4-0.7]	A: 15 G:10	A > 250 G > 300	10	60-150	A < 10 G < 5
	NIR [0.7-1.0]]	A: 15 G:10	A > 250 G > 300			
	SWIR [1.0-2.5]	A: 15 G:10	A: > 100 G: > 150			

Tableau 3 : Besoins exprimés pour le thème biodiversité.

4.2 Architecture système de la mission HYPEX-2

Fin 2016, pour donner suite aux recommandations de l'ESA, l'étude technique porte sur la modification de l'orbite qui passe de 360 km à 500 km à performances identiques et accès global. Ce changement d'orbite a conduit à revoir complètement le concept instrumental et le choix de la plateforme.

L'étude du système a été dirigée par le CNES et menée par les deux industriels ADS et TAS qui ont travaillé sur 2 propositions sensiblement différentes.

Le choix de TAS est de s'appuyer sur un nouveau détecteur NGP et un spectromètre à double passage, ce qui conduit aux caractéristiques suivantes :

- Télescope type Korsch avec pupille 247mm, focale 938mm et ouverture 3,8
- Ralenti P/F : 6 (pour 8 km)
- Voie Panchro. 3,5m (SNR >90)
- Instrument compact (60*60*45cm), masse : 70kg (margé)/60W, compatible Proteus 150

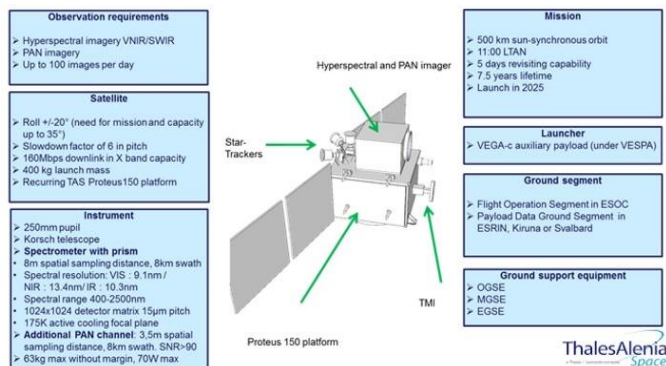
- Satellite: 398 Kg (wet) , 300W , Mass memory: 2Tbits, TMI X-Band: 160Mb/s.

Pour ADS, le choix du détecteur NGP est identique, mais les équipes optent pour un spectromètre à 4 fentes qui optimise les 1000 lignes du NGP. Ces choix aboutissent au concept suivant :

- Télescope type TMA avec pupille 150mm, focale 938mm.
- Ralenti plateforme ou miroir : 5-6 .
- Instrument compact (69*52*44cm), 63kg (margé) /70-130 W (mode imaging), compatible Astrobuss-S
- Satellite: 366 Kg (wet), 300 W. Vol image 3,6 Gbits, TMI X-band: 180Mb/s.

Les architectures systèmes qui résultent de ces choix sont présentées dans les Figures 3a et 3b, ci-dessous :

3a



3b

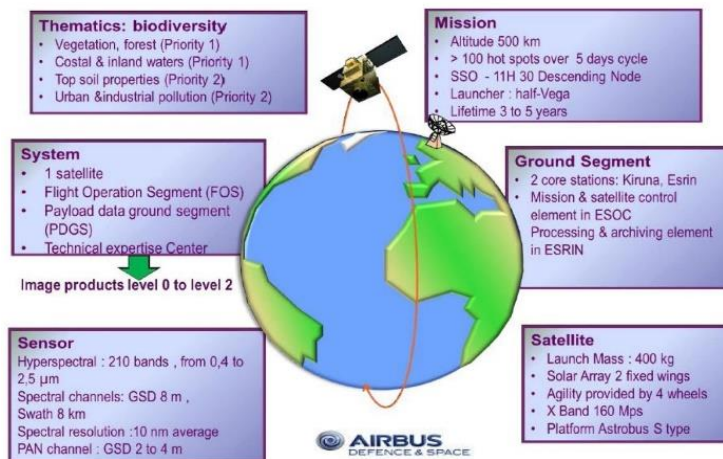


Figure 3 : Architecture système de la mission HYPEX-2

4. 3. Discussion

Ces deux propositions présentent des points fort et témoignent de la maturité à la fois de l'équipe scientifique internationale qui la supporte et des équipes techniques qui ont pris en considération les avancées technologiques les plus innovantes notamment en termes de détecteur et de spectromètre.

Par ailleurs, une mission chargée d'étudier la perte de biodiversité causée par les changements globaux et son suivi dans le temps, semble aujourd'hui essentielle. En effet, selon l'organisation internationale pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 60% des écosystèmes terrestres et marins sont dégradés ou surexploités. La conservation de la biodiversité des surfaces continentales et marines ainsi que l'étude de leur adaptation aux pressions climatiques et anthropiques sont les enjeux environnementaux prioritaires de ce siècle. L'imagerie hyper-spectrale combinant la haute résolution spectrale, spatiale et une haute revisite temporelle est la seule à même de renseigner sur les propriétés d'espèces végétales, notamment à travers les changements des variables Essentielles de la biodiversité, et de le faire avec une incertitude minimale.

Malgré ces atouts scientifiques, thématiques et techniques, la mission HYPEX-2 n'a pas été sélectionnée dans le programme Earth Explorer 9. L'ESA estimant qu'une partie de cette mission, celle qui n'exige pas la haute résolution spatiale, pouvait être conduite dans le cadre de la nouvelle génération du programme Copernicus, notamment avec le satellite CHIME (Sentinel 10).

5. Etude de systèmes spatiaux en coopération internationale

Entre 2018 et 2022, diverses études de phase 0 ont été conduites dans le cadre de coopérations internationales, sur des missions plus ciblées, certes moins ambitieuses qu'HYPXIM ou HYPEX-2 car répondant à des contraintes de coût et de masse très sévères.

Dans ce contexte d'échanges internationaux, le CNES a exploré de nouveaux concepts de mission comme les exemples suivants :

- 1/ avec des objectifs de masse de 50kg ou 100-150 kg en coopération avec les Emirats Arabes Unies (EAU), études préliminaires d'architectures système en 2018

et 2019. C'est dans ce cadre qu'un concept innovant sur nanosatellite, HYPE, a été étudié, et présenté, ci-dessous. L'Agence Spatiale des Emirats Arabes Unis a finalement décidé de lancer seule une mission hyperspectrale nommée 813 bien moins ambitieuse que celle étudiée en collaboration avec le CNES avec un objectif de résolution spatiale meilleur que 40 m en VNIR et 80m SWIR.

- 2/ dans la continuité d'HYPEX-2 et en coopération avec Singapour, la phase 0/A en 2019-2020 de la mission HYPSP, qui a été suivie d'une phase A+ en 2021. Suite au retrait du partenaire singapourien, le projet s'est poursuivi en 2022 dans un cadre dual national ;

- 3/ la France mène également depuis 2018, en coopération avec l'UNSW (University of New South Wales, Australie) l'étude d'une mission hyperspectrale associée à de nouvelles approches de traitement embarqué et d'intelligence artificielle pour la surveillance notamment des coraux, de la qualité de l'eau douce et marine.

HYPE : exemple d'une nouvelle architecture système pour nanosatellites

Les contraintes de masse et de puissance imposées par le partenariat avec les Emirats Arabes Unies, ont permis d'explorer un concept innovant de nanosatellite utilisant des technologies miniaturisées et à moindre coût.

La charge utile principale est un spectro-imageur de 8 kg de masse pour 24 W de puissance, avec une capacité de 154 bandes spectrales couvrant le domaine allant de 470 à 900 nm, et un champ de 60 km, caractéristiques bien adaptées à l'étude du littoral. Une charge utile complémentaire multispectrale couvrant le domaine spectral allant de 900 à 1600 nm a été proposée en option.

Les deux charges utiles sont embarquées sur un nanosatellite de 32 unités (32 U) équipé de 3 panneaux solaires fixes produisant 70 watts en moyenne et de 3 roues miniaturisées lui donnant l'agilité nécessaire pour l'accès aux sites d'étude et aux stations de réception. Ce satellite baptisé HYPE pour les besoins de l'étude, présente une masse de 50 kg est équipé d'une antenne en bande X de 100 Mbps (mega bits par seconde).

Placé sur une orbite SSO (Sun-Synchronous Orbit) à 498 km d'altitude, il peut revisiter tous les 5 jours les sites sélectionnés (Figure 4).

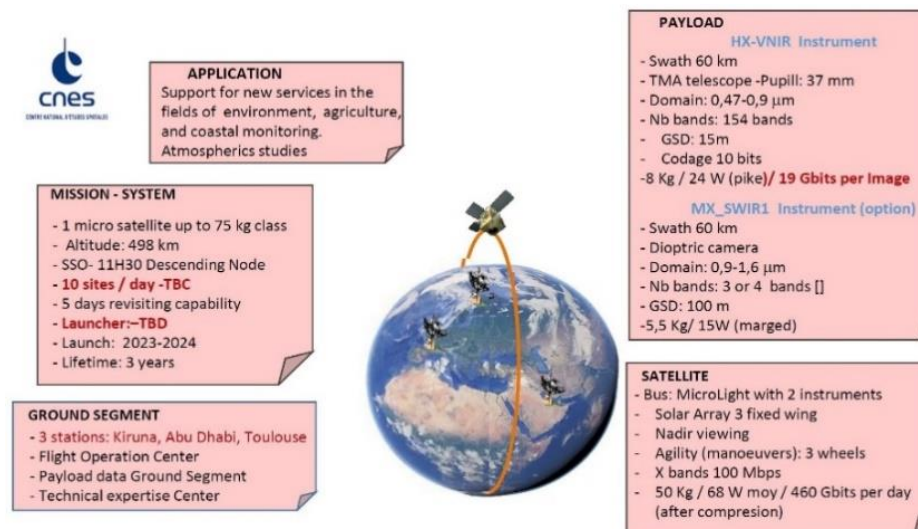


Figure 4 : Architecture système du nanosatellite HYPE.

6. Perspectives et conclusions

Les travaux de phase 0 /A /A+ sur l'hyperspectral menées par le CNES depuis quasiment 20 ans, n'ont pas abouti à lancer une mission française, mais ils ont permis aux équipes scientifiques et techniques de monter en compétence et de créer une forte dynamique.

Dans le cadre de l'avant-projet HYSP, Singapour s'est retiré en fin de phase A mais le CNES et la DGA ont poursuivi les études techniques avec un complément de phase A centré sur une solution innovante à base de filtres allumettes. A l'issue de cette phase, le CNES et la DGA ont réaffirmé l'intérêt d'un programme hyperspectral à forte composante nationale. Un nouveau partenariat a été décidé fin 2022 avec les Emirats Arabes Unis pour l'étude de l'import de l'instrument HYSP sur une plateforme du MBRSC de Dubaï.

Les laboratoires scientifiques français en pointe en imagerie hyperspectrale ont démontré leur capacité à exploiter ces données et à développer de nouvelles applications qui préparent à l'utilisation de données issues des satellites européens comme PRISMA, ENMAP, et, dans le futur CHIME. Avec les appels d'offre Earth Explorer et les diverses études en coopération, les scientifiques français ont démontré qu'ils pouvaient piloter des équipes internationales de haut niveau dans la définition d'une mission spatiale novatrice.

Les industriels français ont produit également un effort considérable tant dans le développement de nouvelles technologies (détecteurs, spectromètres, antennes, compression des données, ...) indispensables pour une mission exigeante comme l'hyperspectral, que dans les concepts instrumentaux et d'architecture système. Aujourd'hui, les industriels qui ont participé étroitement à

ces études sont devenus des leaders internationaux du domaine ; TAS est notamment maître d'œuvre et intégrateur des deux satellites CHIME qui constituent la mission Sentinel-10 du programme COPERNICUS.

Remerciements :

Les auteurs remercient ADS et TAS pour leur importante contribution aux études de systèmes spatiaux hyperspectraux et notamment pour leur participation aux propositions des programmes Earth Explorer 8 et 9.

L'Etat Major des Armées (EMA), la Délégation Générale à l'Armement (DGA, pour leur accompagnement stratégique et technique ainsi que pour avoir maintenu active la coordination entre les travaux civils et ceux de la Défense sur ce thème.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à Gilles Chalon, CTO, directeur des systèmes orbitaux au Centre National d'Etudes Spatiales, pour sa confiance, son soutien inestimable tout le long de ces études.

Références :

Dossier d'Axe de Recherche Imagerie Hyperspectrale . Programme de Recherche et Technologie CNES 1999. Document interne.

Groupe de Synthèse Hyperspectrale(2008). "Synthèse sur l'imagerie hyperspectrale". CNES strategic documentation. Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH) – Imagerie hyperspectrale.

- Actes du SPS du CNES, Paris, juillet 2004. https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/web/_CNES-fr/11105-st-seminaire-de-prospective-scientifique-paris-2004.php.
- Actes du SPS, Biarritz 2009 : Prospective du groupe Terre solide. <https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/web/CNES-fr/8673-st-seminaire-de-prospective-scientifique-2010.php>.
- Actes du SPS, La Rochelle 2014, <https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/web/CNES-fr/11173-st-actes-et-presentations.php>.
- Actes du SPS, Le Havre 2019, <https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/sciences-et-techniques/politique-scientifique-du-cnes/seminaires-de-prospective/le-havre-2019>.
- PASO, Rapport final de l'étude PASO HYPXIM – Système hyperspectral pour les géosciences et les applications duales de Sécurité et Défense”, CNES Project internal report, 2009.
- Steven Hosford, Marie-José Lefevre-Fonollosa, Sylvain Michel, Rémi Michel, Rodolphe Marion, Véronique Carrère , Hyperspectral mission requirements as defined by a combined science/defence expert group established by CNES.. Proc. 2010 Workshop ESA SP-683.
- Sylvain Michel, Philippe Gamet, Marie-José Lefèvre-Fonollosa, HYPXIM - A hyperspectral satellite defined for science, security and defence users. WHISPERS. June 2011. doi:10.1109/WHISPERS.2011.6080864.
- Marie-José Lefèvre-Fonollosa, et al., “HYPXIM, an advanced hyperspectral satellite for environment, security and defence”, XIIth ISPRS Congress, 2012, Melbourne, Australia, <http://www.isprs2012.org/abstract/1770.asp>.
- Marie-José Lefèvre-Fonollosa, Sylvain Michel, Steven Hosford, HYPXIM, an innovative spectroimager for science, security and defence requirements. RFPT n°200 (Novembre 2012), pp 20-27.
- Véronique Carrère et al., “The French hyperspectral EO mission HYPXIM – A second generation high spectral and spatial resolution imaging spectrometer”, Proc. IGARSS 2013, Melbourne, Australia, 21-26 July 2013.
- Véronique Carrère, Xavier Briottet, Stéphane Jacquemoud, Rodolphe Marion, Anne Bourguignon, Malik Chami, Marie Dumont, Audrey Minghelli-Roman, Christiane Weber, Marie-José Lefèvre-Fonollosa, Mioara Manda, HYPXIM : A second generation high spatial resolution hyperspectral satellite for dual applications. WHISPERS. doi: 10.1109/WHISPERS.2013.8080685.
- Sophie Fabre et al Influence of soil moisture content on spectral reflectance of bare soils in the 0.4-14µm domain.. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(7),pp:2268-2285
doi:10.1080/01431161.2012.743693.
- Hypertropik project for HYPXIM mission : Mapping tropical biodiversity using spectroscopic imagery characterization of structural and chemical diversity using 3-D radiative transfer modeling. Jean-Baptiste Feret, Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry, Marie-José Lefèvre-Fonollosa, Christophe Proisy, Gregory P. Asner. Conference, 9th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy workshop. Luxembourg, April 2015.
- Cécile Gomez, Etude physico-chimique des surfaces continentales par imagerie Vis-PIR (400 – 2500 nm). Mémoire de thèse déposé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, soutenu le 9 juin 2017, Ecole doctorale GAIA, Université de Montpellier.
- Rodolphe Marion, Véronique Carrère, Mapping Using the Automatized Gaussian Model (AGM) - Application to Two Industrial French Sites at Gardanne and Thann. Remote. Sens. 10(1): 146 (2018).
- Simon Rebeyrol, Yannick Deville, Véronique Achard, Xavier Briottet, Stéphane May, Using a Panchromatic Image to Improve Hyperspectral Unmixing. Remote Sensing. 2020, 12(17), 2834. doi::10.3390/rs12172834.
- G. Vivone, S. Marano and J. Chanussot, "Pansharpening: Context-Based Generalized Laplacian Pyramids by Robust Regression," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 58, no. 9, pp. 6152-6167, 2020, doi: 10.1109/TGRS.2020.2974806.
- Audrey Minghelli et al., Benefit of the potential future Hyperspectral Satellite Sensor (BIODIVERSITY) for improving the determination of water column and seabed features in coastal zones, IEEE journal of selected topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol 14, 2021, pp 1222-1232.
- Ferran Gascon, Michael Rast, Marco Celesti, Christelle Bogaarts, Jens Nieke, Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the environment (CHIME), RFPT n°224 (2022), pp 5-8. doi::10.52638/rfpt.2022.619.
- Xavier Briottet et al., BIODIVERSITY, a new space mission to monitor Earth ecosystems at fine scale, RFPT n°224 (2022) pp 33-58. doi:10.52638/rfpt.2022.568.
- Christiane Weber et al., Hyperspectral imagery and urban areas: results of the HYPE project, RFPT n°224 (2022), pp 75-92. doi:10.52638/rfpt.2022.589.

