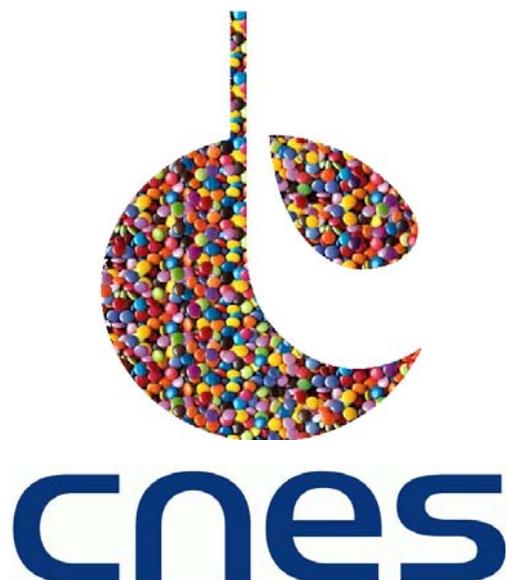


# Synthèse sur l'imagerie hyperspectrale

Groupe de Synthèse Hyperspectral  
Rapport 2008





**Le Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH) est constitué des vingt membres suivants :**

Rémi MICHEL (CEA), président,  
Rodolphe MARION (CEA), secrétaire,  
Xavier BRIOTTET (ONERA),  
Véronique CARRERE (Université de Nantes),  
Sabine CHABRILLAT (GFZ),  
Stéphane CHEVREL (BRGM),  
Jean-Marie FROIDEFOND (Université de Bordeaux 1 – EPOC),  
Steven HOSFORD (CNES),  
Stéphane JACQUEMOUD (IPGP),  
David LAUBIER (CNES),  
Marie-José LEFEVRE (CNES),  
Camille LELONG (CIRAD),  
Marc LENNON (société Actimar),  
Commandant Frédéric LIEGE, (Etat-major des Armées / Division Espace et Programmes),  
Eric MALIET (Astrium),  
Grégoire MERCIER (ENSTB),  
Philippe PRASTAULT (DGA / UM ESIO),  
Pascal PRUNET (société Noveltis),  
Serge TARIDE (ThalesAleniaSpace),  
Christiane WEBER (Université de Strasbourg).

Le Pr. KAUFMANN (GFZ) et Stéphane Le MOUELIC (Université de Nantes) ainsi que Véronique ACHARD (ONERA), Damien BARACHE (ITT Visual Information Solutions), Emmanuel CHRISTOPHE (CNES), Patrick LAUNEAU (Université de Nantes), Abdelaziz SERRADJ (Université de Strasbourg), Annet WANIA (JRC ISPRA) et un groupe de travail composé de SAGEM et autres industriels ont également contribué aux travaux.

# SOMMAIRE

<b>SYNTHESE GENERALE</b> .....	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
1.1 CONTEXTE.....	7
1.2 ACTIVITE DU GSH.....	8
<b>2 ETAT DE L'ART ET BESOINS, CAPACITE DE L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE A REpondre AUX BESOINS</b> .....	<b>9</b>
2.1 LA SCIENCE.....	9
2.1.1 <i>La Végétation</i> .....	11
2.1.2 <i>Les Ecosystèmes Côtiers et Lacustres</i> .....	15
2.1.3 <i>Les Géosciences – Sciences de la Terre Solide</i> .....	21
2.1.4 <i>L'Urbain</i> .....	27
2.1.5 <i>L'Atmosphère</i> .....	33
2.1.6 <i>Le Traitement du Signal et de l'Image</i> .....	37
2.2 LA DEFENSE.....	43
2.3 LA TECHNOLOGIE / INDUSTRIE.....	55
<b>3 RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>59</b>
3.1 ELEMENTS D'ANALYSE.....	59
3.2 SCENARIOS D'IMPLICATION CROISSANTE DU CNES.....	62
3.2.1 <i>Scénario 1 : Pas d'Engagement du CNES dans l'Hyperspectral</i> .....	62
3.2.2 <i>Scénario 2 (Minimal) : Soutien de Base à la Communauté</i> .....	62
3.2.3 <i>Scénario 3 : Mission Spatiale de 1<sup>ère</sup> Génération</i> .....	63
3.2.4 <i>Scénario 4 : Mission Spatiale de 2<sup>nde</sup> Génération</i> .....	63
<b>4 ANNEXES</b> .....	<b>65</b>
4.1 LES CAPTEURS HYPERSPECTRAUX.....	65
4.2 TECHNOLOGY READINESS LEVEL (ECHELLE TRL).....	69
<b>5 BIBLIOGRAPHIE THEMATIQUE</b> .....	<b>71</b>
5.1 LA VEGETATION.....	71
5.2 LES ECOSYSTEMES COTIERS ET LACUSTRES.....	73
5.3 LES GEOSCIENCES – SCIENCES DE LA TERRE SOLIDE.....	75
5.4 L'URBAIN.....	79
5.5 L'ATMOSPHERE.....	81
5.6 LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE.....	83
<b>6 GLOSSAIRE</b> .....	<b>85</b>

# Synthèse générale

Ce rapport « rassemble et synthétise les applications de l'imagerie hyperspectrale à la fois dans le domaine de la science et celui de la Défense » pour le programme d'Observation de la Terre de la Direction de la Stratégie et des Programmes du CNES. Le groupe de travail a réuni vingt représentants de la communauté nationale publique et privée, civile et de défense d'avril 2007 à septembre 2008. La cohérence est assurée avec le Groupe de Travail HyperSpectral (GTHS Défense) ouvert par l'EMA<sup>1</sup> depuis 2004.

Les experts expriment d'abord le bon positionnement des compétences nationales dans six thèmes scientifiques, respectivement « Végétation », « Ecosystèmes Côtiers et Lacustres », « Géosciences – Sciences de la Terre Solide », « Urbain », « Atmosphère » et « Traitement du Signal et de l'Image ». Les trois premiers sont prêts pour un emploi opérationnel des données hyperspectrales spatiales par des utilisateurs privés et publics pour répondre à des enjeux scientifiques et à des besoins sociétaux bien identifiés<sup>2</sup> ; les autres valorisent une compétence nationale forte autant que nécessaire à l'exploitation de données ou sont plus prospectifs. Suivent les thèmes « Défense », qui exprime un intérêt suffisant pour envisager une mission spatiale, et « Technologie / Industrie », décrivant le fort potentiel d'innovation et de maîtrise technologique du domaine.

La synthèse des positionnements montre d'abord que l'hyperspectral devient une technologie spatiale de télédétection avec une orientation unique : l'imagerie des surfaces complexes. Les arguments de la communauté nationale la placent au seuil de percolation légitimant l'implication du CNES. Elle forme, en effet, l'intégralité d'une chaîne de compétence de qualité comparable, sinon meilleure, à celles mises en œuvre par d'autres agences pour développer des programmes hyperspectraux spatiaux. Par ailleurs, les caractéristiques des missions en cours laissent la place au développement de capacités qui rapprocheraient significativement d'une exploitation opérationnelle de l'espace.

La réserve programmatique du CNES jusqu'à aujourd'hui peut se concrétiser en un avantage stratégique. Il est envisageable, en effet, que la qualité et la quantité des données qui seront fournies par les missions en cours, notamment allemande ou italienne, ne permettent pas sans complément de démontrer l'intérêt opérationnel d'une imagerie hyperspectrale spatiale. Des scénarios d'implication croissante du CNES vers une télédétection hyperspectrale opérationnelle aux horizons 2012 et 2018 sont proposés dans ce sens. La composante hyperspectrale offre par ailleurs au CNES un potentiel d'innovation et de croissance en imagerie optique plus important que les composantes « résolution spatiale » et « champ » qui ont déjà connu un fort développement et sont considérées aujourd'hui à l'international comme faisant partie des axes de R&D industriels (c'est notamment le cas pour Pléiades). Le développement d'une filière d'imagerie hyperspectrale opérationnelle dans laquelle le CNES jouerait un rôle moteur et pérenne pourrait contribuer à la réorientation de l'agence comme suite à l'externalisation de la filière SPOT champ large.

---

<sup>1</sup> EMA : Etat Major des Armées

<sup>2</sup> Aucune étude économique systématique n'a néanmoins été effectuée à ce stade



# 1 Introduction

## 1.1 CONTEXTE

La télédétection hyperspectrale fournit typiquement des images de résolution moyenne, d'une finesse spectrale de quelques pourcents dans la gamme (0,4-2,5 $\mu$ m) mais aussi éventuellement dans les gammes infrarouges (3-5 $\mu$ m) et (8-12 $\mu$ m). La richesse des données est très grande, ce qui justifie l'intérêt qu'elle suscite à une large palette de thématiques confrontées à la complexité des surfaces. L'imagerie hyperspectrale spatiale offre une réponse à la tendance forte vers l'étude de situations civiles et de défense complexes en observation de la Terre.

Plusieurs agences spatiales développent des programmes hyperspectraux pour l'information nouvelle qu'apportent ces données par rapport aux techniques radars, optiques, multispectrales ou autres. Parmi bien d'autres initiatives, on souligne les programmes allemands et italiens actuels (EnMAP et PRISMA), les missions américaines Hyperion en cours et HypSPIRI à venir, la perte d'un THR hyperspectral américain de défense (Warfighter), le programme SPECTRA de l'ESA, les autres missions étant répertoriées en annexe 4.1. La communauté nationale dispose de toutes les compétences utiles au développement de la technique, comme le montre le tour de table du GSH. Les compétences sont bonnes à l'échelle scientifique, comme le suggère la position de la France entre l'Allemagne et l'Italie suivant l'indicateur bibliométrique du nombre de publications dans les revues avec référés sur la dernière décennie (voir section 3.1). Les technologues du CNES et du privé disposent des éléments nécessaires au développement de la compétence hyperspectrale. L'effort de la défense en hyperspectral est important et compte :

- le programme MUSIS, qui vise à développer une capacité multi-composantes aux défenses des 6 pays

Hélios (France, Allemagne, Italie, Espagne, Belgique, Grèce), prévoit une composante hyperspectrale, mais en pratique concentrera l'investissement de sa génération 2015 sur les composantes « optique visible », « infrarouge » et « radar THR / EHR », comme en son temps le système Franco-Italien Pléiades – CosmoSkyMed devait inclure une composante hyperspectrale,

- l'ONERA participe au programme Thalès d'acquisition de signatures dans le cadre Euclid / EDA, étude amont technico-opérationnelle (ETO) sur l'hyperspectral spatial.

Il existe de nombreuses communautés d'utilisateurs et des marchés potentiels, ce qu'indiquent d'emblée plusieurs thématiciens, dont ceux des thèmes « Végétation », « Ecosystèmes Côtiers et Lacustres » et « Géosciences – Sciences de la Terre Solide ». L'hyperspectral fournit le spectre réflectif de la scène et par là un très grand ensemble de possibilités d'identifications. Certaines d'entre elles sont déjà exploitées opérationnellement, pour leurs possibilités d'identifications absolue ou relative, voire souvent sub-pixelique, dans le cadre d'études en science de la Terre ou de défense. Plutôt que d'être réduite, la complexité de l'hyperspectral a été domestiquée par les logiciels de manipulation des données, la plupart des applications n'exploitant d'ailleurs qu'une fraction du spectre.

Pour toutes ces raisons de contexte, la tendance est donc bonne et l'hyperspectral peut afficher des échelles TRL (*Technology Readiness Level*) égales à 6. Mais jusqu'à aujourd'hui, le CNES n'a pas de programme hyperspectral.

## 1.2 ACTIVITE DU GSH

C'est dans ce contexte concernant le programme d'Observation de la Terre de la Direction de la Stratégie et des Programmes du CNES que la communauté nationale s'est largement mobilisée afin de répondre à la question de « rassembler et (de) synthétiser les applications de l'imagerie hyperspectrale à la fois dans le domaine de la science et celui de la défense ». Le Groupe de Synthèse Hyperspectral (GSH) réunit 20 membres couvrant l'ensemble des domaines d'expertises scientifique, de défense et technologique, public et privé et du personnel du CNES. Le groupe a également bénéficié de présentations par le Pr. Kaufmann (GFZ), responsable scientifique de la mission allemande EnMAP

et par Stéphane Le Mouelic (Université de Nantes), spécialiste de l'imagerie hyperspectrale en planétologie. L'articulation du GSH avec le groupe de travail mis en place depuis 2004 par la défense (GTHS Défense) est assurée.

Le GSH a structuré son travail en fournissant un positionnement détaillé de chacune des communautés concernées. Sur cette base, il a effectué une synthèse qui comporte notamment des recommandations sous la forme d'analyse d'une série de scénarios impliquant le CNES à des degrés divers. Les informations sont actées à la majorité.

## 2 Etat de l'art et besoins, capacité de l'imagerie hyperspectrale à répondre aux besoins

### 2.1 LA SCIENCE

**Coordinatrice** : Véronique CARRERE (Université de Nantes)

La présente étude met en évidence que dans de nombreux domaines scientifiques, l'imagerie hyperspectrale permet une meilleure estimation des variables observées que les capteurs multispectraux (identification et quantification) ainsi que l'accès à de nouvelles informations pertinentes. Voici quelques exemples marquants dans différents domaines scientifiques.

- La discrimination des pigments dans les végétaux et leur quantification, l'estimation de l'eau et de la matière sèche, paramètres essentiels pour l'évaluation et le suivi de la désertification, de la contribution de la végétation au cycle du carbone, l'agriculture de précision ou la prévention des feux de forêt ne peuvent se faire précisément à l'aide des indices classiquement dérivés des capteurs multispectraux car ces derniers ne sont pas suffisamment sensibles à ces paramètres.
- Les paramètres relatifs à la qualité des eaux côtières ou lacustres, information importante suite aux directives européennes et pour les collectivités locales (type et taille de particules en suspension, identification des algues toxiques et des cyanobactéries grâce aux pigments phytoplanctoniques, eutrophisation par les algues vertes, santé des récifs coralliens, *etc.*) ne peuvent être estimés précisément que par télédétection hyperspectrale. L'imagerie hyperspectrale permet également d'améliorer l'estimation de la bathymétrie grâce à une meilleure connaissance de la nature du fond et ainsi de réduire les moyens nécessaires au suivi de la dynamique sédimentaire dans les zones à faible turbidité.
- Dans le domaine des géosciences, il a été clairement démontré depuis plus de 20 ans que seule l'imagerie hyperspectrale offrait

la possibilité d'identifier et de quantifier la composition minéralogique des surfaces, information essentielle pour l'évaluation de la qualité des sols (directive européenne), le suivi des sites miniers, la prospection minière et pétrolière on-shore, la détermination d'indicateurs de désertification / dégradation des sols, *etc.* Ce type de données s'avère également indispensable dans le cadre de la gestion de crises (retrait-gonflement des argiles, contamination des sols et du système hydrique, *etc.*). Les capteurs multispectraux ont des bandes spectrales trop larges et trop peu nombreuses pour permettre l'identification et la quantification (estimation de la concentration, mélanges sub-pixeliques) des minéraux marqueurs.

Les domaines de l'urbain et de l'atmosphère ne montrent pas pour l'instant de besoins fortement identifiés. Pour ce qui est du domaine urbain, la constitution de bases de données spectrales est en cours pour permettre une cartographie plus précise de matériaux urbains et faciliter leur intégration dans des modèles hydrologiques ou micro-météorologiques. Dans le domaine de l'étude de l'atmosphère, seule la détection de phénomènes de surface tels que les feux ou les éruptions volcaniques ou l'estimation de la pollution dans la couche limite sont mises en évidence.

On remarquera enfin que certaines communautés montrent un intérêt pour l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine de l'infrarouge thermique (« Géosciences – Sciences de la Terre Solide », « Urbain » et « Atmosphère » notamment).

Finalement, l'argument généralement présenté contre l'utilisation d'imagerie hyperspectrale par « Monsieur Tout Le

## La Science

Monde» ne tient plus car nous montrons également clairement qu'il existe maintenant de nombreuses méthodes de traitement du signal et de l'image pouvant répondre aux besoins des diverses applications. Des logiciels de traitement commerciaux existent depuis plusieurs années (utilisés de manière routinière en enseignement du traitement d'image) ce qui rend plus aisée l'exploitation des données hyperspectrales. Il faut noter que la communauté nationale dispose d'une compétence forte dans ces domaines et se

distingue en particulier par une prise en compte approfondie de la physique de l'image.

Les sections suivantes détaillent par discipline le contexte et les enjeux scientifiques, l'état de l'art et le positionnement de l'imagerie hyperspectrale dans le thème, l'aspect utilisateur avec une expression des besoins et, dans la mesure du possible, une liste des utilisateurs finaux existants ou potentiels.

### 2.1.1 La Végétation

**Intervenants** : Stéphane JACQUEMOUD (IPGP – Université Paris Diderot), Sabine CHABRILLAT (GFZ) et Camille LELONG (CIRAD)

Dans un contexte d'une communauté scientifique nationale forte, un capteur spatial est considéré déterminant pour le développement d'études scientifiques et d'exploitations opérationnelles en réponse à des besoins économiques et sociétaux. L'imagerie hyperspectrale permet, entre autre, d'accéder au contenu biochimique des plantes :

- concentration en pigments foliaires; nombreux utilisateurs potentiels en agriculture de précision et en écophysiologie,
- contenu en eau; forte demande en environnement, en géophysique de surface et pour des activités de défense et de sécurité,
- contenu en matière sèche; information exploitée dans les modèles SVAT (*Surface Vegetation Atmosphere Transfer*) intégrés aux modèles météorologiques ou pour évaluer et suivre les processus de désertification.

Les missions à venir, notamment Sentinel 2 et 3, ne permettront pas d'adresser des questions scientifiques majeures comme par exemple l'évaluation des contenus en eau et en matière sèche.

*La communauté nationale est également impliquée dans des recherches sur la mesure de fluorescence passive (projet FLEX de l'ESA) qui pourraient offrir à terme la possibilité d'accéder à l'activité photosynthétique de la végétation et donc aux flux de carbone dans les principaux écosystèmes terrestres.*

Echelle TRL : 4-5

### Contexte

Il s'agit de répondre à de nouveaux besoins sociétaux (agriculture raisonnée, biocarburants, protection des espaces naturels, évaluation des risques naturels, *etc.*) ou à des questions scientifiques émergentes (biodiversité, cartographie des écosystèmes terrestres, étude du changement climatique, *etc.*). La crise alimentaire qui menace une partie du monde, les nouvelles directives européennes sur la protection de l'environnement, les effets du réchauffement global sur les espèces végétales cultivées ou naturelles, et leur effet rétroactif, sont autant de raisons pour mieux connaître la végétation et sa dynamique. *Les instruments actuels (par exemple Vegetation et Polder) ou futurs (missions Sentinel 2 et 3 de l'ESA, etc.) n'ont pas été conçus pour fournir des images dans la gamme spectrale (400-900nm) et surtout (900-2500nm) avec une finesse*

*spectrale suffisante pour apporter des informations originales sur la végétation.*

Dans le domaine optique, les feuilles et le sol sont les principaux éléments influençant la réflectance spectrale du couvert. Les feuilles de plantes en bonne santé contiennent entre 85% et 90% d'eau liquide (exprimée en masse par unité de surface), entre 10% et 15% de matière sèche (cellulose, hémicellulose, lignine, *etc.*) et des pigments (chlorophylles, caroténoïdes, anthocyanes, flavonoïdes, *etc.*) en quantité mille fois plus faible. Ces constituants biochimiques absorbent le rayonnement de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain en passant par le visible et le proche-infrarouge. Les mécanismes mis en jeu dépendent de l'énergie des photons : absorption électronique dans l'ultraviolet et le visible (pigments) et vibrationnelle dans l'infrarouge (eau, matière sèche, *etc.*). La position et l'intensité des pics de réflectance

sont dues à l'absorption mais pas seulement : la structure du couvert qui crée de la diffusion dans la végétation influence aussi la forme du spectre, spécialement dans le proche-infrarouge.

### Volet scientifique

#### Pigments

Une pollution atmosphérique à l'ozone ou au dioxyde de soufre, un excès d'ions ou de métaux lourds dans les sols, une attaque virale ou fongique, ou encore un stress hydrique sont susceptibles d'entraîner la destruction des pigments foliaires (chlorose) et donc un changement dans les propriétés optiques de la végétation. Parmi les pigments foliaires, on compte :

- la chlorophylle, pigment photosynthétique *a priori* facilement accessible qui n'a reçu que peu d'attention jusqu'au début des années 2000,
- les carotènes qui transfèrent une fraction de l'énergie absorbée aux chlorophylles et qui sont révélés en automne,
- les xanthophylles impliquées dans la photo-régulation de la lumière en dissipant l'excès d'énergie absorbée, évitant ainsi une oxydation dommageable du centre photorécepteur,
- les anthocyanes qui protègent aussi le système photosynthétique d'un excès de lumière et dont la mesure indique l'état physiologique des plantes.

De nombreuses approches, généralement empiriques de type indices de végétation, ont été développées. Le PRI (*Photochemical Reflectance Index*) est lié au cycle des xanthophylles, le MCARI (*Modified Chlorophyll Absorption Index*) ou le TCARI (*Transformed Chlorophyll Absorption Index*) sont sensibles à la chlorophylle. L'apparition des premiers spectro-imageurs a fait de l'étude du *red edge* un axe de recherche prometteur pour détecter des variations de concentration en chlorophylle consécutives à une contamination environnementale. Enfin, des méthodes statistiques avancées (PLS-regression) permettent de traiter toute la finesse de l'information spectrale pour estimer des teneurs en divers composants organiques ou minéraux, notamment l'azote. *Toutefois, en*

*l'absence de satellite adapté, ces études d'intérêt thématique se sont vite raréfiées. La dernière génération de capteurs multi-spectraux s'est accompagnée d'un regain d'intérêt avec, par exemple, le MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index). Les chercheurs français sont les pionniers dans le développement et l'utilisation de modèles de transfert radiatif (on peut citer PROSAIL issu du couplage de PROSPECT et SAIL), qui ont abouti il y a quelques années à un service opérationnel d'aide à la conduite des cultures : c'est le projet FARMSTAR mis en place par la société Infoterra, filiale d'EADS.*



*Figure 1 – Image CAO (Carnegie Airborne Observatory) montrant l'envahissement d'une zone humide des îles Hawaï par des espèces invasives (arbre à soie en rouge clair et rose, goyavier fraise en rouge sombre).*

#### Eau

Les feuilles des végétaux sont en grande partie constituées d'eau liquide qui assure diverses fonctions physiologiques (photosynthèse), biochimiques (catalyseur de nombreuses réactions), thermiques (régulation de leur température) et biomécaniques (pression de turgescence). *Il existe actuellement une forte demande pour mettre au point des méthodes d'observation à distance permettant de quantifier et de cartographier l'eau contenue dans la végétation pour des applications en environnement (prévision des feux de forêt, étude des changements climatiques), en géophysique de surface (bilan hydrique, détection de pollution), en agriculture de précision (gestion de l'irrigation), en écophysiologie (étude du fonctionnement des écosystèmes) ou pour des applications liées à des activités de défense et de sécurité (impact des activités militaires, traficabilité).* Si les relations entre la teneur en

eau, généralement exprimée en épaisseur équivalente (cm), et la réflectance de la végétation ont été bien étudiées depuis les années 1970, l'estimation de cette variable par des méthodes passives de télédétection à partir d'une plate-forme aérienne (AVIRIS) ou spatiale (ASTER, MERIS, MODIS) est beaucoup plus récente. Là encore, la quasi-totalité des algorithmes existants reposent sur des bases semi-empiriques (relations de type indices de végétation) et les produits obtenus ont été très rarement validés par des mesures au sol.

### Matière sèche

La matière sèche, qui constitue le squelette des feuilles, est la principale réserve de carbone et d'azote dans la plante. *L'imagerie hyperspectrale permet d'estimer le rapport carbone / azote en forêt donnant accès au taux de décomposition de la matière organique par les micro-organismes du sol, donc au dégazage de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère lié à cette activité microbienne.* Des indices spectraux sensibles à la masse foliaire surfacique (*Leaf Mass per Area*), paramètre important des modèles de croissance de végétation, ont été conçus grâce au modèle PROSAIL de réflectance de la végétation et ont été appliqués avec succès à des images Hyperion. *La possibilité de détecter et quantifier la matière sèche (cellulose, hémicellulose, lignine, etc.) par télédétection hyperspectrale est également un enjeu essentiel pour l'évaluation et le suivi de la désertification.* En effet, la végétation caractéristique des zones arides a une activité chlorophyllienne très faible, voire nulle, pendant une bonne partie de l'année, et les indices de végétation classiques tels que le NDVI ne sont pas très efficaces pour estimer la variation du taux de couverture. C'est typiquement le cas dans le Nord du Sahara où le sol est recouvert par une maigre végétation steppique (petits buissons bas). Des indices spectraux sensibles à la litière, comme le CAI (*Cellulose Absorption Index*), ont un potentiel élevé pour la caractérisation du couvert en conditions de végétation sèche. De nombreuses études s'appuyant sur des images hyperspectrales AVIRIS et HyMap ont également permis de déterminer avec succès sur une même scène le taux de couverture du sol, en distinguant la fraction de végétale verte

de la fraction de végétation sèche, grâce à l'inversion de modèles de mélange spectraux.

### Fluorescence passive

Une fraction faible mais mesurable du rayonnement réfléchi par un couvert végétal est en réalité une émission de fluorescence par la chlorophylle *a* (dans le rouge et le proche-infrarouge). La télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne dans les bandes d'absorption de l'oxygène atmosphérique se révèle être une approche prometteuse pour suivre le fonctionnement des couverts végétaux depuis une plate-forme aéroportée ou spatiale. L'interprétation de ce signal qui dépend à la fois de l'environnement de la feuille (qualité et intensité de la lumière incidente, température, *etc.*) et de paramètres intrinsèques (état physiologique, espèce, composition biochimique, *etc.*) est complexe. Le projet de mission spatiale FLEX (*FLuorescence EXplorer*) de l'ESA a ouvert de nouvelles perspectives dans ce domaine.

### Besoins

Les variables d'intérêt sont celles décrivant la biochimie des feuilles (teneur en pigments, en eau et en matière sèche), celles caractérisant la structure du couvert végétal (LAI, fraction de couverture, fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé), et enfin celles permettant la discrimination des espèces végétales, qui découle partiellement des deux premières catégories (l'analyse de texture des images à très haute résolution ou les nouvelles techniques d'altimétrie LiDAR constituent des outils complémentaires). Enfin, la détermination de l'humidité et de la quantité de matière organique du sol sous-jacent fait aussi l'objet de travaux de recherche (paragraphe « Géosciences – Sciences de la Terre Solide », qualité des sols).

Toutes les échelles sont étudiées, de la feuille à l'écosystème en passant par la plante isolée, la parcelle et la région agricole. Cette intégration du signal à différentes échelles permet de séparer les sources de variation de la réflectance. Elle est classique en modélisation.

Certaines applications requièrent un spectre continu ( $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ ) dans le domaine solaire compris entre 400nm et 2500nm. Pour la fluorescence passive, le domaine spectral est

réduit mais la résolution est de l'ordre de 0,5nm. D'autres applications se contentent d'un nombre réduit de bandes spectrales de largeur plus importante.

### Capacités de l'imagerie hyperspectrale à répondre aux besoins

L'imagerie hyperspectrale devrait changer notre manière de « voir » la végétation qui est à ce jour essentiellement caractérisée par sa structure (LAI). La détermination précise des constituants biochimiques des couverts végétaux – discrimination entre pigments photosynthétiques, séparation de l'eau et de la matière sèche – requiert plusieurs bandes spectrales étroites ( $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ ) dont le nombre et la position restent encore à définir. Il faudra aussi tenir compte de l'atténuation du signal par l'atmosphère (absorption par les gaz et diffusion par les molécules gazeuses et les aérosols) qui limitera les plages de longueurs d'onde disponibles, en particulier dans l'infrarouge. La caractérisation fine du *red edge* dont le point d'inflexion semble être peu sensible à la couleur du sol et aux conditions atmosphériques nécessitera, elle aussi, plusieurs bandes spectrales contiguës. Enfin, pour ce qui est de la mesure de fluorescence passive dans les bandes de l'oxygène, qui semble très prometteuse pour déterminer la productivité végétale et donc la séquestration du  $\text{CO}_2$  par les plantes, l'imagerie hyperspectrale s'impose.

### Volet utilisateurs

Les applications sont nombreuses en agriculture de précision (gestion des apports nutritionnels, comme l'azote et le potassium), en écophysologie (photosynthèse, flux de carbone et autres gaz trace), en environnement (prévision des feux de forêt, contaminations environnementales), ou dans l'étude des écosystèmes (changements climatiques). Par exemple, le réchauffement climatique s'accompagne d'un allongement de la durée de la période végétative, comme l'ont montré Myneni et ses collègues il y a une dizaine d'années, et à plus long terme, d'un renouvellement des espèces végétales (remplacement des peuplements de conifères par des peuplements de feuillus). Les zones arides ou semi-arides, susceptibles de réagir rapidement à un changement de climat, font

aussi l'objet d'une attention croissante. Dans tous ces cas, les apports de l'imagerie hyperspectrale sont essentiels.

*Les capteurs Sentinel 2 et Sentinel 3 posséderont entre une dizaine et une quinzaine de bandes spectrales étroites dans le visible et le proche-infrarouge, couvrant les principaux domaines d'absorption des pigments foliaires, y compris la région du red edge. En revanche, les longueurs d'onde comprises entre 900nm et 2500nm sont très peu échantillonnées, alors qu'elles sont les seules à renseigner sur le contenu en eau et en matière sèche des plantes ; en outre, la largeur des bandes spectrales dans ce domaine de longueurs d'onde variera entre 20nm et 180nm, ce qui est beaucoup trop large pour de nombreuses applications.* De plus, la résolution spatiale actuelle de l'ordre de la trentaine de mètres reste insuffisante pour un certain nombre d'applications, telles que l'agriculture en petit parcellaire ou en contexte arboré (vergers et plantations) dans lesquels l'hétérogénéité intrapixellaire est très forte.

## 2.1.2 Les Ecosystèmes Côtiers et Lacustres

**Intervenants :** Jean-Marie FROIDEFOND (Université de Bordeaux 1 – EPOC) et Marc LENNON (société Actimar)

La communauté des utilisateurs est particulièrement importante et diversifiée ; plusieurs organismes publics et sociétés privées sont déjà engagés dans la mise en œuvre d'applications opérationnelles. Les applications de l'hyperspectral concernent la qualité de l'eau, les communautés benthiques, les faibles bathymétries et la nature des fonds ainsi que l'interface terre-mer. L'imagerie hyperspectrale permet d'une part une meilleure estimation des variables observées que les capteurs multispectraux et d'autre part l'accès à de nouvelles variables d'intérêt. Le potentiel de l'imagerie hyperspectrale ainsi que l'apport par rapport à l'imagerie multispectrale sont bien démontrés pour ce thème.

Echelle TRL : 5

### Contexte

Les activités anthropiques modifient les écosystèmes côtiers et lacustres et contribuent à l'apparition de contaminations passagères ou durables.

La directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE du Parlement et du Conseil de l'Europe du 23 octobre 2000), recommande la mesure et le suivi des paramètres de la qualité des eaux (turbidité, matières en suspension d'origine minérale et végétale, matière organique dissoute, polluants organiques ou inorganiques dissous ou flottants). Le suivi de ces paramètres est également nécessaire aux collectivités locales (qualité des eaux de baignade), aux industries côtières, aux entreprises d'adduction d'eau et aux syndicats de producteurs (pêche et conchyliculture). L'importance des coûts conduit à limiter le nombre de stations installées. A l'échelle globale, les trois quarts des eaux continentales ne seront pas suivies dans un futur proche.

Le suivi du fond et des organismes vivants sur l'estran et à faible profondeur (algues, mangroves, récifs coralliens, parcs ostréicoles, etc.) fait aussi l'objet d'une surveillance dans le cadre des protocoles de suivi de la biodiversité et de conservation des espèces et habitats d'intérêt communautaire. L'eutrophisation ponctuelle ou permanente de certaines zones estuariennes nécessite égale-

ment la mise en place de moyens adaptés d'observation.

Les applications de l'imagerie hyperspectrale dans le domaine spatial concernent au moins quatre domaines :

- la surveillance de la qualité des plans d'eau,
- les peuplements benthiques dans les zones intertidales et sur les petits fonds,
- la morphologie sous marine dans les eaux à turbidité faible,
- la caractérisation fonctionnelle d'éléments à l'interface terre-mer en lien avec les changements littoraux (voir figure 2).

Une partie seulement des informations d'intérêt est aujourd'hui accessible grâce à l'imagerie multispectrale.

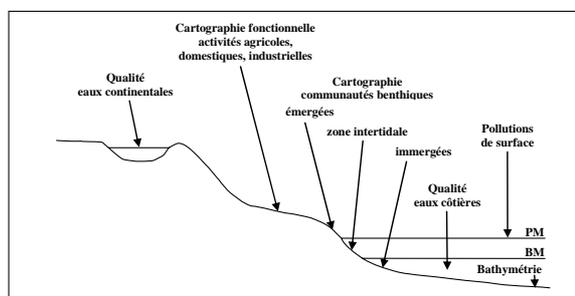


Figure 2 – Domaines d'application de l'imagerie hyperspectrale à l'interface terre-mer.

## Volet scientifique

### Qualité de l'eau

La télédétection optique de la couleur de l'eau s'est beaucoup développée en imagerie multispectrale (LANDSAT, SPOT). Les capteurs SEAWIFS, MERIS ou MODIS des satellites TERRA et AQUA de la NASA, permettent de suivre la turbidité et les concentrations en particules minérales en suspension, en chlorophylle et en matières organiques dissoutes colorées. Ces paramètres de couleur de l'eau sont aujourd'hui fournis de manière opérationnelle et exploités dans le cadre d'importants projets européens tels que Globcolour, Mersea, et Marcoast, et bientôt intégrés dans les « Marine Core services » du GMES. Les propriétés optiques des eaux continentales et côtières (cas 2) sont plus complexes que celles des eaux pélagiques (cas 1). Les eaux littorales et lacustres présentent des mélanges organique-inorganique et dissous-particulaire plus complexes avec des concentrations pouvant être bien plus élevées que celle rencontrées dans les eaux océaniques. En outre, les milieux côtiers présentent une variabilité temporelle et spatiale plus forte ce qui complique leur suivi par satellite.

Les besoins portent sur les composants particuliers et dissous. Certains composants sont des marqueurs de l'érosion des sols. En milieu tropical, la matière particulaire inorganique permet ainsi de suivre l'impact des changements régionaux (déforestation) et globaux (changements climatiques). Le matériel particulaire transporte d'autres composants comme les nutriments ou certains métaux. Le suivi de la turbidité des eaux des mares et lacs en milieu tropical est un paramètre d'intérêt dans l'étude de la dynamique de certaines maladies (paludisme, dengue). D'autres fourniront des informations sur l'état d'eutrophisation du milieu. La caractérisation des pigments phytoplanctoniques fournira des informations sur l'« état de santé » des plans d'eau. Certains polluants peuvent aussi être repérés par leur signature spectrale. Les matières organiques dissoutes colorées et les substances jaunes ont un coefficient d'absorption élevé, décroissant du bleu au jaune. Dans le cadre de la reconnaissance des blooms d'algues toxiques ou nuisibles, la couleur de ces algues est un

indice important : eaux vertes (*Alexandrium*, *Dinophysis*), eaux rouges (*Karenia*, *Noctiluca*), eaux brunes (*Aureoumbra*), eaux nacrées (*Coccolithophorid*). Il est donc intéressant de pouvoir déterminer les différents pigments phytoplanctoniques. Ces pigments ont des coefficients d'absorption spécifiques qui varient avec la longueur d'onde. La reconnaissance des cyanobactéries est également un enjeu important en ce qui concerne la surveillance de la qualité de l'eau. Dans les longueurs d'onde plus élevées comprises entre le jaune et le proche infrarouge, les mesures hyperspectrales permettent de déterminer et de quantifier les minéraux en suspension et en particulier les teneurs en fer particuliers, en carbonates et en silico-aluminates. Les hydrocarbures possèdent des signatures spectrales permettant d'estimer l'épaisseur relative.

*L'imagerie hyperspectrale permet d'une part l'augmentation de la précision d'estimation des variables actuellement observées par les capteurs multispectraux (turbidité, pigments, matière organique dissoute, matière en suspension), et d'autre part l'accès à de nouvelles variables d'intérêt (identification et quantification de composants particuliers et dissous : type et taille de particules en suspension, types de pigments, de matière organique, cyanobactéries, polluants inorganiques, etc.).*

Une haute résolution spectrale (10nm) est nécessaire à l'estimation des paramètres dans les eaux du cas 2, en particulier dans la partie visible du spectre. La gamme spectrale idéale (300-800nm) inclut l'ultraviolet, utile pour certains polluants. Alors que la haute ou très haute résolution spatiale sera nécessaire pour des « cibles » de taille modeste (mares, rivières), on pourra utiliser des données de résolution spatiale modérée pour des objets plus étendus (lacs, lagunes, estuaires, une dizaine de mètres peut être suffisant). La résolution temporelle dépend des applications, elle peut être critique pour la surveillance de blooms par exemple et doit être privilégiée autant que la résolution spectrale afin de produire des applications opérationnelles, tandis que le moment de passage peut être critique dans les mers à marée. Un SNR fort

(idéalement proche de 1000) est nécessaire à cause de la faible énergie réfléchi par la colonne d'eau. La précision des estimations est liée à la qualité de la correction atmosphérique en zone littorale qui reste un problème difficile.

### **Cartographie et suivi des communautés benthiques**

Le suivi des communautés biologiques vivant sur le fond (algues, récifs coralliens, mangroves) est aujourd'hui réalisé grâce aux capteurs satellitaires multispectraux et est limité à la discrimination de grands ensembles (algues vertes, brunes, rouges). Elle permet difficilement l'identification d'espèces spectralement proches ou l'évaluation de l'état de santé des récifs coralliens par exemple. Les programmes Rebent (suivi du réseau benthique) et Mesh (suivi des écosystèmes immergés en zones de petits fonds) pilotés par l'IFREMER sont des exemples représentatifs et utilisent principalement des données SPOT.

Les besoins se situent essentiellement dans l'identification des espèces en présence. Ceci est particulièrement vrai pour le suivi fin de la biodiversité et des eutrophisations (identification des espèces invasives et résidentes). Le suivi de l'état de santé des récifs coralliens nécessite également l'accès à une définition spectrale très précise permettant la détection de caractéristiques spectrales fines représentatives d'un état de stress. *La télédétection hyperspectrale est aujourd'hui utilisée à grande échelle pour la cartographie des communautés benthiques macroscopiques ou microscopiques, en particulier dans le cadre de l'observation et du suivi des eutrophisations par les algues vertes ou du suivi de l'état de santé des récifs coralliens.* L'imagerie hyperspectrale constitue pour ces applications le seul mode de télédétection permettant l'accès aux informations d'intérêt. Les moyens utilisés sont aéroportés et utilisent la gamme comprise entre 400nm et 1000nm.

*Aux capacités de discrimination de grands types de peuplement offertes par l'imagerie multispectrale, l'imagerie hyperspectrale y ajoute les capacités d'identification des espèces et de caractérisation de l'état de santé de certaines communautés, comme les récifs coralliens.*

Une haute résolution spatiale permet l'identification des espèces dans des zones à très forte biodiversité. Une haute résolution spectrale ( $\geq 10\text{nm}$ ) est nécessaire dans la gamme spectrale comprise entre 400nm et 1000nm afin de pouvoir discriminer des espèces. La résolution temporelle n'est pas critique sauf pour des applications de surveillance d'eutrophisation. Le moment de passage est critique, particulièrement pour les zones intertidales. Certaines applications, comme le suivi des eutrophisations, demandent idéalement de suivre l'évolution de la situation à basse mer au cours de chaque cycle de marée. La constitution de bibliothèques spectrales établies en laboratoire et/ou sur le terrain est nécessaire pour ces applications. Les capacités d'identification sont directement liées à la précision de la correction atmosphérique. Des algorithmes d'identification sont aujourd'hui disponibles et continuent d'être améliorés.

### **Bathymétrie et nature du fond**

La bathymétrie est estimée actuellement à partir de données multispectrales dans les zones de petits fonds et faible turbidité à des fins de production opérationnelle de spatio-cartes marines (SHOM) et de suivi de la dynamique sédimentaire (SIBA : application aux Passes du Bassin d'Arcachon). Depuis quelques années, l'utilisation de mesures hyperspectrales a montré qu'il était possible de réaliser des levés bathymétriques et de cartographier les principaux faciès sédimentaires : sable siliceux, vase, mélange sable-vase, sables coralliens, sables volcaniques, microphyto-benthos, surfaces végétalisées, ainsi que les taux d'humidité des estrans.

L'estimation de la bathymétrie à l'aide d'imagerie multispectrale souffre d'un manque de robustesse vis-à-vis du type de fond et d'un manque de précision dû à la faible résolution spectrale des données. La détermination de la nature du substrat et de la couverture végétalisée est nécessaire. L'imagerie hyperspectrale permet d'améliorer sensiblement la précision de l'estimation.

*L'imagerie hyperspectrale permet d'augmenter la précision et la couverture des estimations bathymétriques, engendrant ainsi la réduction des moyens à la mer nécessaires au suivi de la dynamique sédimentaire dans les zones à faible turbidité.*

Une haute résolution spatiale (5m) permet l'estimation de la bathymétrie au plus proche de la côte. L'ensemble du spectre compris entre 400nm et 2500nm à haute résolution ( $\geq 10\text{nm}$ ) est nécessaire pour connaître la nature des sédiments. La résolution temporelle n'est pas critique mais le moment de passage peut l'être, particulièrement dans les mers à marée en fonction de la turbidité. Un SNR fort (idéalement proche de 1000) est nécessaire à cause de la forte diffusion de l'énergie dans la colonne d'eau. Des données exogènes de bathymétrie mesurée sont nécessaires à la calibration des algorithmes. Des algorithmes d'inversion sous contrainte permettant l'estimation de la bathymétrie sont aujourd'hui disponibles. Dans certains cas, des données de spectroradiométrie de terrain acquises conjointement aux observations spatiales sont nécessaires.

### Interface Terre-Mer

La télédétection des activités et ensembles paysagers ayant un impact sur le littoral est aujourd'hui réalisée à l'aide de capteurs satellitaires optiques et radars, utilisés principalement à des fins de cartographie d'utilisation des sols et de l'espace. Les méthodes utilisées visent essentiellement à discriminer différentes classes d'utilisation de cet espace.

La caractérisation fonctionnelle de certaines activités, agricoles et industrielles en particulier, ou de certains espaces d'intérêt (zones humides notamment jouant un rôle clé dans le filtrage et l'évapotranspiration de certains polluants à l'interface terre-mer) nécessite l'identification des espèces en présence ou du mode d'usage des sols, ainsi que la quantification de variables caractérisant certains éléments polluants. Les capacités de l'imagerie hyperspectrale à fournir des informations utiles à la description fonctionnelles des activités agricoles et des zones humides tampon dans les bassins versants amont ont été démontrées à l'aide de données hyperspectrales aéroportées.

*Aux capacités de discrimination offertes par l'imagerie multispectrale, l'imagerie hyperspectrale y ajoute les capacités d'identification et de quantification de variables, permettant le passage de la cartographie spatiale à la caractérisation fonctionnelle de certaines activités et espaces affectant les écosystèmes côtiers.*

Les caractéristiques spatiales et spectrales nécessaires, ainsi que les algorithmes disponibles sont les mêmes que pour la cartographie des communautés benthiques.

### Synthèse

Thème	Quantification	Identification	Caractérisation
<b>Qualité de l'eau</b>	Turbidité Pigments (Chla, etc.) Matière organique dissoute (CDOM, etc.) Matière minérale / organique en suspension (SSM, etc.)	Espèces phytoplanctoniques Blooms d'algues toxiques Substances dissoutes Polluants de surface Type de sédiments en suspension	Érosion / Altération des sols Etat trophique eaux côtières et intérieures Niveau de pollution eaux côtières et intérieures
<b>Communautés benthiques</b>	Pigments (Chla, etc.) Taux de couverture algal Biomasse (sous certaines conditions)	Espèces d'algues	Biodiversité littorale Niveau d'eutrophisation Etat santé récif corallien Etat santé mangrove
<b>Bathymétrie et nature du fond</b>	Hauteur fond	Type de sédiments	Morphologie sédimentaire
<b>Interface terre-mer</b>	Hydromorphie	Espèces végétation (zones humides, espaces boisés, etc.) Usages sols agricoles	Fonctions zones humides Modes d'usages agricoles Liens bassin versant / eutrophisation littorale

*Tableau 1 – Capacités de quantification, d'identification et de caractérisation de l'imagerie hyperspectrale pour l'étude de la qualité de l'eau, des communautés benthiques, de la bathymétrie et de la nature du fond et de l'interface terre-mer.*

### Volet utilisateurs

En France, plusieurs laboratoires de recherche utilisent des capteurs hyperspectraux et travaillent dans le domaine de la couleur de l'eau. C'est d'abord le cas du Laboratoire Océanographique de Villefranche (LOV, UMR 7093). D'autres laboratoires ont suivi cet exemple : le LSEET-LEPI (UMR 6017 à Toulon), le Laboratoire ELICO (UMR ULCO 8013 de l'Université du Littoral), le Laboratoire de Biologie Marine de la Faculté des Sciences et des Techniques de l'Université de Nantes, le Laboratoire LASAGEC<sup>2</sup> de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), le laboratoire EPOC (Université Bordeaux 1), l'équipe hydrologie spatiale du LMTG (Toulouse 3/IRD), *etc.* Dans le domaine de la caractérisation des activités agricoles et des espaces naturels à l'interface terre-mer, le laboratoire COSTEL de l'Université de Rennes 2 développe des méthodes innovantes utilisant la télédétection hyperspectrale.

De nombreux organismes sont engagés dans la mise en œuvre d'applications futures utilisant les informations de qualité de l'eau. C'est le cas de l'IRD (UR 103), d'IFREMER (Dyneco). Ces investigations se poursuivent et compléteront le Service PREVIMER (Prévision des concentrations en chlorophylle, ECO-MARS3D). De même, certains Observatoires de Recherche en Environnement (ORE) et Systèmes d'Observations (SU) intègrent progressivement les données spatiales afin de mener à bien leurs tâches de suivi à long terme des écosystèmes. Par exemple, l'ORE HyBAm (Contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazone) maintenu par l'IRD intégrera prochainement la quantification des flux sédimentaires par satellite (capteur MODIS) dans sa base de données. Des entreprises développent des traitements spécifiques, telles que : ACRI, ACTIMAR, CLS, NOVELTIS. La Lyonnaise des Eaux (groupe SUEZ) soutient des recherches en télédétection spatiale pour le suivi de la qualité des eaux et la surveillance des eaux de baignade ou des installations conchylicoles. Le groupe VEOLIA est également intéressé. Des Syndicats Intercommunaux seront des utilisateurs

potentiels de ce type de surveillance qui s'inscrit dans le souci d'une observation à long terme, type GMES. Des méthodes d'observation et de suivi de l'évolution des communautés benthiques sont mises en œuvre par IFREMER et l'IRD (récifs coralliens, mangroves) et impliquent également les Agences de l'Eau en charge des suivis de la biodiversité littorale. Le suivi d'eutrophisation par les algues vertes est actuellement pris en charge par le CEVA (Centre d'Etudes et de Valorisation des Algues) avec l'aide de sociétés privées telles qu'ACTIMAR mettant en œuvre des moyens de télédétection hyperspectrale aéroportée, avec le soutien financier des collectivités territoriales et des industries utilisatrices des eaux côtières telles qu'EDF. Les collectivités et Agences de l'Eau sont également à la recherche de moyens de caractérisation des impacts des activités et espaces amont sur les écosystèmes littoraux. Thalès poursuit des études en estimation de la bathymétrie à l'aide de mesures hyperspectrales tandis que le SHOM utilise la télédétection spatiale multispectrale pour l'établissement de spatio-cartes marines dans le Pacifique. Le BRGM développe des analyses liées à l'érosion et au suivi du trait de côte.

Les enjeux économiques sont aujourd'hui difficiles à chiffrer. Les acteurs précités sont des utilisateurs potentiels de l'imagerie hyperspectrale spatiale. La technique, qui s'est largement démocratisée au cours des 10 dernières années grâce aux activités amont des laboratoires de recherche, aux projets mis en œuvre sur différentes thématiques et à l'accès aux données *via* des capteurs aéroportés en particulier, tend à montrer que les apports spécifiques de ce type de données sont aujourd'hui en voie d'être largement reconnus. La disponibilité de données spatiales permettrait de franchir le pas du multispectral à l'hyperspectral dans de nombreuses applications et permettrait l'accès à des informations inaccessibles avec les moyens de télédétection actuels.

## La Science

### 2.1.3 Les Géosciences – Sciences de la Terre Solide

**Intervenants :** Véronique CARRERE (Université de Nantes), Sabine CHABRILLAT (GFZ) et Stéphane CHEVREL (BRGM)

L'exploitation des données hyperspectrales en Géosciences – Sciences de la Terre Solide est bien maîtrisée et son potentiel a été illustré en géologie, minéralogie, pétrologie, prospection minière et pétrolière, environnements miniers, qualité et dégradation des sols, volcanisme, et en gestion de crises. L'imagerie hyperspectrale est mûre pour investir plusieurs marchés parmi lesquels le suivi des sites pollués et la protection des sols (EU directive 2006 21/EC), l'érosion et la dégradation des terres (convention des Nations Unies pour combattre la désertification), l'ouverture de nouveaux sites de prospection minière. Un intérêt pour l'infrarouge thermique est établi pour plusieurs applications (prospection minière, volcanisme).

Echelle TRL : 5-6

#### Contexte

L'analyse spectrale du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement émis par la surface terrestre constitue une importante source d'information sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques des matériaux. L'intérêt de cette technique pour les applications géologiques a été démontré dans les années 1980 à partir des mesures en laboratoire. Aujourd'hui, la spectro-imagerie, notamment proche-infrarouge, est en plein essor dans le domaine des Sciences de la Terre et de l'Environnement.

Historiquement, ce sont les zones d'altération hydrothermale de Cuprite et Goldfield au Nevada (Etats-Unis) qui ont servi de zones test à la définition des spécifications des premiers capteurs hyperspectraux et à la validation des données. Depuis, l'obtention de cartes géologiques quantitatives a été le domaine primaire des images hyperspectrales, et a établi la renommée de la technique dans les années 1980 avec, par exemple, l'utilisation des données AIS (le précurseur d'AVIRIS) pour cartographier et déterminer les abondances de roches ultramafiques sur le site du dyke de Moses Rock dans l'Utah (Etats-Unis), permettant de tirer des conclusions sur la mise en place du dyke. Les capteurs hyperspectraux ont ainsi ouvert une nouvelle ère de la cartographie géologique offrant, en

plus de l'information structurale/tectonique, un accès direct, synoptique et quantitatif à la minéralogie des roches de surface. Ainsi, de grandes compagnies minières et pétrolières considèrent maintenant la spectro-imagerie comme une source d'information indispensable tant pour la prospection que le suivi de la remédiation de sites miniers abandonnés.

Les applications de l'imagerie hyperspectrale en géosciences sont variées : géologie, minéralogie, pétrologie, la géologie structurale avancée, minière (le CEA a par exemple ainsi produit une étude de prospection opérationnelle au Niger pour la COGEMA), prospection pétrolière (altérations liées à la circulation des fluides dans des fractures ou fissures à toutes les échelles, du terrain aux carottes), environnement minier (cartographie des panaches de contamination, minéraux du drainage minier acide, minéraux porteurs de contamination, impact des contaminations sur les sols et la végétation, contamination des eaux, cartes prédictives du pH des sols), environnement industriel, volcanisme (chronologie des coulées de laves par analyse des altérations de surface, composition en infrarouge thermique), composition des panaches volcaniques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), qualité des sols, *etc.*

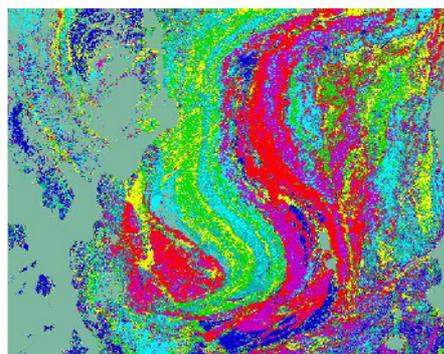
## Volet scientifique

### Prospections minière et pétrolière

De nombreuses compagnies minières et pétrolières exploitent la télédétection hyperspectrale pour la prospection (Noranda / Canada, AUG Signals / Canada, PIRSA / Australie, *etc.*). En conséquence, des projets regroupant ces compagnies, les services géologiques nationaux et les opérateurs d'instruments hyperspectraux se banalisent, l'investissement dans la location ou l'achat

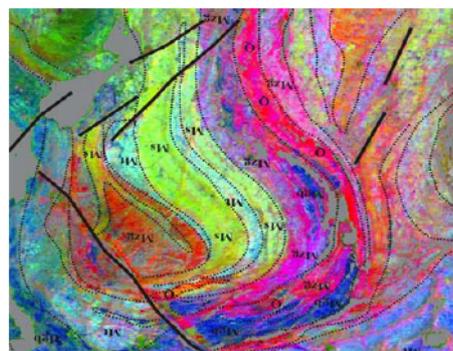
d'un spectromètre imageur étant compensé par le gain fait sur les missions de terrain et les analyses nécessaires à l'établissement de cartes de prospection.

De nombreux exemples montrent clairement que l'imagerie hyperspectrale permet une cartographie précise de zones parfois difficiles d'accès (figure 3) ou de découvrir de nouveaux sites d'exploitation.



AUG Signals' classified image of 7 materials

■ Blue - veg/metagabbro  
 ■ Dark cyan – metatonalites  
 ■ Light cyan – metatonalites



Ground truth image provided by the Nature Resource of Canada

■ Red – quartzites ■ Green - psammites  
 ■ Magenta monzo - granites  
 ■ Yellow - psammites

Figure 3 – Comparaison entre carte obtenue par classification d'une image hyperspectrale (Probe-1) à gauche et minute de terrain à droite pour un secteur de l'île de Baffin, Canada.

Une campagne aéroportée HyMap au-dessus des Flinders Ranges au nord-est d'Adelaïde (Australie), effectuée pour la compagnie minière De Beers, a permis la découverte de deux nouvelles zones de kimberlites altérées. Ces zones présentent une forte concentration en Ni, Cr et Nb et peuvent être des gisements potentiels de diamants (163 micro-diamants pour un total de 1,46 carats ont été trouvés dans des environnements similaires).

Il faut également mentionner l'importance de l'imagerie hyperspectrale dans la cartographie du *régolithe*<sup>3</sup> qui présente de

forts enjeux socio-économiques (l'essentiel des activités humaines s'y déroulant). Son extrême variabilité spatiale le rend difficile à cartographier par des méthodes traditionnelles et l'imagerie hyperspectrale apporte une réponse appropriée.

*Il est ainsi possible de localiser des gisements potentiels de nickel, non détectables par les méthodes de prospection classiques (comme l'aéro-magnétisme) grâce à la cartographie de minéraux marqueurs de l'altération des roches mères (roches ultrabasiques) tel que le talc, facile à identifier par sa signature spectrale mais difficile à cartographier directement sur le terrain.* De même, le taux de cristallinité de la kaolinite, qui se traduit dans sa signature spectrale par un doublet à 2,16µm et 2,2µm, peut être déterminé à partir des données hyperspectrales et servir à la différenciation du matériau

<sup>3</sup> Le régolithe, aussi appelé proche sous-sol, est l'espace compris entre le sol cultivable enrichi en matière organique et la roche saine

transporté (kaolinite peu ordonnée) par rapport au matériau *in situ* (kaolinite bien cristallisée) dans le régolithe. Enfin, cette information peut être complétée par l'analyse de la position en longueur d'ondes de l'absorption spécifique des micas blancs (muscovite) à 2,2µm. En effet, ce décalage de l'absorption de ~2185nm à ~2215nm, *délectable uniquement par imagerie hyperspectrale*, donne une information précieuse sur la signature de fluides d'altération hydrothermale différents permettant ainsi un lien avec les minéralisations d'or. La carte de la position de l'absorption établie à partir des images HyMap a permis de détecter des secteurs à muscovite intéressants non cartés précédemment

*Des zones d'altération inconnues ont pu être identifiées et caractérisées grâce à l'imagerie hyperspectrale malgré l'importance du régolithe. Tous ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes en prospection minière.*

En prospection pétrolière, des études de détection de fuites d'hydrocarbures par imagerie hyperspectrale ont été effectuées avec succès sur des sites en Californie du Sud. Des zones de microfuites et de sols contaminés ont été identifiées. La détection des fuites d'hydrocarbures peut également reposer sur des indicateurs indirects tels la présence d'oxydes de fer, d'argiles, de carbonates liés aux réactions chimiques entre hydrocarbure et roche ou sol, ou le stress de la végétation qui peuvent également être facilement détectés et cartographiés par spectro-imagerie.

*Le spectro-imageur aéroporté HyMap a permis de cartographier de manière précise et quantitative des minéralogies particulières, leurs abondances, et dans certains cas leur physico-chimie. Les capteurs multispectraux de type ASTER permettent seulement de cartographier de grands ensembles minéralogiques sans distinction.*

*Le Comité Geosat Inc., qui regroupe une centaine de compagnies pétrolières, minières et d'ingénierie, a mis en avant la télédétection hyperspectrale comme source d'information indispensable à la prospection « onshore » et a financé de nouveaux projets de recherche et développement.*

## Géologie de l'Environnement

Un des thèmes majeurs en géologie de l'environnement est la gestion des sites miniers en activités ou abandonnés, conformément à la directive européenne sur la qualité des sols.

Un bon exemple de l'efficacité de la spectro-imagerie pour le *suivi des drainages miniers acides* est donné par l'« EPA Superfund Project » aux Etats-Unis. Plusieurs sites miniers actifs ou abandonnés ont été survolés par le spectro-imageur AVIRIS dans le cadre de ce projet alliant l'Agence de Protection de l'Environnement américaine, l'U.S. Geological Survey et le Jet Propulsion. Ce projet a permis le développement d'une méthode opérationnelle de détection de minéraux marqueurs (essentiellement oxydes, hydroxydes et sulfates de Fe) permettant la localisation rapide des zones contaminées et le suivi de la remédiation. Des modèles physico-chimiques ont permis d'établir un lien entre minéral présent, pH et degré de solubilité. L'EPA a estimé avoir économisé 2 ans de travail sur le terrain pour identifier et cartographier les sources soit plus de 2 millions de dollars.

*Seule la capacité de détection et de cartographie offerte par l'imagerie hyperspectrale permet d'établir des documents directement utilisables par les compagnies minières, agences environnementales ou autres organismes impliqués dans la gestion de sites miniers actifs ou abandonnés.*

## Risques naturels : aléa, retrait, gonflement des argiles

Les mouvements de terrains consécutifs au retrait / gonflement des argiles représentent, après les inondations, la sinistralité la plus coûteuse en France et dans le monde au titre des catastrophes naturelles. Entre 1991 et 2003, près de 5000 communes situées dans 75 départements ont été reconnues en état de catastrophe naturelle avec à la clé une indemnisation supérieure à 3 milliards d'euros (Fiche BRGM n°3, octobre 2003).

*Une étude-test dans la région de Denver, Colorado (Etats-Unis) a montré la capacité unique de l'imagerie hyperspectrale pour établir une carte des zones à risques même en présence d'un couvert végétal important, permettant ainsi d'économiser*

*plusieurs millions de dollars en réduisant les échantillonnages de terrain et les analyses géotechniques.*

### Qualité / dégradation des sols

Des indicateurs sur les propriétés des sols tels que qualité, dégradation (salinisation, taux d'érosion, déposition), genèse et formation, classification et cartographie, taux d'humidité peuvent être dérivés et cartographiés à l'aide de l'imagerie hyperspectrale. Des phénomènes de dégradation des sols liés aux changements climatiques et/ou à des facteurs humains tels que apparition de croûtes de surface, augmentation de l'érosion, diminution des taux d'infiltration des eaux pluvieuses, salinisation des sols, disparition des couches de surfaces, ont été étudiés par télédétection et en particulier l'apport de l'imagerie hyperspectrale a été largement reconnu.

*La télédétection hyperspectrale permet la quantification des paramètres physico-chimiques et biochimiques importants concernant les sols et leur rôle dans le cycle hydrologique et les changements climatiques. La spectrométrie visible, proche-infrarouge et moyen infrarouge représente une opportunité unique d'augmenter notre capacité d'observation directe des sols.*

### Grands projets

Pour ce qui concerne la cartographie géologique et la prospection minière, les pays impliqués sont surtout l'Afrique australe et l'Australie. Pour l'Europe, la directive sur la gestion des déchets de l'industrie extractive (EU Directive 2006 21/EC) ouvre un marché potentiel important en ce qui concerne l'inventaire et la réhabilitation des sites pollués. Il en est de même pour la future directive sur les sols (Soil Thematic Strategy). Le projet « Globalsoilmap.net » a pour objectif de créer des cartes de propriétés fonctionnelles de sol sur au moins 80% de la planète à une résolution de 100m (objectif à 10 ans). La télédétection hyperspectrale sera un outil extrêmement utile pour une cartographie numérique des sols.

L'Allemagne, et plus récemment la Belgique, sont parmi les pays en pointe pour l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale, plus particulièrement pour la dégradation et la protection des sols, l'observation de la forêt et

le domaine côtier. Des financements gouvernementaux importants ont été débloqués (ministère de la recherche, programme STEREO) tant en support pour des campagnes aéroportées que pour le développement d'instrument, avec des collaborations nationales et internationales suivant les cas.

Au niveau national, un programme en cours sur l'aléa « retrait-gonflement », utilise l'imagerie hyperspectrale en développement méthodologique.

Par ailleurs, la communauté est en train de se structurer au niveau européen par le biais de réseau d'utilisateurs (HYRESSA) ou d'éducation (HYPER-I-NET).

### Caractéristiques

D'une manière générale, les caractéristiques requises en termes de capteurs sont les suivantes :

- gamme spectrale : VNIR – SWIR (400-2500nm), IRT (8-12 $\mu$ m),
- échantillonnage spectral : VNIR – SWIR : 10-15 nm, IRT : 0,25 cm<sup>-1</sup>,
- couverture spatiale : 50km x 50km (globale),
- résolution spatiale : < 30m (idéalement 10m ou moins),
- résolution temporelle : mensuelle pour la géologie « classique », exceptionnellement une fréquence plus élevée est nécessaire. Pour le littoral, deux relevés par an pour le suivi fin de la répartition des sédiments (un après l'été, l'autre après l'hiver) pour affiner les modèles hydrosédimentaires,
- rapport signal sur bruit : > 100 dans le SWIR.

### Intérêt éventuel de l'hyperspectral dans l'infrarouge thermique (8-12 $\mu$ m)

Les propriétés thermo-optiques des surfaces continentales présentent également un grand intérêt en géosciences. En effet, les absorptions fondamentales de certains minéraux (quartz, silicates en général) se produisent dans l'infrarouge thermique. L'hyperspectral dans l'infrarouge thermique permet par exemple de distinguer silcrètes

(encroûtements siliceux) et calcrètes (encroûtements carbonatés) et pourrait constituer un outil complémentaire à l'hyperspectral visible à moyen infrarouge. La discrimination et l'identification de certains types de surfaces rocheuses peuvent également être facilitées par la connaissance des propriétés thermiques de ces surfaces (inertie thermique par exemple). De plus, dans le cadre de l'aléa volcanique, il est très intéressant d'avoir accès à la température de surface des coulées de lave ou des bouches de volcans actifs pour effectuer des bilans thermiques. S'il existe des bases de données de spectres de laboratoire depuis longtemps, peu d'exemples d'applications impliquant des capteurs hyperspectraux couvrant la gamme (8-12 $\mu\text{m}$ ) ont été publiés à ce jour. En effet, il n'existe pour ainsi dire pas de capteurs opérationnels couvrant cette gamme de longueur d'ondes. Il s'agit essentiellement de résultats obtenus avec le capteur SEBASS (Aerospace Corporation) qui couvre les gammes (2,5-5,2 $\mu\text{m}$ ) et (7,5-13,5 $\mu\text{m}$ ) avec 128 canaux pour chaque gamme. Quelques études ont permis d'obtenir des cartes minéralogiques précises (silicates, sulfates, à partir des données en émissivité de surface, corrigées des effets atmosphériques et de température) en utilisant les mêmes méthodes que pour les données hyperspectrales visible et proche-infrarouge. Cette gamme de longueur d'ondes s'avère particulièrement utile pour cartographier les silicates tels que quartz, chalcédoine, feldspath, *etc.* qui sont des minéraux marqueurs des zones d'altération hydrothermales et qui ne peuvent pas être identifiés dans le visible proche-infrarouge car ils n'y présentent pas d'absorption caractéristique.

### Volet utilisateurs

Les enjeux économiques sont importants plus particulièrement dans les domaines

de la prospection minière, pétrolière, de la protection des sols et de la gestion du littoral mais ils dépendront largement du coût d'acquisition et de traitement des données. Ils sont en particulier à replacer dans le cadre de la future directive européenne sur la protection des sols qui va se traduire au niveau des états membres de l'Union Européenne par une relance des actions d'inventaire et de surveillance.

Les utilisateurs potentiels sont, d'une manière générale, les compagnies minières et pétrolières, les collectivités locales et territoriales (DIREN, DIRE, DDE, DDASS), les bureaux d'études, les agriculteurs voulant mieux connaître la qualité des sols dans le cadre d'une agriculture de précision, l'Europe, les Banques de développement, *etc.*

Les investissements déjà réalisés ou en cours en Europe sont assez peu nombreux : projet MINEO au BRGM (de 1999 à 2003), campagnes aéroportées DAIS et HyMap financées par l'Union Européenne, le projet satellite EnMAP prévu pour 2012 et les nouveaux capteurs aéroportés ARES (Allemagne, 2008) et APEX (Suisse-Belgique, 2008), des financements gouvernementaux de projets de recherche (ACI Observation de la Terre HYPERGEMME-HYPERMINE). Il faut cependant noter l'intérêt particulier des acteurs du domaine minier pour des recherches en haute résolution spectrale en particulier en Afrique du Sud ou en Australie.

Le volume de données nécessaire est difficile à estimer en raison de l'aspect conjoncturel de plusieurs thèmes (prospection minière, environnement minier, *etc.*). Un consensus semble se faire autour d'une acquisition par an pour les applications cartographiques classiques à deux levés par an sur des zones à forts enjeux environnementaux comme la zone littorale.

## La Science

## 2.1.4 L'Urbain

**Intervenants** : Christiane WEBER (Université de Strasbourg), Xavier BRIOTTET (ONERA), Patrick LAUNEAU (Université de Nantes), Abdelaziz SERRADJ (Université de Strasbourg), Annet WANIA (JRC ISPRA)

L'imagerie hyperspectrale dispose d'un potentiel intéressant pour étudier les objets qui composent l'espace urbain et les zones vertes. Les méthodologies de traitement des images en milieu urbain ne sont pas harmonisées à ce jour. On note un besoin fort en résolution spatiale (meilleure que 5m) et un intérêt pour l'infrarouge thermique (un canal unique pour la température et un mode hyperspectral pour la qualité de l'air). La complémentarité d'informations multispectrales à haute résolution spatiale et hyperspectrales offre des capacités intéressantes actuellement pour l'étude de ces milieux.

Echelle TRL : 2-3

### Contexte

La télédétection permet d'améliorer la compréhension des milieux urbains. En effet, celle-ci est à même de fournir des informations clés pour :

- évaluer et suivre le développement urbain donnant accès à la vitesse, la densité, la morphologie, le changement dans l'utilisation des sols,
- analyser l'organisation spatiale et caractériser les espaces verts dans la ville et à sa périphérie,
- évaluer et suivre le développement des zones périurbaines,
- contrôler les changements d'utilisation des sols qui influencent les processus climatiques urbains, le développement des surfaces imperméables, les réservoirs en eau,
- contrôler le développement urbain dans des contextes de risque naturel potentiel tel que tremblement de terre, glissement de terrain, inondation, *etc.*,
- créer des cartes de paramètres environnementaux tels que microclimat, îlot de chaleur, pourcentage d'espace vert, érosion des sols, source de poussières.

Ainsi, non seulement la télédétection peut apporter des réponses à la caractérisation et le suivi des processus d'urbanisation mais elle permet également l'analyse des facteurs et des effets environnementaux locaux et régionaux, associés au développement urbain.

L'utilisation des données hyperspectrales en milieux urbanisés est relativement récente. Cependant, cette thématique a bénéficié des savoirs et savoir-faire développés dans d'autres domaines d'application. Les premiers travaux datent d'une petite dizaine d'années avec des applications ciblées sur les milieux urbains et non des applications méthodologiques ayant comme support des images urbaines. Les résultats limités obtenus tiennent à la particularité de ce milieu. En effet, celui-ci se caractérise par :

- sa forte hétérogénéité spatiale, dont l'échelle dépend du type de ville considéré (centre ville / zone périurbaine, ville moderne / centre ville historique, ville américaine / ville européenne, *etc.*),
- le nombre élevé de types de matériaux et leur variabilité,
- les effets de pente dus aux toits et à la structure 3D de la ville,
- les pixels non purs à l'échelle métrique / les phénomènes d'occultation,
- les problèmes des surfaces verticales / les phénomènes d'ombrage.

*Les images hyperspectrales sont donc un moyen intéressant pour relever et étudier des éléments urbains eut égard à leurs caractéristiques physico-chimiques. En effet, l'utilisation de données multispectrales conventionnelles ne permet pas de discriminer des classes spectrales comparables (bâtiments et différentes classes de routes par exemple)*

*alors que l'exploitation de données hyperspectrales le permet.*

Dans ce contexte, quatre grands domaines peuvent être identifiés pour lesquels l'imagerie spectrale apporte des réponses, qui sont :

- la caractérisation et la cartographie des matériaux urbains : la représentation et le suivi des espaces étudiés passent par une meilleure identification des matériaux et des objets urbains,
- la qualité de l'air (détection et suivi des concentrations des aérosols) : l'observation de l'impact des activités anthropiques (émissions) sur les échanges au sein de la couche limite requiert la possibilité de les identifier et de les représenter,
- la caractérisation de la végétation et de la biodiversité : le rôle écologique, mais aussi social de la végétation est de plus en plus reconnu, il est donc nécessaire d'avoir des outils permettant la discrimination des espèces et leur suivi sanitaire,
- l'amélioration des SIG urbains : le recueil d'information sur les espaces urbanisés passe par l'élaboration et le maintien de systèmes d'information. Les enjeux de qualité, d'interopérabilité et de mise à jour deviennent de plus en plus importants. L'imagerie satellite est une source essentielle du corpus informationnel urbain. Ces objectifs ne se limitent pas à une approche statique, les dynamiques urbaines s'illustrent par des changements tant spatiaux que sociaux sur des temporalités plus ou moins longues. La diversité des paysages urbains et des objets est identifiée au travers des paramètres de vitesse, densité, direction, structures, utilisation, *etc.*, sur les zones centrales et périurbaines. Les conséquences de ces modifications sont, elles aussi, sujettes à observation (modification des caractéristiques thermiques, hydriques, chimiques, *etc.*) tout comme leurs impacts environnementaux.

Ces domaines d'études se sont développés initialement grâce à l'imagerie hyperspectrale aéroportée avec les instruments tels qu'AVIRIS, DAIS, HyMap, CASI, MIVIS, mais également, plus récemment, à

partir d'acquisitions spatiales (instrument Hyperion, 30m de résolution).

## Volet scientifique

### Caractérisation et cartographie des matériaux urbains

L'utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour l'identification des surfaces en milieu urbain est proposée (les matériaux anthropiques possèdent leurs propres signatures spectrales). En effet, plusieurs travaux ont montré que l'ensemble du spectre (du visible à l'infrarouge thermique) peut être exploité de manière intéressante. Cependant, une forte variabilité est présente au sein des milieux urbains : variabilité physique due à la rugosité et à la texture, variabilité du matériau au sein d'une même classe (liée à l'âge et à l'usage), variabilité contextuelle liée à l'usage (passage de voitures, de piétons, *etc.*). Seules les images hyperspectrales permettraient d'aborder cette variabilité compte tenu de la richesse de l'information collectée. Les spectres des différents types de matériaux, pourraient servir à définir leurs caractéristiques de vétusté ou les signatures environnementales marquées par la présence de mousses ou de lichen par exemple, mais aussi pourraient renseigner sur les capacités thermiques des bâtiments, ou l'émissivité des matériaux latéraux, *etc.* Ces informations associées aux objets urbains apporteraient une connaissance très intéressante dans un contexte d'évaluation environnementale des paysages construits (bâtiments, réseaux, espaces libres) et des morphologies urbaines.

Les enjeux sont une adaptation de l'offre de connaissance aux besoins actuels d'information et de gestion marqués par le changement climatique et les nécessités de révision des habitudes énergétiques, notamment en termes de matériaux et de rénovation de ceux-ci en cas de renouvellement urbain ou d'adaptation, et d'usage raisonnée de la végétation. Le parc actuel de bâtiments correspond à une dépense plus importante en cas d'adaptation et de mise aux normes aux enjeux environnementaux que la création de bâtiments neufs à haute qualité environnementale. Un suivi et des possibilités de diagnostic seraient un bon moyen de compléter les modèles d'évaluation développés à ce jour.

D'un point de vue spectral, le domaine recommandé pour caractériser les matériaux urbains est d'abord le domaine (0,4-2,5 $\mu$ m), puis dans une seconde étape le domaine infrarouge (8-12 $\mu$ m). D'autre part, une résolution métrique semble être le compromis idéal pour appréhender la complexité des imbrications de matériaux urbains tout en délimitant des contours compatibles avec le cadastre de base, et pour déterminer la composition principale d'une surface observable à laquelle seraient associées des informations sub-pixeliques (par exemple présence de fenêtres de toit, drainage périphérique en acier zingué, *etc.*). Au-delà de 3 mètres, les frontières entre maisons individuelles urbaines commencent à disparaître. La probabilité de tomber sur un pixel pur est très basse. Ainsi Heiden *et al.*, en 2001, identifie 70 classes de matériaux sur la ville de Dresde avec une image HyMap (résolution spatiale 5m) et évalue qu'environ 47% des pixels de l'image sont non purs. Il semble néanmoins possible de classer les matériaux urbains de la classe décimétrique ou légèrement inférieure (méthode de « unmixing » en exploitant la richesse spectrale de cette technique d'imagerie). Weng *et al.*, en 2008 extrait les surfaces imperméables de la ville de Marion County (Indiana, Etats-Unis), avec des images Hyperion (30m). De plus, Winter, en 2007, montre qu'en combinant une image hyperspectrale Hyperion avec une image multispectrale IKONOS (4m de résolution spatiale) acquises sur la ville de la Nouvelle-Orléans, il est possible de reconstruire une image synthétique hyperspectrale à la résolution d'IKONOS et d'en déduire une réflectance de surface avec une précision sur la réflectance de 1%. *Ces résultats récents sont encourageants et montrent qu'à partir d'une résolution décimétrique il est d'ores et déjà possible d'extraire des informations sur des matériaux urbains.*

### **Qualité de l'air (détection et caractérisation des aérosols)**

La présence plus ou moins importante des aérosols en milieu urbain est un des facteurs à prendre en compte pour la qualité de l'air. Les impacts sanitaires et économiques plaident pour une meilleure prise en compte des variations de concentrations d'aérosols

dans les modèles d'exposition à l'échelle urbaine et intra-urbaine.

Les relations entre composants atmosphériques (aérosols, traces gazeuses et composants volatiles) et spectres radiométriques ont jusqu'à présent été étudiées à partir de données satellites à des résolutions radiométriques et spatiales variables mais peu adaptées à l'urbain. Les missions comme CALIPSO, MERIS ou MODIS ne permettent pas d'obtenir des données complémentaires aux données sols pour l'évaluation de la qualité de l'air à des échelles intéressantes. Mais des travaux récents montrent qu'il devient cependant possible d'accéder aux propriétés radiatives des aérosols avec des instruments de résolution spatiale de la classe décimétrique. En effet, ces méthodes reposent sur l'utilisation de cibles sombres (Gross *et al.*, 2004) dans le cadre de l'exploitation de données Hyperion acquises sur New-York ou encore dans la bande d'absorption de l'oxygène à 760nm (Ben-Dor, 2004) en utilisant des images acquises avec l'instrument AVIRIS, (résolution spatiale 20m), sur la ville de Santa Monica, ou plus récemment sur la transition ombre – Soleil (Evans, 2007) en exploitant des images acquises avec l'instrument QuickBird sur les villes de Pékin, Taipei, New York et Buenos-Aires. Le principal point limitant de ces études reste la connaissance fine de la signature spectrale des sols. Dans ce but, l'imagerie hyperspectrale constitue une opportunité à exploiter pour améliorer les performances de ces méthodes.

*Le domaine spectral requis pour la caractérisation des aérosols est le domaine (0,4-0,9 $\mu$ m). La résolution spatiale requise est de décimétrique (estimation en quelques points de la ville) à métrique (estimation dans toutes les rues de la ville).*

### **Caractérisation de la végétation et de la biodiversité**

La végétation urbaine bénéficie actuellement d'un intérêt croissant, notamment au travers de ses fonctions écologique, climatologique, esthétique et sociale. La végétation urbaine joue un rôle essentiel dans la maîtrise des caractéristiques environnementales du milieu tels le vent, l'humidité, les radiations solaires, *etc.* Le confort thermique et la présence de végétation sont corrélés notamment par les capacités de

réduction de la température à travers l'ombrage (effet direct) et l'évapotranspiration (effet indirect). L'effet de la végétation sur les polluants est fondé sur deux mécanismes : 1) l'absorption liée au métabolisme où les polluants gazeux sont ainsi retenus par pénétration au niveau des pores. De plus les plantes contribuent pendant la photosynthèse à la réduction du dioxyde de carbone et le stockage des excès de carbone au sein de la biomasse ; 2) le rôle de piège à polluants. En effet, certains travaux de recherche ont montré que les plantes agissent comme des filtres biologiques, retirant une grande quantité de particules de l'atmosphère. Cette rétention est importante si les parois de la feuille sont rugueuses ou collantes ; les conifères sont plus efficaces que les feuillus.

Les données satellites actuelles, si elles facilitent la caractérisation par strates, ne fournissent que peu d'information sur les espèces, or l'identification de celles-ci est essentielle dans une optique de services écologiques notamment l'évaluation des potentialités d'épuration de la végétation selon les capacités plus ou moins grande à retenir les aérosols par exemple.

De même, le suivi sanitaire bénéficierait de telles données car les attaques fongiques ou bactériennes pour des individus déjà fragilisés par le milieu urbain, requièrent une observation régulière et exhaustive. Les données hyperspectrales favoriseraient un suivi global des objets végétaux (arbres, haies, berges) qui abonderait les bases de données urbaines actuellement utilisées pour leur suivi. Les opérations sanitaires sont menées actuellement de façon ponctuelle selon une démarche interventionniste et rarement préventive.

### Amélioration des SIG urbains

Les informations numériques sont de plus en plus nombreuses pour observer, gérer, planifier le développement urbain. Il est important pour les collectivités de bénéficier de bases de données à jour avec une couverture régulière de leur territoire. Les systèmes d'information géographiques rassemblent des compétences essentielles actuellement pour les collectivités territoriales. Cependant, la complexité des espaces urbains, leur constant renouvellement nécessitent des observations régulières et la structuration d'informations spatialement performantes et sémantiquement

cohérentes. Les données satellites peuvent remplir ces objectifs. La plupart des éléments urbains sont détectables et analysables à 10m de résolution spatiale, mais les capteurs actuels ne fournissent pas d'éléments suffisamment riches pour couvrir la réalité urbaine. A l'heure actuelle, seules des données hyperspectrales permettraient la définition de typologies adaptées au milieu urbain et à la multiplicité des matériaux. Le but est bien dès lors de valoriser la complémentarité des informations potentielles. Ainsi, la mise à jour, la correction de plans, mais aussi la simulation des dynamiques de croissance en jeu profiteraient de cet apport de connaissance.

Un accompagnement est nécessaire pour favoriser l'acquisition des connaissances en milieu urbain. La variété des matériaux et éléments naturels doit être prise en compte pour favoriser une connaissance accrue des surfaces minérale et végétale. Des bibliothèques spectrales du milieu urbain seraient un apport profitable pour le développement de ces informations.

L'amélioration des SIG urbains passe par une exploitation du domaine spectral le plus important possible. Dans un premier temps, l'utilisation du domaine (0,4-2,5µm) doit permettre un enrichissement significatif de ceux-ci. La complémentarité des images de télédétection à haute résolution spatiale (en configuration multispectrale) et à haute résolution spectrale (à résolution décimétrique) est également un bon compromis qui va permettre d'améliorer de façon significative la mise à jour des SIG urbains.

### Volet utilisateurs

Les utilisateurs finaux s'approprient les résultats ou les supports intermédiaires dès lors que ceux-ci seront adaptés aux échelles de travail usuelles et aux pratiques. Néanmoins, les données hyperspectrales étant plus riches, les résultats notamment en catégories d'occupation du sol pourraient bien répondre de manière plus judicieuse aux besoins de gestion de l'espace urbain :

- suivi et gestion des bâtiments et états des matériaux,
- suivi et gestion des espaces de végétation, selon les espèces et l'état phytosanitaire,

## La Science

- suivi et gestion de la biodiversité végétale (et animale par ricochets lorsqu'il s'agit d'habitats particuliers),
- connaissance des aérosols urbains qui nous renseignera également sur la qualité de l'air,
- climatologie urbaine en estimant l'état de l'atmosphère (vapeur d'eau, aérosols), l'identification des matériaux pour une meilleure estimation des îlots de chaleur urbains, *etc.*

La plupart des principaux éléments urbains sont détectables et analysables à 10m, l'imagerie hyperspectrale a pour intérêt majeur de fournir une information plus riche sémantiquement que spatialement. Bien que la très haute résolution spatiale soit nécessaire pour bien comprendre le milieu urbain à l'échelle de la rue ou des façades, l'imagerie hyperspectrale décamétrique permet de comprendre et définir le comportement de ce milieu à l'échelle des bâtiments et du quartier ou d'un alignement.

## La Science

## 2.1.5 L'Atmosphère

**Intervenants :** Pascal PRUNET (Noveltis), Xavier BRIOTTET (ONERA) et Rodolphe MARION (CEA)

Des axes originaux de recherche en imagerie hyperspectrale ont été proposés bien qu'il n'apparaisse pas de besoin fort et clairement identifié d'une mission spatiale pour ce thème, l'analyse de l'atmosphère étant principalement un support pour la correction des images brutes. Ces axes visent l'exploitation de paramètres atmosphériques déduits des images pour la détection de phénomènes de surface (feux, volcans, émissions de méthane) et pour l'estimation de la pollution dans la couche limite (en particulier les espèces NO<sub>2</sub> et NO). On note un intérêt fort de cette communauté pour l'infrarouge thermique.

Echelle TRL : 1-2

### Contexte

L'objet de la mesure spatiale pour l'étude atmosphérique est la mesure spatio-temporelle globale des structures verticales de température, pression et constituants atmosphériques, ainsi que des particules aérosols et nuages, pour répondre à des besoins d'ordre scientifique ou opérationnel (veille, prévention et prévision). Les besoins, en termes de couverture et d'échantillonnage spatio-temporels, de résolution verticale et de précision sur la mesure des variables, varient en fonction des domaines d'application. Ces domaines sont principalement : 1) la prévision météorologique, 2) l'étude, le suivi et la prévision du climat, 3) l'étude et le suivi de la chimie atmosphérique aux échelles globales et régionales et 4) l'étude, le suivi et la prévision de la pollution et de la qualité de l'air aux échelles régionales et locales.

Pour répondre aux besoins de ces différents domaines, des missions spatiales dédiées ont été mises en place, programmées ou identifiées. Ces missions spatiales ont été en premier lieu structurées et dimensionnées pour la prévision météorologique, selon deux grands types de missions : 1) le sondage atmosphérique à moyenne puis haute résolution spectrale (température, vapeur d'eau, autres constituants) à partir de satellites à orbite basse visant vers le sol dans les domaines de longueur d'onde de l'infrarouge thermique et des micro-ondes, 2) l'imagerie à hautes résolutions spatiale et temporelle

(paramètres de surface, nuages et aérosols, et plus récemment structure verticale de température et de vapeur d'eau) à partir d'orbites géostationnaires visant vers le sol dans les domaines de l'ultraviolet, du visible, du proche-infrarouge et de l'infrarouge thermique. Bien que pilotées par les besoins météorologiques, ces mesures spatiales ont été exploitées par l'ensemble des domaines d'application atmosphérique, d'abord parce qu'elles étaient les seules, et encore aujourd'hui car elles obéissent à des contraintes opérationnelles (robustesse, continuité temporelle, recouvrement, maintenance des traitements, distribution des données). L'état de l'art au niveau européen est représenté par le satellite à orbite basse MetOp (sondage par IASI, AMSU, GOME, imagerie par AVHRR) et le satellite géostationnaire MSG (imagerie ultraviolet-visible, SWIR, TIR par SEVIRI).

Ces missions opérationnelles sont complétées par des missions exploratoires dédiées à certains domaines d'application. Les missions les plus représentatives sont : ADM-Aeolus (vent) pour la météorologie, OCO (CO<sub>2</sub>, Etats-Unis) et GOSat (CO<sub>2</sub>, Japon), Cloudsat, CALIPSO (nuages), PARASOL (aérosol) pour le climat, MIPAS et SCIAMACHY sur ENVISAT, MOPITT (Etats-Unis), TRAQ, PREMIER pour la chimie atmosphérique, MOPITT, TRAQ pour la qualité de l'air et la pollution.

Ces missions exploratoires devraient contribuer à définir d'ici à 2020 les missions

opérationnelles Sentinel 4 et 5 programmées dans le cadre de GMES pour les domaines d'application atmosphérique hors météorologie.

C'est dans ce contexte que doit se situer l'analyse de l'intérêt d'une mission d'imagerie hyperspectrale pour les applications atmosphériques. Les besoins pour ce type de mission ne sont pas identifiés actuellement dans la thématique atmosphère, en particulier car le cadre des spécifications d'une telle mission n'est pas clairement identifié par les acteurs de cette thématique. Pour les besoins de la présente synthèse, les hypothèses de travail suivantes ont été faites : 1) mission en orbite basse, 2) caractéristiques instrumentales, système et mission restent complètement ouverts (en particulier, la question d'étendre le domaine spectral de la mission à l'infrarouge thermique en plus du domaine optique est jugée pertinente), 3) résolution spatiale de l'ordre de quelques dizaines de mètres, résolution spectrale de l'ordre de 1 nanomètre ou mieux (voir spécifications dans le texte), 4) la notion d'hyperspectral implique de l'ordre de 100 à 1000 canaux au moins, en continu dans un ou plusieurs intervalles spectraux.

Dans ce contexte et sous ces hypothèses, les aspects suivants ont été retenus comme pouvant être pertinents *a priori* pour une mission spatiale d'imagerie hyperspectrale :

- mesure des gaz à effet de serre / climat (en particulier CO<sub>2</sub>) : émissions, sondage basses couches,
- pollution atmosphérique / qualité de l'air : émissions, sondage basses couches,
- chimie atmosphérique,
- identification et caractérisation des nuages et des aérosols,
- prévision météorologique,
- apport des mesures atmosphériques à la caractérisation de paramètres ou de processus de surface.

## Volet scientifique

### Considérations générales

*Il n'apparaît pas de besoin fort et clairement identifié d'une mission d'imagerie hyperspectrale directement liée à la*

*thématique atmosphère.* Les principaux arguments sont : 1) une résolution horizontale meilleure que 1km n'a pas aujourd'hui d'intérêt pour les applications atmosphériques (sauf pour quelques aspects spécifiques mentionnés dans le texte, mais ne permettant pas de justifier une mission spatiale), 2) le besoin hyperspectral n'est soit pas nécessaire si l'on s'intéresse aux aérosols ou aux nuages (sauf cas spécifiques mentionnés dans le texte), soit extrêmement fort (voir le texte), et donc jugé par les scientifiques comme inatteignable par une mission hyperspectrale pilotée par les besoins de surface. Cependant, *des axes originaux de recherche sont proposés par les scientifiques.*

*Le premier axe consiste à utiliser la mesure de paramètres atmosphériques pour détecter des phénomènes de surface. Le second considère la mesure de la pollution dans la couche limite, et la détection de phénomènes de surface d'intérêt (feux, volcans, émission de méthane) ; cet axe semble le plus prometteur parce qu'il correspond à la fois à un défi technologique (haute résolution spectrale, bandes dans l'infrarouge thermique) et à des enjeux économiques identifiés.*

### Axe no 1 : détection de phénomènes de surface à partir de la mesure atmosphérique

La détection ou le suivi de processus de surface à partir de mesures de caractéristiques atmosphériques nécessite l'imagerie (à une résolution de 1km ou mieux) pour détecter les changements horizontaux. L'apport de la mesure atmosphérique pour ce type de détection est l'exploitation de la « mémoire » atmosphérique, qui peut par exemple permettre de résoudre partiellement les problèmes de couverture nuageuse ou d'échantillonnage spatio-temporel. Les applications possibles sont la détection des feux à partir de la mesure de CO, CO<sub>2</sub>, HCN, la détection des émissions volcaniques à partir de SO<sub>2</sub>, HCL (2925cm<sup>-1</sup>), HF (4030cm<sup>-1</sup>), la détection des sources ponctuelles de méthane, la détection de signatures des volcans sous marins (SO<sub>2</sub>, HCL, HF, H<sub>2</sub>S). Le besoin en termes de caractéristiques spectrales est de quelques dizaines d'éléments spectraux par espèces, avec une résolution spectrale de l'ordre de 0,1cm<sup>-1</sup>.

Une autre application est la détection d'une information en complément à la couleur de l'eau pour l'activité biologique océanique : la mesure de l'espèce DMS (ou d'une autre contenant du soufre) pour différencier les sources d'activités biologiques (besoin en résolution spectrale :  $0,5\text{cm}^{-1}$ ).

### **Axe no 2 : pollution dans la couche limite et détection de phénomènes de surface d'intérêt**

#### **Climat : mesure des gaz à effet de serre**

Une haute résolution spatiale n'a pas vraiment d'intérêt pour le climat et la mesure de  $\text{CO}_2$ , surtout si l'on s'intéresse au contenu intégré. Ce point est discutable si l'on s'intéresse au  $\text{CO}_2$  dans la couche limite. D'autre part, une résolution spectrale de l'ordre de quelques dixièmes de nanomètre est nécessaire dans le proche-infrarouge pour les applications atmosphériques. Par rapport aux missions déjà existantes ou prévues, le seul besoin réel serait d'avoir une couverture globale de type OCO, OCO ne fournissant que des mesures sous la trace du satellite.

Un autre besoin d'intérêt dans le cadre d'une mission d'imagerie hyperspectrale est la détection de sources ponctuelles de méthane : le besoin est une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre, une résolution spectrale de  $0,1\text{cm}^{-1}$  dans les domaines de l'infrarouge thermique ( $1200\text{-}1300\text{cm}^{-1}$ ) et du proche-infrarouge ( $2700\text{-}3000\text{cm}^{-1}$ ), afin de détecter les variations de basses couches liées aux sources (marais, permafrost, relâchement pétrolier).

#### **Pollution dans la couche limite atmosphérique**

Un enjeu scientifique important est le suivi de la pollution atmosphérique basses couches et en particulier des espèces  $\text{NO}_2$  et  $\text{NO}$  avec une bonne résolution spatiale (1km). Cela peut être proposé à partir de l'infrarouge thermique. Une haute résolution spectrale et une couverture spectrale étendue (quelques dixièmes de  $\text{cm}^{-1}$ , quelques dizaines ou quelques centaines d'échantillons spectraux) permettraient d'obtenir des informations importantes pour l'analyse et la veille de la qualité de l'air, non fournies par les capteurs existants, de jour et de nuit.

#### **Chimie atmosphérique**

La production de  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$  par les orages est un phénomène mal connu : la combinaison de la haute résolution spatiale et spectrale (ainsi que la nécessité d'une haute résolution temporelle ou d'un système de détection automatique des orages), et le couplage des domaines spectraux optique (pour la détection d'éclairs) et infrarouge thermique, permettraient la mesure de contenus intégrés de  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$  produit par les éclairs d'orage, pour l'étude de ces sources et de leur impact.

L'analyse du trou d'ozone stratosphérique pourrait être menée par un imageur avec une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre mesurant l'espèce  $\text{HNO}_3$  dans la bande spectrale à  $12\mu\text{m}$  avec  $0,2\text{cm}^{-1}$  de résolution spectrale. Cela fournirait un apport original à l'étude de la chimie hétérogène et des PSC.

#### **Caractérisation des aérosols et des nuages**

##### *Les aérosols*

Pour la détection des caractéristiques classiques des aérosols, de manière générale, il n'y a pas de nécessité de l'hyperspectral. Quelques canaux, non nécessairement très fins, suffisent. Il est à noter tout de même qu'il peut être intéressant de vérifier si des informations supplémentaires, sur le type d'aérosol par exemple, ne seraient pas accessibles par la haute résolution spectrale dans le solaire (aérosol carboné ou non). Une étude préliminaire serait nécessaire pour justifier ou non le besoin en imagerie hyperspectrale.

Un point particulier peut cependant être mentionné. Il est montré qu'une mesure de l'absorption gazeuse (par exemple dans les raies d'absorption de l' $\text{O}_2$ ) couplée à la mesure des propriétés de diffusion permet d'accéder à l'altitude des aérosols, ce qui constitue une information originale importante, qui nécessite la haute résolution spectrale.

La haute résolution spatiale n'est pas nécessaire pour l'étude des aérosols en ciel clair (1km est suffisant). Par contre, l'étude des interactions aérosols / nuages nécessite une résolution spatiale de l'ordre de 100m.

Enfin, pour l'analyse des aérosols de type poussières (gros aérosols), la synergie optique / infrarouge (y compris thermique) est

une piste intéressante à explorer. Cependant, rien ne justifie *a priori* la nécessité d'une haute résolution spectrale ou spatiale pour cela.

### ***Les nuages***

La combinaison haute résolution spatiale / haute résolution spectrale ne présente pas d'intérêt majeur pour les nuages. L'imagerie multispectrale et la résolution spatiale de type MODIS (quelques centaines de mètres) suffisent. Un intérêt éventuel peut être mentionné pour l'analyse fine des effets 3D dans les nuages, quand l'hypothèse plane parallèle ne fonctionne pas et que l'on désire analyser la microphysique nuageuse. Cet aspect nécessite une étude préalable pour identifier précisément le besoin.

### **Météorologie et dynamique atmosphérique**

Le besoin météorologique nécessite une couverture spatiale globale et une très bonne résolution temporelle. Il n'y a pas de nécessité démontrée d'une résolution spatiale meilleure que 1km, à l'exception de la mesure fine des propriétés de surface (albédo directionnel dans le domaine optique et émissivité de surface dans le domaine thermique). Des problèmes d'utilisation de cette information se posent pour l'intégrer spatialement et bien traiter le cycle diurne.

Si on accepte de dégrader la résolution à 1km (par intégration pour améliorer le rapport signal sur bruit), et à condition d'avoir au moins l'équivalent IASI en résolution spectrale pour le sondage atmosphérique (quelques dixièmes de  $\text{cm}^{-1}$  dans les bandes

d'absorption du  $\text{CO}_2$ , de la vapeur d'eau, de l'ozone), ce type de mission présenterait un intérêt fort de démonstration et d'études pour la préparation de la 4<sup>ème</sup> génération des satellites géostationnaires (post-MTG).

On mentionne ici un thème potentiel de recherche qui peut être original et intéressant. L'étude de la convection profonde peut être faite à partir de la mesure de l'injection troposphérique d'espèces comme le CO ou le  $\text{CH}_4$  dans la stratosphère par celle-ci. Cela nécessite à la fois une haute résolution spatiale et spectrale. Cela permettrait d'identifier et d'analyser l'origine des nuages froids équatoriaux (distinction entre convection et cirrus). A l'heure actuelle, cette information n'est accessible qu'indirectement par le suivi temporel des données géostationnaires.

### **Volet utilisateurs**

*Les utilisateurs de l'imagerie hyperspectrale pour ce thème seraient potentiellement nombreux pour les applications présentant des enjeux économiques importants : la pollution et la qualité de l'air et la détection des événements de surface (feux, volcans, émissions de méthane).*

Un objectif serait d'alimenter en temps réel avec des produits image de niveau 2 (quantités géophysiques restituées aux points de mesure) ou de niveau 3 (cartes) des systèmes de veille, de prévention et de prévision.

## 2.1.6 Le Traitement du Signal et de l'Image

**Intervenants** : Xavier BRIOTTET (ONERA), Grégoire MERCIER (ENSTB), Emmanuel CHRISTOPHE (CNES), Véronique ACHARD (ONERA)

Le traitement du signal et de l'image est suffisamment mûr pour répondre aux besoins des diverses applications thématiques. Il se décompose principalement en une étape de prétraitements, une étape d'extraction des propriétés optiques et une étape de traitement numérique des images (classification, détection, etc.). A cela peut éventuellement s'ajouter une étape de compression du signal à bord. La communauté nationale dispose d'une compétence forte dans ces domaines et se distingue en particulier par une prise en compte approfondie de la physique de l'image.

Echelle TRL : 6

### Contexte

L'imagerie hyperspectrale ne peut se résumer à une imagerie multispectrale comprenant un grand nombre de bandes spectrales. L'augmentation de la résolution et du nombre de bandes spectrales engendre des problèmes spécifiques. En effet, ces données deviennent difficiles à visualiser et à caractériser puisque les échantillons observés (les signatures spectrales) s'inscrivent dans des espaces de très grande dimension qui les rendent très peu représentatifs statistiquement. L'imagerie hyperspectrale permet néanmoins d'améliorer la compréhension de la scène observée tant d'un point de vue de l'identification chimique des éléments observés que d'un point de vue de leur état physique. Plusieurs étapes sont nécessaires pour remonter aux propriétés physiques des éléments du paysage à partir des mesures hyperspectrales :

- compression du signal à bord pour le transmettre au sol,
- prétraitement pour corriger le signal hyperspectral des défauts instrumentaux radiométriques et géométriques,
- extraction des propriétés optiques intégrant souvent une phase de correction atmosphérique,
- traitement numérique des images pour construire une carte associée à un produit donné.

Les efforts méthodologiques ont donc porté sur la caractérisation des signatures spectrales, leur identification (en ayant recours à d'éventuelles bases de spectres collectés sur le terrain ou en laboratoire), à la réduction de la dimension de l'espace de représentation ainsi qu'à la classification, qui tend à intégrer l'information spatiale conjointement à l'information spectrale.

### Volet scientifique

#### Etat de l'art

#### Compression du signal à bord

Etant donné la quantité de données produites par les capteurs hyperspectraux, il est souvent indispensable de compresser ces données pour accroître les capacités d'acquisition. Les techniques de compression sans perte (type DPCM) conduisent à des taux de compression limités (de l'ordre de 2-3). Il est nécessaire de considérer les techniques de compression quasi sans pertes. Dans ce cas, les distorsions introduites par la compression restent compatibles avec le niveau de bruit instrumental, l'information présente dans le signal n'est pas dégradée.

*Deux grandes familles d'algorithmes de compression existent pour les données hyperspectrales et donnent des résultats satisfaisants tout en restant compatibles avec les contraintes d'implantation à bord :*

- les techniques par quantification vectorielle particulièrement développées

par la Canadian Space Agency. Ces méthodes sont particulièrement adaptées pour les applications de classification si un fort taux de compression est requis, mais sont également compatibles avec toutes applications pour des taux plus faibles. Des prototypes d'implantation hardware existent pour ces méthodes,

- les techniques par transformées (ondelettes, KLT).

Le Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) a récemment lancé un groupe de travail visant à définir une norme de compression pour les futures missions spatiales hyperspectrales.

### **Prétraitements radiométriques et géométriques**

Cette étape a pour but de corriger le signal acquis des défauts instrumentaux géométriques et radiométriques puis de le convertir en unité de luminance en entrée d'instrument.

*La qualité des instruments actuels associée à des prétraitements géométriques et radiométriques performants ne semble pas être un frein à la précision des produits demandés (par exemple MERIS de l'ESA).*

### **Extraction des propriétés optiques**

La caractérisation des propriétés optiques des surfaces terrestres à partir d'images de télédétection fait l'objet de nombreux travaux depuis une vingtaine d'années dans le domaine réflectif (visible et proche-infrarouge). En particulier, diverses méthodes d'inversion, permettant d'extraire les propriétés optiques des sols à partir d'images aéroportées ou satellitaires, ont déjà été développées dans ce but. La plupart réalisent des corrections atmosphériques en se restreignant au cas d'un sol plat homogène (ATREM, ACORN). Certains, comme COCHISE ou FLAASH, prennent en compte l'hétérogénéité spatiale de la scène. Le code ATCOR4 développé par Richter, représente une véritable évolution dans la mesure où le relief de la scène est pris en compte par l'intermédiaire d'un modèle numérique de terrain. Néanmoins, ce code néglige l'éclairement de couplage Terre-atmosphère qui peut représenter jusqu'à 15% de l'éclairement incident et n'effectue qu'une

correction *a posteriori* des effets directionnels mis en jeu. Lenot a proposé une alternative au code ATCOR4 en développant un modèle inverse, SIERRA, adapté aux milieux montagneux possédant une modélisation physique plus rigoureuse. De plus, Lachérade a proposé un nouveau modèle d'inversion, ICARE, adapté aux milieux urbains. En effet, les modèles cités précédemment ne sont pas adaptés à la structure très accidentée des villes où les effets d'environnement sont souvent considérables, notamment dans les zones d'ombre. L'accession à des résolutions spatiales submétriques des capteurs aéroportés et satellitaires ouvre de nouvelles voies dans l'étude de ces milieux. Comme on peut le constater, *les outils disponibles sont suffisamment matures pour répondre à un grand nombre de besoins en télédétection. La tendance est d'améliorer la précision de telles méthodes (par exemple pour EnMAP).*

En revanche, dans l'infrarouge thermique (3-15 $\mu$ m), les propriétés optiques considérées ne se limitent plus à la réflectance. Les surfaces terrestres émettent et réfléchissent un rayonnement qui est fonction de leurs propriétés optiques et de leurs températures. L'émissivité spectrale  $\varepsilon(\lambda)$  est une propriété intrinsèque au matériau sur laquelle vont reposer l'analyse des images pour la classification de scènes, la détection et d'identification des surfaces. La température de surface pourra, quant à elle, renseigner sur l'état thermique de celle-ci. La luminance reçue par un instrument aéroporté qui observe ces surfaces dépend également de l'état thermodynamique de l'atmosphère qui absorbe et émet du rayonnement principalement dans certaines bandes spectrales. Pour exploiter ces deux attributs surfaciques, il est nécessaire d'éliminer ou de connaître les contributeurs atmosphériques. Dans le domaine (8-12 $\mu$ m) par ciel clair, les termes atmosphériques dépendent principalement de la vapeur d'eau et de la température atmosphérique. On peut distinguer deux principaux types de méthodes de compensation atmosphérique. Le premier vise à estimer des grandeurs thermodynamiques (température, vapeur d'eau) qui permettront de calculer les contributeurs atmosphériques à la luminance mesurée par le capteur. Suit alors l'estimation conjointe de l'émissivité spectrale et de la température de surface. Le second s'attache à déterminer

directement les termes radiatifs atmosphériques (transmission, luminance atmosphérique, éclaircissement). Le premier type de méthodes s'inspire généralement des traitements développés pour le sondage atmosphérique satellitaire. La température atmosphérique est déterminée à partir des bandes d'absorption du CO<sub>2</sub> (4,3µm et 15µm si ce domaine spectral est couvert) et la vapeur d'eau est estimée à partir de la bande (5-8µm). Le problème inverse est résolu par différentes approches. On peut citer les approches variationnelles itératives de types « model matching » de Smith (1970) ou de Eyre (1991) appliquées aux sondeurs HIRS. D'autres auteurs proposent de linéariser le problème en cherchant à initialiser l'inversion avec des profils suffisamment proches de la solution ; c'est le cas de la méthode 3I de Chédin (1985). Enfin, des approches reposant sur les réseaux de neurones ont été développées pour le sondage atmosphérique pour les instruments HIRS et AIRS. Les méthodes du second type ont été développées spécifiquement pour l'imagerie hyperspectrale, car elles reposent sur des hypothèses compatibles uniquement avec les résolutions spatiales métriques de ce type d'instruments. Elles considèrent en effet que l'atmosphère varie peu, voire pas, sur l'ensemble de l'image, et donc que la variabilité spatiale sur l'image (ou sur des parties de l'image) en luminance est engendrée uniquement pas la surface. Les approches les plus répandues sont AAC et ISAC. La première nécessite une résolution spectrale suffisamment fine (1cm<sup>-1</sup> environ) pour permettre l'exploitation de la bande de vapeur d'eau vers 11,7µm. La seconde suppose présents dans l'image des matériaux ayant une émissivité proche de 1 à au moins une longueur d'onde. Ces dernières ont été développées pour des instruments aéroportés et des travaux sont nécessaires pour leur utilisation spatiale.

### **Traitement numérique des images**

Plusieurs modes de représentation des données sont considérés. Ils sont détaillés ci-dessous.

#### *L'image hyperspectrale comme une image de signatures spectrales*

Les efforts méthodologiques sont dédiés aux traitements des signatures spectrales. Dans ces approches, l'image

hyperspectrale est considérée comme une spectroscopie spatialisée. Des mesures de distances ont été définies entre signatures spectrales de même que des critères de sélection des bandes spectrales importantes (selon un critère thématique ou statistique). Ces études amont permettent de bâtir des stratégies de détection d'anomalies spectrales. Elles reposent notamment sur des critères de distance quadratiques entre les signatures spectrales, des critères de distance angulaire s'affranchissant de la variabilité intrinsèque des spectres de végétation et des effets d'illumination, ou encore sur des critères liés à la topologie des ensembles de signatures spectrales en utilisant des projections dans des sous-espaces de représentation. Ces mesures permettent également d'identifier la composition chimique des objets observés grâce à des stratégies de « unmixing » spectral et d'identification de signatures spectrales. Cette étape est souvent nécessaire pour des milieux dont la variabilité spatiale est comparable ou supérieure à la résolution spatiale de l'instrument (milieux urbains, géologie, *etc.*), avec toutefois la double contrainte de connaître le nombre de spectres purs à estimer, et de savoir si ces spectres purs sont observés sans mélange dans l'image.

#### *L'image hyperspectrale comme une image multi-composantes*

En considérant l'image hyperspectrale comme une image multi-composantes, des thèmes de recherches sont dédiés à l'utilisation conjointe de ces nombreuses images. Ces recherches ont permis de développer des stratégies de sélection de bandes pertinentes (statistiquement et non plus physiquement) ou de réduction de dimension afin de visualiser l'image ou de segmenter / classifier l'information spectrale sans considération physico-chimique explicite des matériaux observés. Ces stratégies reposent sur le choix de l'algorithme de recherche et du critère de décision. Elles se déclinent à l'aide de décomposition en composantes principales (ACP ou plus généralement des critères de corrélation), décomposition en composantes indépendantes (ACI ou plus généralement des critères d'information mutuelle), analyse discriminante, seuils de décision (DBFE), ou de minimisation d'une fonction d'énergie (telle que la factorisation matricielle non-négative). Outre la réduction du nombre de bandes

spectrales, ces méthodes fournissent également des informations sur les classes présentes dans l'image. Si le bruit n'est pas identique dans toutes les bandes, des extensions de ces algorithmes existent : l'ACP devient alors la MNF, l'ACI devient la NAICA.

Il est également possible de prendre en compte la répartition spatiale des signatures spectrales et ainsi de coupler les points de vue spectral et spatial dans les traitements. La prise en compte de la variabilité spatiale permet de modifier des algorithmes de classification (au départ purement spectraux) de façon à rendre les résultats de classification plus homogènes spatialement.

### ***Les pixels d'une image hyperspectrale comme des échantillons dans un espace de grande dimension***

Lorsque chaque signature spectrale est considérée comme un vecteur à  $n$  composantes, l'image hyperspectrale devient une collection d'échantillons disposés dans un espace de dimension  $n$ . Selon ce point de vue, les recherches ont été principalement dévolues à l'estimation de paramètres dans un espace de grande dimension (notamment l'estimation de la matrice de covariance à partir d'un nombre restreint d'échantillons). Des modèles statistiques appropriés permettent alors de caractériser l'information spectrale sans recours à une réduction de dimension. Il faut alors définir le gabarit statistique correspondant aux signatures spectrales considérées comme des variables aléatoires à valeurs dans un espace de très grande dimension (on utilise par exemple des lois de Pareto généralisées). Il est parfois possible de contraindre le modèle statistique à l'aide de considérations physiques.

C'est selon ce point de vue que sont définies la plupart des stratégies de « unmixing » (géométrique) de signatures spectrales. Les approches reposent notamment sur l'estimation de la forme du simplexe qui englobe les observations. La recherche des sommets du simplexe, qui conduit aux spectres les plus purs, peut être faite par des algorithmes de type indice de pureté spectrale, N-FINDR, Vertex Component Analysis.

En adoptant une stratégie de classification dans ces espaces de grande dimension, pour lesquels la plupart des

méthodes statistiques classiques sont inopérantes, il est possible de redéfinir le risque associé à l'estimation des paramètres des classes, pour aboutir aux méthodes à noyaux (ou SVM). Certains modèles, ayant une complexité relativement faible, permettent également de traiter conjointement des informations spatiales avec des signatures spectrales (à l'aide de méthodes morphologiques ou méthodes à noyaux), et ainsi de baisser les taux de mauvaise classification.

### **Besoins**

*Le traitement d'images hyperspectrales requiert souvent la mise à disposition de bases de données spectrales. C'est un des points clés des méthodes de classification ; les efforts nécessaires portent sur une bonne adaptation de ces bases à la résolution du capteur, ainsi qu'à la bonne représentativité de cette base pour les milieux étudiés.*

Les besoins méthodologiques sont principalement liés à la qualité des estimateurs et à leur résistance aux bruits (« vrais » bruits de mesure, mais aussi bruits induits par la variabilité spatiale ou spectrale des éléments observés). Il est nécessaire d'améliorer dans ce sens les méthodes de détection, d'identification, de segmentation, etc. Des besoins s'expriment également lorsque des verrous sont identifiés dans des applications thématiques. Il s'agit alors de répondre à des attentes spécifiques liées à l'utilisation de types de capteurs précis.

*Les deux handicaps principaux des méthodes hyperspectrales sont liés à la complexité algorithmique et au manque de généralité. Ces deux handicaps peuvent toutefois être surmontés par un effort méthodologique adapté au contexte opérationnel.*

*D'autre part, les traitements conjoints dimensions spatiale / spectrale nécessitent encore des efforts importants mais semblent prometteurs et soulignent l'intérêt d'un instrument couplant l'imagerie hyperspectrale à l'imagerie panchromatique très résolue (la maturité des traitements actuels permet d'établir des stratégies réalistes de panchro-sharpening panchro-hyperspectral).*

## Volet utilisateurs

Les traitements décrits dans cette section sont génériques, les sorties sont utilisées par les thématiciens dont les besoins sont donnés dans les autres thèmes.

## La Science

## 2.2 LA DEFENSE

**Responsable** : Commandant Frédéric LIEGE, représentant de l'Etat-major des Armées / Division Espace et Programmes Interarmées

**Intervenant** : Philippe PRASTAULT (DGA / UM ESIO), président pour la DGA du Groupe de Travail HyperSpectral Défense (GTHS Défense)

La défense a identifié que l'imagerie hyperspectrale pouvait contribuer à répondre aux besoins prioritaires et aux programmes en cours suivant 5 axes d'effort : ciblage, vulnérabilité au leurrage et au camouflage des systèmes d'observation (VULNOBS), détection et caractérisation des effluents, traficabilité, caractérisation des petits fonds complexes. Un groupe de travail (GTHS Défense) a été créé en 2004 par l'EMA afin de coordonner de nombreuses actions (une ETO et un PEA en particulier). Les travaux de la défense ont démontré l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour deux missions satellitaires (détection de bâtiments fixes sous couvert végétal partiel et détermination du type de bâtiments pour l'aide au ciblage ; caractérisation des sols pour l'aptitude au mouvement des forces). La détection et la caractérisation à petite échelle spatiale de bâtiments et de voies d'accès sont réalisables à l'aide d'un instrument hyperspectral dont les bandes sont sélectionnées judicieusement.

Echelle TRL : 6 dans le domaine réflectif (0,4-2,5 $\mu$ m), 4-5 en SWIR et 2 en infrarouge

Cette fiche est transmise par le bureau du Groupe de Travail HyperSpectral Défense (GTHS Défense).

### Contexte

#### Environnement

Du fait de l'évolution de la situation stratégique depuis la fin des années 1980, la défense française est confrontée à de nouvelles menaces, essentiellement asymétriques et multiformes. Celles-ci génèrent de *nouveaux besoins* en termes de détection, de reconnaissance, d'identification, d'analyse technique d'objectifs, de surveillance de sites et de caractérisation d'activité et enfin de préparation de missions. Le constat a été fait au début des années 2000 des limites atteintes par les moyens d'investigation disponibles, qui ne sont plus en mesure d'y répondre totalement, en dépit du bond capacitaire atteint avec les capteurs de nouvelle génération.

La défense se tourne donc depuis plusieurs années vers des solutions répondant à ces nouveaux besoins, parmi lesquelles l'accès à des capacités infrarouge et radar dans le cadre d'une coopération européenne. *Les*

*résultats obtenus à l'étranger et dans le cadre national en matière d'imagerie hyperspectrale, seule ou en complément de capteurs existants, semblent susceptibles de constituer un apport décisif pour des applications militaires ou duales particulières.*

#### Axes d'effort

Dans le but de s'adapter aux besoins prioritaires et aux programmes en cours, *cinq axes d'efforts* ont été identifiés dès 2003 par l'Etat Major des Armées :

- Axe « ciblage » ou « analyse structurelle d'objectifs d'intérêt défense » : caractérisation fine des matériaux, de la texture et de la structure des objectifs d'intérêt défense, détection et caractérisation d'objectifs d'intérêt défense durcis (enterrés, semi enterrés, sous couvert dense), évaluation de dommages (*Battle Damage Assessment*), détection de changement sur des infrastructures, *etc.*

- Axe « vulnérabilité au leurrage et au camouflage des systèmes d'observation » (VULNOBS) : détection de camouflages et de simulacres en utilisant les complémentarités et les redondances de plusieurs capteurs.
- Axe « effluents » : filtre atmosphérique, indicateurs de prolifération, détection d'activité, détection de polluants, caractérisation de l'hydrologie de la couche superficielle, détection et caractérisation des pollutions maritimes (en particulier pour le dégazage / après événement de mer, besoin fort de réactivité).
- Axe « traficabilité » : établissement de cartes de type « mouvement tout terrain » utiles par exemple pour la préparation au déploiement de troupes ou pour la préparation de débarquement d'un navire.
- Axe « bathymétrie », requalifié en 2005 « caractérisation des petits fonds complexes » : établissement d'une représentation des fonds dans la zone des 55m (bathymétrie « côtière » et gradient de plage), caractérisation des fonds de faible profondeur en zone littorale, détection et caractérisation d'objets immergés, détection des pipe-lines.

L'ETO Hyperspectrale<sup>4</sup>, par une sélection judicieuse des bandes spectrales d'observation, a certes montré qu'il était possible d'effectuer une classification du bâti ou des sols sans travail d'analyse (axes ciblage et praticabilité), mais ce résultat est aujourd'hui restreint à ces deux seuls cas étudiés.

L'avènement de nombreux capteurs laisse même présager une évolution du métier d'interprète image vers celui d'analyste, c'est-à-dire vers celui de spécialiste d'un domaine imagerie particulier. Outre les axes capacitaires décrits précédemment, un des efforts pour la défense sera donc la formation des exploitants à ce nouveau domaine ainsi que la mise en service d'outils d'analyse dédiés.

---

<sup>4</sup> ETO « Apport d'un instrument hyperspectral spatial pour les applications de défense » : étude terminée depuis octobre 2007

## Besoins

### Le ciblage (analyse structurelle d'objectifs d'intérêt défense)

L'axe « ciblage » a été défini comme prioritaire par le sous-groupe ciblage de l'EMA en mai 2003. Le besoin est de disposer d'informations permettant de détecter les objectifs d'intérêt défense durcis, enterrés, semi enterrés ou sous couvert dense (ou partiel), ainsi que de les caractériser en termes de matériau, de texture et de structure, d'anomalies significatives du couvert végétal ou de détection de changements par rapport à un fond spectralement connu.

### Le contre-camouflage / contre-leurrage

Cet axe est complémentaire du précédent, mais implique des techniques particulières. Il a pour objectif la détection de camouflages, la caractérisation des objets camouflés et la détection de simulacres. Pour cet aspect particulier, l'utilisation conjointe de l'imagerie hyperspectrale avec d'autres capteurs, notamment radar, est privilégiée. L'essentiel de la problématique du contre-camouflage tient dans la Détection / Reconnaissance / Identification des objectifs d'intérêt défense camouflés.

### La prolifération : effluents gazeux et liquides, mesures de températures

L'axe « effluents », à vocation duale, a pour objectif la détection d'indicateurs de prolifération, la détection et l'identification d'activités, la détection et l'identification de polluants à des fins de surveillance de sites particuliers.

### Praticabilité / traficabilité

L'axe « praticabilité » a pour but d'établir de façon aussi automatisée que possible des cartes de traficabilité, c'est-à-dire de caractériser la nature et l'état des sols et de déterminer les classes d'engins pouvant s'y déplacer. Cet axe rejoint par ailleurs l'axe cité *supra* dans la mesure où la défense, pour engager ses troupes dans les meilleures

conditions de sécurité, entend aussi détecter, reconnaître et identifier les zones polluées impropres à toute manœuvre, déploiement ou stationnement ou nécessitant le port d'équipement de protection.

### **La bathymétrie et la détection d'objets immergés (caractérisation des petits fonds complexes)**

Le besoin est d'acquérir des informations sur la traficabilité maritime, c'est-à-dire de déterminer par une série de critères combinant la bathymétrie, la nature des fonds sous-marins et de l'environnement terrestre, l'adéquation d'un site avec une opération de débarquement (gradient de plage par exemple). En association avec les études de traficabilité terrestre, il s'agit de détecter, voire d'identifier, les obstacles immergés et de déterminer l'aptitude des sols littoraux au débarquement et à l'évolution de personnels et d'engins.

### **Autres besoins**

Eu égard aux évolutions introduites par les travaux sur le futur livre blanc qui unira les problématiques de défense et de sécurité générale, *des besoins nouveaux et deux complètent désormais les 5 axes d'effort identifiés en 2003.*

### **Déminage terrestre / détection de charniers**

Il s'agit de répondre à un besoin récurrent de l'Armée de Terre, exprimé par la STAT, de pouvoir détecter des anomalies telles que des perturbations du sol ou du sous-sol qui pourraient être caractéristiques de champs de mines, de charniers, d'objets ou de structures enterrés. Compte tenu de la possible petite dimension de tels phénomènes, la défense n'attend pas que la technologie hyperspectrale puisse en assurer la reconnaissance ou l'identification, mais souhaite disposer d'un moyen qui puisse, à l'aide d'autres systèmes, lui permettre d'effectuer ces deux actions de manière plus ciblée qu'actuellement (mise en évidence de sols « travaillés » par exemple).

### **Surveillance du champ de bataille**

Il s'agit de permettre la détection et la caractérisation, voire l'identification des matériels ou d'armements déployés sur le

terrain. Dans ce cadre, la défense entend aussi acquérir du renseignement d'environnement, par exemple concernant la présence d'installations NRBC ou de fabrication d'engins explosifs ou l'existence de cultures illicites, pour certaines sous couvert végétal partiel.

### **Etat de l'art**

Pour satisfaire ses besoins, la défense conduit des travaux qui lui permettront à terme de répondre à ces deux questions :

- Quels produits l'imagerie hyperspectrale spatiale peut elle fournir aujourd'hui et demain ?
- Quelles sont les technologies nécessaires ?

### **Veille technologique**

#### **De la DGA (1998-2004)**

Cette veille a montré dès 1998 que l'imagerie hyperspectrale semblait intéressante pour de nombreuses applications d'intérêt défense. Beaucoup de données (matériaux naturels ou non) ont été collectées du visible à l'infrarouge lointain à l'aide de moyens laboratoires, terrain et aéroportés pour les besoins civils (géologie par exemple). Outre la participation à des colloques nationaux et internationaux, cette action s'est traduite par l'organisation de colloques annuels spécifiques réunissant les acteurs étatiques du domaine avec ceux de la recherche et de l'industrie et le développement de contacts réguliers entre ces acteurs.

#### **De la DRM (à partir de 2000)**

En s'appuyant sur les résultats obtenus par la recherche ouverte civile et militaire en France et à l'étranger (Etats-Unis, Canada, Suède, Allemagne pour l'essentiel), il s'est avéré que l'imagerie hyperspectrale était susceptible de répondre à certaines problématiques d'analyse de défense, notamment en termes de contre prolifération et de caractérisation d'objectifs. A ces axes initiaux sont venus s'ajouter les intérêts plus spécifiques de l'Armée de Terre (traficabilité) et de la Marine Nationale (bathymétrie).

### **De l'ONERA (à partir de 1998)**

Dès 1998, l'ONERA a entrepris une action de veille scientifique et technologique dans différents domaines de l'imagerie hyperspectrale :

- imageurs hyperspectraux aéroportés et satellitaires,
- algorithmes de prétraitement et traitement des données hyperspectrales,
- base de données de propriétés optiques spectrales des matériaux et des surfaces.

Cette veille a montré le fort investissement de plusieurs organismes de défense étrangers, en particulier nord américains, sur les domaines cités ci-dessus.

On notera le lancement du démonstrateur satellitaire américain ARTEMIS prévu fin 2008 par la défense américaine. Ce satellite couple une charge utile hyperspectrale dans le domaine réflectif et un instrument panchromatique à haute résolution spatiale (application : surveillance du champ de bataille).

Avec le concours de la DGA et la mise en place de plusieurs collaborations internationales et nationales (DLR et FGAN-FOM allemands, FFI Norvégien, RDDC Canadien, FOI Suédois, ERM Belge, le DSTL Anglais, le CISAM Italien, CEA), l'ONERA a entrepris le développement de compétences scientifiques, en particulier à travers le lancement de plusieurs thèses, et d'outils matériels et logiciels lui permettant de se situer au meilleur niveau de l'état de l'art sur les trois domaines cités.

### **Du CEA (à partir de 2000)**

Cette veille a indiqué un potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour des applications liées à la surveillance de sites proliférants et à la bathymétrie :

- caractérisation de l'activité de sites d'intérêt par l'analyse des effluents gazeux et particuliers émis,
- analyse de la géologie de champs d'expérimentations nucléaires (détermination de la nature de l'encaissant par analyse des carreaux de mine),

- en eau claire, sans sédiment ni pollution, les études bibliographiques laissent espérer une estimation de la bathymétrie côtière avec une précision en z de l'ordre de 0,5-0,6m pour la zone de profondeur des 0-30m.

### **Actions de préparation et de coordination**

#### **Collaboration EMA / CEA**

La défense et le CEA entretiennent une collaboration depuis 2000 dans le domaine de l'imagerie hyperspectrale, sous couvert des actions menées par l'Etat Major des Armées et par la DGA. Cette collaboration s'est traduite par une veille technologique conjointe, des travaux communs sur certaines applications communes d'intérêt défense, l'organisation de campagnes de prises de vues aéroportées (contre-camouflage / contre-leurrage) et la participation active du CEA aux groupes de travail défense couvrant les divers domaines de l'imagerie hyperspectrale.

#### *Campagne de mesures*

Le CEA a réalisé en 2003 une campagne aéroportée avec l'instrument hyperspectral HyMap sur le site de Vert-Le-Grand (Essonne). Des véhicules de taille inférieure à la dimension du pixel ont été positionnés sur le site, certains de ces véhicules étant camouflés par des filets prêtés par la DRM. *Les méthodes de détection développées (détection d'objectifs d'intérêt défense et d'anomalies) ont permis de conclure quant à l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour le décamouflage.* Une campagne similaire a été réalisée en 2007 près de Fos-sur-Mer avec différents types de filets de camouflage prêtés par la défense. L'exploitation de cette campagne est en cours.

#### *Thèse CEA-ONERA : effluents particuliers*

Ces travaux ont démontré l'intérêt de l'imagerie hyperspectrale (domaine spectral (0,4-2,5 $\mu$ m), résolution spatiale décimétrique) pour la caractérisation d'effluents particuliers (aérosols). Sous certaines hypothèses, il est en effet possible d'obtenir des informations sur la

composition, la granulométrie et la concentration de panaches de fumées d'incendies.

De nouvelles études sont en cours pour améliorer cette caractérisation dans le cas de panaches industriels de faible épaisseur optique. L'intérêt du domaine infrarouge thermique est également étudié d'une part pour améliorer l'estimation de la réflectance du sol sous le panache et d'autre part pour détecter des rejets gazeux possédant une ou plusieurs bandes d'absorption dans cette gamme de longueurs d'onde. Les applications visées sont la caractérisation de l'activité de sites d'intérêt (surveillance de prolifération, contrôle de sites chimiques particuliers, *etc.*) et la pollution atmosphérique.

### **ETO VULNOBS et ETO SOIR3**

L'étude documentaire VULNOBS (menée en 2002), avait pour but de déterminer les familles de capteurs ou les associations de capteurs susceptibles de répondre aux besoins de contre-leurrage et de décamouflage. Parmi les axes retenus, l'imagerie hyperspectrale semblait une solution prometteuse. Cette étude a permis d'orienter une partie des études de première génération des organismes de la défense (CEA en particulier).

L'étude SOIR 3, menée en 2001 par la société ThalesAleniaSpace<sup>5</sup> avait pour objectif de déterminer le potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour des applications de défense à partir des premiers résultats obtenus avec les capteurs aéroportés ou spatiaux existants. Les axes « effluents », « traficabilité », « contre-camouflage », et « bathymétrie » notamment ont été abordés.

### **Travaux industriels CEA et ThalesAleniaSpace**

Sur la bathymétrie, le CEA à partir de l'exploitation d'images du satellite Hyperion sur le site de Mururoa et ThalesAleniaSpace à partir de l'exploitation d'images du satellite MERIS en Méditerranée confirment les performances données dans la bibliographie.

### **Création du Groupe de Travail HyperSpectral Défense (GTHS Défense)**

Afin de coordonner les actions menées dans le domaine par les différentes équipes de recherche de la défense, un groupe de travail spécifique a été créé par l'EMA en décembre 2004 dont le co-pilotage a été confié à la DRM et à la DGA / UM ESIO.

### **PEA 01 03 02 « Apport de l'imagerie multi / hyperspectrale » depuis 2001, reconduit en 2007**

Ce PEA a pour but d'étudier l'apport de l'imagerie multi / hyperspectrale pour améliorer les capacités de Détection / Reconnaissance / Identification des senseurs optroniques pour différentes applications. Ce PEA, sous maîtrise d'ouvrage du département Optronique de la DGA, s'organise en plusieurs axes décrits ci-dessous.

#### ***Axe n° 1***

*Etudes en coopération européenne concernant l'apport de l'imagerie multi / hyperspectrale pour améliorer les capacités de Détection / Reconnaissance / Identification des senseurs optroniques pour différentes applications.*

Des travaux ont été menés par 7 pays sur une durée de trois ans dans le cadre de la coopération européenne WEAG-THALES JP8.10 « Imagerie hyperspectrale pour des applications militaires » puis du programme HIPOD, arrangement technique EUROPA. Pour la France, les travaux ont été menés par l'ONERA.

Une grande quantité de données a été collectée lors de deux campagnes de mesures terrain en contexte rural ainsi qu'en laboratoire en 2002 et 2003. Ces campagnes mettaient en jeu différents instruments de mesures spectraux sol-sol et air-sol, et ont abouti au développement et à la qualification de codes de simulation (scène, *etc.*). Ces campagnes ont fait l'objet d'exploitations. Les résultats obtenus montrent en aéroporté que :

- dans le domaine visible, l'imagerie hyperspectrale apporte de très bonnes performances pour la détection

---

<sup>5</sup> A l'époque, Alcatel Space

automatique d'anomalies et la reconnaissance spectrale des objectifs d'intérêt défense,

- les bandes spectrales en proche-infrarouge (1-2,5 $\mu$ m) améliorent ces performances,
- dans l'infrarouge lointain (8-12 $\mu$ m), les performances sont encourageantes,
- enfin, il est recommandé d'associer l'imagerie haute résolution spatiale à l'imagerie hyperspectrale pour la reconnaissance et l'identification.

### *Axe n° 2*

*Etude et réalisation (en cours) d'un système de mesure hyperspectral aéroporté (projet SYSIPHE / SYstème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés Hyperspectrales Embarqué).*

Ces travaux, en cours de réalisation, sont menés sous maîtrise d'œuvre de l'ONERA et en coopération avec la Norvège. Il s'agit de réaliser un système de mesure hyperspectral aéroporté, à hautes résolutions spectrale et spatiale, couvrant les bandes optiques du visible proche-infrarouge (0,4-2,5 $\mu$ m), de l'infrarouge moyen (3-5,5 $\mu$ m) et de l'infrarouge thermique (8-11,5 $\mu$ m). Le système comporte un instrument visible proche-infrarouge, un instrument infrarouge et un système sol de traitement et d'archivage des données. Les produits fournis sont la luminance spectrale en entrée instrument, la réflectance spectrale, l'émissivité spectrale et la température de surface. Les principales caractéristiques du système SYSIPHE, qui sera disponible courant 2012, sont fournies dans le tableau 2.

### *Axe n° 3*

*Constitution d'une base de données de référence MEMOIRES à l'ONERA.*

Actuellement en cours d'élaboration, il s'agit d'une base de données nationale d'archivage des caractéristiques thermiques et optiques de tout type de matériau (objectifs d'intérêt défense et fonds), de provenance diverse en garantissant leur pertinence et leur cohérence. Cette base sera accessible via une connexion Internet sécurisée, à la communauté

scientifique et industrielle, avec accord préalable de la DGA.

<b>Domaine spectral</b>	VNIR-SWIR (0,4-2,5 $\mu$ m) MWIR (3-5,5 $\mu$ m) (spectre continu) LWIR : (8-11,5 $\mu$ m) (spectre continu)
<b>Résolution spectrale</b>	VNIR-SWIR : 5nm MWIR : 16cm <sup>-1</sup> LWIR : 10cm <sup>-1</sup>
<b>Fauchée</b>	3000x500m
<b>Pas d'échantillonnage au sol</b>	0,5m
<b>Visée</b>	Nadir

*Tableau 2 – Principales caractéristiques de l'instrument SYSIPHE.*

### **ETO « Applications militaires de l'imagerie hyperspectrale spatiale » (octobre 2006 – octobre 2007)**

Cette ETO avait pour objectif d'étudier l'apport d'un instrument hyperspectral spatial pour deux missions d'intérêt défense, le ciblage et la traficabilité. Deux concepts spatiaux (chaîne image essentiellement) ont été dégagés sur la base de plateformes micro et mini satellites en utilisant les données hyperspectrales disponibles et issues des applications civiles. L'étude a permis de sélectionner les longueurs d'onde utiles pour les deux missions considérées.

L'ETO a permis d'étudier l'apport d'un capteur hyperspectral spatial d'une part pour les missions de détection de bâtiments fixes sous couvert végétal partiel et la détermination du type de bâti pour l'aide au ciblage, et d'autre part pour la caractérisation des sols (hors bathymétrie) pour l'aptitude au mouvement des forces. Les moyens d'observation actuels ne permettent d'assurer ces 2 missions que partiellement. L'analyse de la bibliographie a permis de déterminer les signatures des matériaux, des sols et du couvert végétal et de sélectionner les bandes spectrales utiles pour chaque mission (instrument hyperspectral sélectif).

Deux concepts de futur système opérationnel d'observation (FSO) hyperspectral spatial ont été étudiés :

- un FSO « capacité nominale » permettant de répondre aux besoins exprimés en utilisant des technologies disponibles pour une mise en service à l'horizon 2017, et pouvant être utilisé seul ou conjointement avec les moyens actuels d'observation de la défense,
- un FSO « 1<sup>ère</sup> capacité » à bas coût, avec les technologies disponibles aujourd'hui, assurant, à l'horizon 2012, un premier niveau de service pour les deux missions spécifiées en utilisation conjointe avec les moyens d'observation actuels de la défense.

Des pré-dimensionnements du FSO (principalement sur les aspects chaîne image bord / sol) ont été réalisés. Leurs caractéristiques sont données ci-dessous (voir tableaux 3 et 4).

### ***FSO « capacité nominale » (horizon 2017)***

- Mission 1 : le service rendu est la détection et l'identification des bâtis spécifiés (matériaux courants).
- Mission 2 : le service rendu est l'aide à la traficabilité grâce à l'identification de la nature des sols spécifiés et la détection des zones humides.

Le nombre de zones imagées est limité par le débit de télémétrie image réalisable. Les données exogènes utilisées sont les bases de données internationales existantes sur les signatures de matériaux et de sols. Aucun traitement nouveau n'est nécessaire pour l'extraction des observables par les interprètes d'image.

Il est à noter que le nombre de mini satellites envisagés s'explique par les délais de revisite souhaités qui sont très contraignants, dans les scénarios qui avaient été fournis en entrée d'étude.

### ***FSO « 1<sup>ère</sup> capacité » (horizon 2012)***

- Mission 1 : le service rendu est la détection et l'identification des bâtis spécifiés (matériaux courants).
- Mission 2 : le service rendu est l'aide à la traficabilité grâce à l'identification de 3 classes de sols importants pour la traficabilité (sols durs, à risques d'enfoncement et zones humides).

Le nombre de zones imagées est supérieur de 50% au cas du FSO « capacité nominale ». Les données exogènes nécessaires sont les bases de données internationales existantes sur les signatures de matériaux et de sols, ainsi que les connaissances géologiques existantes sur la localisation et la nature des encroûtements. Grâce à ces dernières, la détection dans les bandes spectrales en LWIR n'est plus nécessaire. Aucun traitement nouveau n'est nécessaire pour l'extraction des observables.

### ***Conclusion de l'ETO***

*L'étude a permis de démontrer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour deux missions spatiales à partir des données d'entrée disponibles pour les applications civiles. La détection et la caractérisation à petite échelle spatiale de bâtiments et de voies d'accès est réalisable à l'aide d'un instrument hyperspectral sélectif, c'est-à-dire doté de bandes spectrales sélectionnées judicieusement pour répondre aux missions. Deux niveaux de services sont accessibles respectivement à l'horizon 2012 et 2017.*

<b>Orbite / altitude</b>	Héliosynchrone – à 11h00 local Inclinaison $\approx 97,40^\circ$ / 600km
<b>Nombre de satellites</b>	7
<b>Plateforme</b>	Mini satellite du type Proteus, EnMAP (bus Sar-Lupe)
<b>Masse</b>	300kg
<b>Agilité spatiale</b>	$\pm 15^\circ$
<b>Durée de mesure sur zone</b>	< 1mn
<b>Temps de revisite</b>	24h
<b>Nombre maximal de zones imagées entre deux transmissions sol</b>	8
<b>Localisation</b>	GPS
<b>Instrument hyperspectral sélectif</b>	Bandes spectrales discrètes
<b>Nombre de bandes spectrales en VNIR</b>	Classe 25
<b>Nombre de bandes spectrales en SWIR</b>	Classe 40
<b>Nombre de bandes spectrales en LWIR</b>	Classe 10
<b>Bande VNIR pas au sol</b>	Classe 5m
<b>Bande SWIR pas au sol</b>	Classe 10m
<b>Bande LWIR pas au sol</b>	Classe 100m
<b>Champ</b>	20x20km

*Tableau 3 – Principales caractéristiques FSO « capacité nominale » (horizon 2017).*

## La Défense

<b>Orbite / altitude</b>	Héliosynchrone – à 11h00 local Inclinaison $\approx 97,40^\circ$ / 600km
<b>Nombre de satellites</b>	3
<b>Plateforme</b>	Microsatellite du type Myriade
<b>Masse</b>	120kg
<b>Agilité spatiale</b>	$\pm 15^\circ$
<b>Durée de mesures par zone</b>	< 1mn
<b>Temps de revisite</b>	60h
<b>Nombre maximal de zones imagées entre deux transmissions sol</b>	12
<b>Localisation</b>	GPS
<b>Instrument hyperspectral sélectif</b>	Bandes spectrales discrètes
<b>Nombre de bandes spectrales en VNIR</b>	classe 15
<b>Nombre de bandes spectrales en SWIR</b>	classe 15
<b>Bande VNIR pas au sol</b>	Classe 10m
<b>Bande SWIR pas au sol</b>	Classe 10m
<b>Champ</b>	20x20km

*Tableau 4 – Principales caractéristiques FSO « 1<sup>ère</sup> capacité » (horizon 2012).*

**Synthèse de l'apport de l'imagerie hyperspectrale spatiale**

Le tableau suivant propose une synthèse établie par le GTHS Défense concernant l'apport de l'hyperspectral spatial pour les applications de défense.

<b>Mission</b>	<b>Apport de l'hyperspectral spatial</b>	<b>Références</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Ciblage</b>	Oui	Etude : ETO Hyperspectral	Identification des matériaux de surface
<b>Contre-camouflage / contre-leurrage</b>	Séduisant du point de vue scientifique.  Des limitations technologiques drastiques pour une application à l'horizon 2015.	Bibliographie  Campagnes de mesures CEA  Consultation DGA (ETO)	Aucune robustesse aux évolutions des contre-mesures dans le cas d'un instrument superspectral <sup>6</sup> .  Fortes limitations de la mission dans le cas d'un instrument hyperspectral spatial non sélectif <sup>7</sup> (résolution spatiale, nombre d'images retransmises) <sup>8</sup>
<b>Prolifération : effluents gazeux</b>	A confirmer	Campagne aéroportée TIRIS (Belgique, port d'Anvers, participation de l'ONERA)  Mesures sol sur raffinerie (ATIS)  Détection et caractérisation de particules dans des panaches de fumées d'incendie (CEA-ONERA)	Aucune étude en France sur l'apport d'un instrument hyperspectral spatial
<b>Praticabilité / traficabilité</b>	Oui	Etude : ETO Hyperspectral	Caractérisation des sols et détection des zones humides Analyses en cours - utilisation des acquis de l'ETO dans le PEA ECORS (campagnes 2009-2010) - PRF ENVIRO (ONERA)
<b>Bathymétrie et détection d'objets immergés</b>	Oui, en eau claire uniquement	Bibliographie  Travaux de recherche (CEA, ThalesAleniaSpace)	Limitation drastique des performances en présence de sédiments et / ou de polluants
<b>Démontage terrestre / détection de charniers</b>	A confirmer	Bibliographie : en aéroporté, détection d'anomalies sur zones homogènes	Aucune étude en France sur l'apport d'un instrument hyperspectral spatial
<b>Surveillance du champ de bataille (DRI)</b>	A confirmer	Détection d'anomalies (campagnes de mesures, participation ONERA)	Aucune étude en France sur l'apport d'un instrument hyperspectral spatial <sup>7</sup>

*Tableau 5 – Synthèse de l'apport de l'imagerie hyperspectrale spatiale.*

<sup>6</sup> Instrument comportant une à quelques dizaines de bandes spectrales larges ou étroites, généralement non contiguës. Appelé « hyperspectral sélectif » dans certains documents défense

<sup>7</sup> C'est-à-dire fournissant un cube d'images spectrales sur un large domaine spectral

<sup>8</sup> Oui en aéroporté, en complémentarité d'un instrument à haute résolution spatiale (travaux JP 8.10)

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour préciser l'apport de l'imagerie hyperspectrale spatiale et ses limitations pour les applications de défense. Ils pourront s'appuyer sur des signatures spectrales d'objets d'intérêt défense et de fonds en provenance soit de bases de données existantes du civil ou en cours d'élaboration au niveau de la défense (base de données MEMOIRES), soit de collectes spécifiques à l'aide des moyens existants (moyens civils) ou en cours de réalisation (moyens de la défense, MISTERE disponible courant 2008 et SYSIPHE disponible courant 2012).

### Volet utilisateurs

#### Enjeux

##### Enjeux technologiques

L'analyse spectrale est le prolongement naturel de l'imagerie optique, un domaine que la France maîtrise historiquement sur le plan international. La mise en œuvre, seule ou en coopération, d'un programme d'imagerie hyperspectrale ou de technologies associées (instrument, composant optique, algorithmes, outils d'exploitation, formation, *etc.*) permettrait à la France de conserver le leadership dans le domaine optique.

##### Enjeux politiques

En termes d'innovation technologique, la maîtrise d'une capacité hyperspectrale pourrait constituer un atout dans le cadre de négociations multinationales pour un système européen futur, dans le prolongement du programme MUSIS.

##### Enjeux capacitaires

Les résultats obtenus en France ou en coopération, ainsi que l'étude de la documentation ouverte relative à des applications d'intérêt montrent que, pour des applications aéroportées, l'imagerie hyperspectrale est susceptible de compléter les capteurs actuels dont les limitations sont connues. L'enjeu consiste dans la démonstration de ce savoir faire pour des applications spatiales.

### Utilisateurs finaux potentiels

#### Ministère de la Défense

Les Etats-Majors, les agences de renseignement, les forces (terre, air, mer), les organismes spécialisés (analyse stratégique, contre-prolifération, ciblage, *etc.*) seraient des utilisateurs finaux potentiels. L'emploi dépendra des services offerts réellement par les systèmes spatiaux d'observation hyperspectrale pour répondre aux besoins de la défense.

#### Ministère de l'Intérieur

L'emploi dépendra ici encore des services offerts réellement pour répondre aux besoins, mais les applications existantes de capteurs aéroportés ou au sol montrent une réelle capacité ou des dispositions pour la gestion de catastrophes naturelles, la détection et la gestion des feux de forêt, la gestion des accidents industriels, les pollutions, les cartes des risques naturels et industriels, *etc.* Les perspectives de mise en œuvre sont similaires aux besoins militaires.

#### Les organismes d'Etat à statut particulier

Les organismes tels que CEA, ONERA, ETAS, CELAR, IMASSA, *etc.* peuvent avoir à la fois des responsabilités scientifiques et opérationnelles dans le domaine de l'imagerie, et constituent l'essentiel du lien entre recherche pure et mise en œuvre de moyens opérationnels. Leurs problématiques recoupent donc celles des différents postes évoqués dans le présent rapport.

## La Défense

## 2.3 LA TECHNOLOGIE / INDUSTRIE

**Intervenants** : David LAUBIER (CNES), Damien BARACHE (ITT Visual Information Solutions), Xavier BRIOTTET (ONERA), Eric MALIET (Astrium), Serge TARIDE (ThalesAleniaSpace) et un groupe de travail composé de SAGEM et autres « industriels capteurs »

On note un fort intérêt international pour des missions hyperspectrales spatiales (EnMAP en Allemagne, PRISMA en Italie, ARTEMIS et HypSPIRI aux Etats-Unis, MSMI en Afrique du Sud, Hyper-X au Japon, etc.). La France n'est pas présente au niveau des missions mais possède les capacités technologiques pour une telle réalisation (exemple de MERIS réalisé par Thalès). Des voies d'améliorations technologiques sont en outre identifiées pour atteindre des performances plus élevées.

Echelle TRL : 6 pour le visible / proche-infrarouge, 3 pour l'infrarouge thermique

### Contexte technologique

Le domaine de l'hyperspectral suscite depuis longtemps l'intérêt des instrumentistes, mais les technologies favorables n'ont émergé que depuis une vingtaine d'années.

Deux tableaux fournis en annexe 4.1 présentent les instruments hyperspectraux (au sens usuel, hors sondage atmosphérique) existant dans les domaines aéroporté et spatial. On regroupe sous cette dénomination les instruments :

- imageurs à moyenne résolution (de quelques mètres à quelques centaines de mètres),
- travaillant dans le domaine optique, de l'ultraviolet proche à l'infrarouge,
- possédant une résolution spectrale ( $\lambda/\Delta\lambda$ ) de l'ordre du %, quelques centaines de bandes et délivrant un spectre continu.

Ils se composent d'une partie télescope qui forme une image intermédiaire dans le plan de la fente d'entrée d'un spectrographe. Ce dernier utilise un élément dispersif ou à transformée de Fourier. Un capteur matriciel permet d'acquérir les informations spatiales et spectrales. Dans le cas d'une fente étroite (une ligne), le spectrographe est à dispersion ou par transformée de Fourier statique.

Les missions décrites ci-dessous (voir figure 4) ont été rendues possibles par un certain nombre de progrès techniques :

- dans le domaine de la détection, les performances des détecteurs se sont

régulièrement améliorées (sensibilité, vitesse de lecture, format, mais aussi bandes spectrales). Par ailleurs, les électroniques associées ont suivi une évolution générale similaire, devenant plus compactes, plus rapides, et consommant moins,

- en optique, de nouvelles combinaisons peuvent être mises en œuvre (combinaisons de type TMA ou Offner), qui tirent partie des progrès dans le domaine du polissage et de la réalisation de certaines composants (réseaux convexes par exemple).

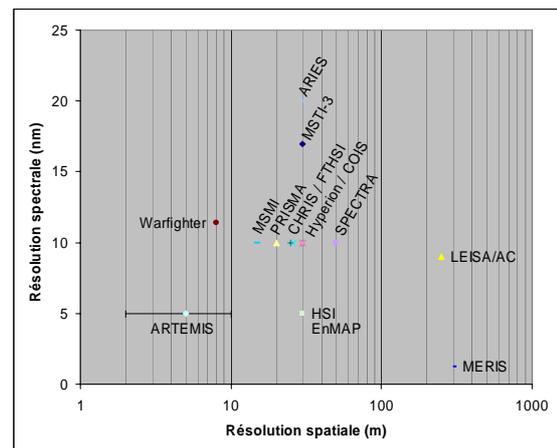


Figure 4 – Résolutions spatiales et spectrales de projets hyperspectraux spatiaux.

Notons que sur cette figure, trois projets ont été abandonnés mais leurs concepts étaient assez avancés : COIS (NEMO – Etats-Unis), ARIES (Australie) et SPECTRA (ESA).

*On peut constater une tendance générale : les capteurs les plus récents (ARTEMIS, EnMAP, MSMI, PRISMA) visent tous les meilleures performances en termes de résolution spectrale ou spatiale.*

Des limitations subsistent toutefois. *En ce qui concerne la résolution spatiale, la plupart de ces capteurs, hors Warfighter (qui fut malheureusement perdu au lancement) et peut-être ARTEMIS (tous deux à vocation militaire), se cantonnent à une performance moyenne (20-30m).* Jusque récemment, les détecteurs disposaient rarement de la vitesse de lecture nécessaire, sauf développement spécifique difficilement supportable dans le cadre de missions de démonstration. Par ailleurs, cela permet d'obtenir naturellement de meilleures performances radiométriques (rapport signal à bruit notamment) au prix d'optiques de dimensions raisonnables pour de telles missions. C'est également vrai dans le cas de Warfighter qui utilisait la grande pupille de l'instrument panchromatique pour accéder à la haute résolution spatiale.

Les données consolidées manquent pour réaliser le même type de comparaison avec les autres paramètres. *Notons simplement que les missions dans la classe de résolution spatiale 20-30m se satisfont d'un rapport signal à bruit compris entre 100 et 200. Par rapport à cette génération, EnMAP se distingue par une exigence nettement plus forte.* Une comparaison sur le champ ne serait pas pertinente de par la nature exploratoire de ces missions.

*Les domaines spectraux couvrent au moins le visible, généralement le SWIR. Seul l'instrument Warfighter prévoyait l'accès à l'infrarouge plus lointain (MWIR). Cela correspond bien à l'état de maturité des technologies de détecteurs pour ces différents domaines.*

Les européens, à l'encontre des américains, misent plutôt sur les prismes que sur les réseaux : difficultés technologiques, problèmes de brevets, sensibilité à la polarisation constituent probablement les causes concourantes qui ont conduit à ces choix.

Aux Etats-Unis, on trouvera tout le reste de la panoplie : des instruments équipés de filtres wedge (MSTI ou LEISA), ou utilisant le

concept de la transformée de Fourier (FTHSI) ont été par exemple embarqués sur certaines de ces missions. Toutefois, la technologie des spectromètres à réseaux reste la plus employée : réseaux plans pour les systèmes les plus anciens (HSI), convexes pour les plus récentes (Hyperion, ARTEMIS, peut-être Warfighter). Par ailleurs, les Etats-Unis mènent plus d'activités dans l'infrarouge (favorisées par une avance technologique sur les détecteurs, y compris pour les MCT visibles), limité à la fenêtre (3-5 $\mu$ m) dans le spatial. Warfighter disposait d'une voie consacrée à cette dernière bande. Plus limités, Hyperion (une voie SWIR) et ARTEMIS (une voie commune visible + SWIR) restent plus étendus spectralement que leurs homologues européens.

### Volet capteur et segment sol

Le capteur se compose comme on l'a vu de deux parties : d'une part un télescope qui joue le rôle de collecteur de flux et d'imageur, d'autre part une cavité spectroscopique qui réalise l'analyse spectrale.

*Sur la partie imageur, une large gamme de combinaisons optiques performantes est aujourd'hui disponible, que ce soit pour la haute résolution (télescopes type Cassegrain ou Korsch) ou pour des résolutions intermédiaires (télescopes type TMA par exemple).*

*Le travail doit plutôt porter sur la cavité spectroscopique afin de confirmer les performances envisagées.* De nombreuses possibilités sont offertes : spectromètres à prisme, à réseau, par filtre continu variable, par transformée de Fourier, ou par transformée de Hadamard. Parmi toutes ces familles, les concepts les mieux adaptés sont :

- les prismes (au sens large, éventuellement avec une certaine cambrure) qui permettent d'accéder à des champs importants dans des dimensions limitées et offrent une bonne transmission ; leur faible dispersion comparée aux autres techniques ne constitue pas un obstacle de par la résolution spectrale recherchée. La difficulté se situe plutôt dans la non linéarité de leur dispersion qui conduit à un surdimensionnement du nombre de canaux aux courtes longueurs d'onde,

- les réseaux : ils permettent de simplifier l'optique (c'est la voie suivie on l'a vu par les dernières missions développées aux Etats-Unis), mais possèdent un comportement polarisant et une mauvaise efficacité de transmission aux extrémités du domaine spectral,
- la spectroscopie par transformée de Fourier à champ étendu (le type à fente existe également, mais sa luminosité est insuffisante) ; si les technologies optiques existent, des difficultés subsistent en terme de stabilité de la prise de vue ainsi que des effets de relief. Des travaux ont été réalisés à l'ONERA (historiquement et récemment) et au CNES.

*Les technologies de détection montrent également un important potentiel de développement en vue d'augmenter la compacité des instruments*, notamment :

- les détecteurs CMOS, qui sont naturellement bien adaptés à ce type de mesure : accès aléatoire aux pixels, possibilités d'aménagement importantes (par exemple, on peut souhaiter des pixels de dimension variable pour tenir compte de la variation de la dispersion des prismes), nombre de sorties et vitesse de lecture plus importantes qu'en CCD,
- les détecteurs MCT, pour l'infrarouge naturellement, mais aussi pour le visible ; ainsi, des détecteurs visible / SWIR sont à l'étude avec Sofradir, qui présentent potentiellement l'avantage de permettre l'aménagement d'une seule cavité spectroscopique (un tel détecteur est monté sur ARTEMIS).

Une question générale à approfondir en ce domaine a trait au champ de l'instrument. Il est difficile d'aménager, comme on le fait pour les imageurs multispectraux, plusieurs détecteurs dans le champ pour augmenter la fauchée de l'instrument. Cette dernière est donc intimement liée au format des détecteurs disponibles, sauf à utiliser plusieurs caméras simultanément (comme cela a été le cas sur MERIS). Cette question est un axe de travail important pour élargir les capacités de l'instrument, notamment pour les détecteurs MCT.

*Dans le domaine des techniques instrumentales, on peut estimer que les progrès à venir devraient permettre d'accéder à une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de mètres pour un champ potentiellement extensible à 20km, à moduler en fonction des besoins de revisite et de qualité radiométrique.*

Comme vu précédemment, *un enjeu important se situe à l'étape transmission, le volume des données nécessitant un taux de compression important*. De nombreux algorithmes ont été proposés depuis quelques années, avec avantages et inconvénients associés. Un axe de travail doit être envisagé sur le sujet.

En liaison avec cet aspect, il pourrait également s'avérer nécessaire de progresser sur les traitements à bord, en particulier dans le domaine des corrections géométriques. Comme on applique des corrections radiométriques (gain, offset) à bord pour optimiser le débit de données en sortie du compresseur dans le cas d'un imageur, la nature des données hyperspectrales peut conduire à effectuer des corrections géométriques en sortie capteur, afin là également d'optimiser la compression et d'éviter la génération d'artefacts en cas de distorsions spatiale ou spectrale trop importantes. Ces défauts pourraient en effet se révéler rédhibitoires dans le cas d'instruments à performances élevées : un tel traitement de correction géométrique pourrait ainsi permettre d'élargir le domaine de performances (champ par exemple) ou la compacité de l'instrument. Une réflexion sur les liens entre ce type de correction et la compression serait intéressante.

Les méthodes d'étalonnage radiométrique et géométrique s'avèrent ainsi d'une grande importance. La généralisation de nouvelles sources optiques (LEDs par exemple) pourrait apporter des solutions bord à certains de ces problèmes. Encore au-delà, un niveau de correction supplémentaire intervient avec les corrections atmosphériques.

### **Volet outils utilisateurs**

*De nombreux outils sont disponibles à ce jour dans le commerce pour le traitement et l'analyse des images hyperspectrales (notamment dans le logiciel ENVI / IDL). Ces outils sont décrits ci-dessous.*

### Accès aux données

Du fait du volume des données et du grand nombre de bandes, l'accès, la gestion et la visualisation des images hyperspectrales sont des points clés pour commencer une analyse hyperspectrale. Des méthodes de tuilage performantes existent pour visualiser et gérer les cubes hyperspectraux.

### Correction géométrique

Les procédures de correction géométrique proposées pour les images hyperspectrales sont les mêmes que pour la correction des images multispectrales.

### Corrections atmosphériques

La correction atmosphérique est indispensable pour une analyse hyperspectrale quantitative : elle consiste à réduire les effets de l'atmosphère sur les spectres de l'image. On distingue deux types de méthodes : les méthodes empiriques (méthodes des logs résiduels, normalisation par le spectre moyen, ajustement avec des spectres au sol, *etc.*) et des méthodes reposant sur une modélisation du rayonnement à travers l'atmosphère (module FLAASH d'ENVI fondé sur MODTRAN4, *etc.*). Ces outils ont atteint un niveau de maturité suffisant pour la plupart des applications.

### Librairies spectrales

Il est souvent critique d'avoir à disposition de « bonnes librairies » pour effectuer une analyse hyperspectrale. Certaines librairies sont livrées avec les logiciels (par exemple, les librairies de l'USGS, du JPL et du programme IGCP sont livrées avec ENVI, ou la base de données MEMOIRES de l'ONERA). Elles peuvent également être importées dans divers formats (par exemple les formats ASCII et ASD) afin de capitaliser les mesures réalisées au cours de campagnes. Néanmoins, un effort important doit être entrepris pour améliorer la représentativité de ces bases : meilleure connaissance des propriétés optiques spectrales des matériaux naturels et artificiels et adéquation de ces informations à la résolution du capteur.

### Pôles spectraux

Les spectres purs existants dans une scène sont souvent appelés pôles spectraux ou *endmembers*. Des méthodes automatiques ou semi-automatiques peuvent faciliter la recherche de ces pôles spectraux dans l'image. Des méthodes d'identification des pôles spectraux avec une librairie spectrale sont également disponibles. Ces méthodes mettent généralement en œuvre plusieurs étapes : réduction de la dimension spectrale par transformée MNF (*Minimum Noise Fraction*), algorithme de recherche des pixels les plus purs (PPI), N-D visualiseur d'ENVI, algorithme automatique de recherche des *endmembers*, SMACC, *etc.*

## 3 Recommandations

La communauté nationale est en capacité de s'investir dans un système hyperspectral spatial de « télédétection des surfaces complexes ». La pluridisciplinarité d'une mission (voire la dualité) serait un point fort, les besoins importants en télémétrie pouvant aujourd'hui être pris en compte grâce aux avancées réalisées dans le domaine de la compression notamment.

### 3.1 ELEMENTS D'ANALYSE

#### Positionnement programmatique

Même si des enjeux économiques, institutionnels ou non, sont identifiés voire démontrables ou quantifiés, il est aujourd'hui irréaliste que l'initiative privée puisse autofinancer un programme hyperspectral spatial. Du côté de la défense, un Programme (au sens strict d'un programme opérationnel d'armement) est difficilement envisageable avant la bosse budgétaire des systèmes spatiaux déjà en voie d'être programmés (MUSIS et autres). L'autre possibilité est le cadre des études amont (PEA).

Au-delà du cadre national, deux cadres de coopération multinationale ou européenne sont naturels :

- Dans le cadre de MUSIS : suite aux études du stade de préparation, la composante hyperspectrale n'est pas retenue dans le périmètre de la FCME<sup>9</sup>, le besoin demeure.
- L'ESA dans le domaine civil, voire dual, avec dans ce cas un support EDA pour formuler des besoins militaires que l'ESA pourrait prendre en compte.

La participation française à une coopération bilatérale, éventuellement non-européenne, est un scénario alternatif à considérer le cas échéant, si elle offre une opportunité de retour en valeur ajoutée, et un

cadre budgétaire, calendaire et politique adéquat et crédible.

#### Positionnement technique

L'imagerie hyperspectrale se caractérise d'emblée par sa polyvalence thématique et par la très grande quantité d'information qu'elle fournit. Si les signaux mesurés sont tellement variés, c'est que le système Terre est complexe. L'observation de la Terre connaît une tendance forte vers l'étude de situations compliquées, tant dans ses composantes civiles que défense ; il s'agit de domestiquer la complexité qui naît d'une volonté d'être robuste. La pluridisciplinarité d'une mission (voire la dualité) serait un point fort, les besoins importants en télémétrie pouvant aujourd'hui être pris en compte grâce aux avancées réalisées dans le domaine de la compression notamment (voir section 2.1.6 et 2.3). Pour cela, la communauté hyperspectrale nationale dispose d'un spectre exhaustif et reconnu de compétences dans les nombreux domaines liés à l'imagerie hyperspectrale (thèmes scientifiques et de défense variés, capacités technologiques) qu'elle a su fédérer, notamment via les groupes mis en place par la défense et par le CNES. La production scientifique illustre bien ce positionnement de haut niveau de la communauté ; le principal indicateur de performance bibliométrique place ainsi la France en troisième position devant l'Allemagne et le Japon, deux pays qui développent des capacités hyperspectrales spatiales (EnMAP et Hyper-X) et derrière les Etats-Unis et l'Italie qui développent les projets HypSIRI et PRISMA.

<sup>9</sup> FCME : Fiche de Caractéristiques MilitairEs

## Eléments d'Analyse

Pays	USA	Italie	France	Allemagne	Angleterre	Japon
<b>Publications</b>	526	53	35	30	27	20

*Tableau 6 – Publications en télédétection hyperspectrale, période 1998–2008. Domination forte des Etats-Unis ; la France est bien positionnée par rapport aux pays engagés dans des missions spatiales.*

*Source : ISI Web of Knowledge.*

### Maturité des thèmes

Plusieurs thèmes montrent une maturité importante : défense, végétation, littoral, et géosciences. Les fonctions supports transverses (correction atmosphérique, traitement du signal et de l'image) sont bien prises en compte. L'analyse de l'atmosphère

et, dans une moindre mesure, l'urbain, nécessitent des performances spécifiques qui ne pourront pas être aisément prises en compte par une mission spatiale.

Le tableau ci-dessous fournit une synthèse des besoins exprimés par les utilisateurs ; les caractéristiques des missions programmées sont fournies en annexe 4.1.

Thème	Aspects spectraux	Aspects géométriques	Aspects temporels	Commentaires
<b>Géosciences / sciences de la Terre solide</b>	(0,4-2,5 $\mu$ m) Résolution < 10nm IR thermique intéressant	10m < 10m pour agronomie champs larges	Peu critique	SNR > 100 dans le SWIR
<b>Ecosystèmes côtiers et lacustres</b>	Visible (0,4-1 $\mu$ m) (0,4-2,5 $\mu$ m) pour les sédiments Résolution < 10nm pour les sédiments	Variable, de THR jusqu'à 10m	Critique pour le suivi de la qualité des eaux et de l'estran, particulièrement dans les mers à marée	SNR > 400
<b>Végétation</b>	(0,4-2,5 $\mu$ m) Résolution < 10nm sauf pour fluorescence < 0,5nm	THR utile	Critique en période de croissance des plantes (cultures), variable pour les écosystèmes naturels	SNR = 1000
<b>Urbain</b>	(0,4-2,5 $\mu$ m) Résolution < 10nm IR thermique 1 bande	THR utile voir indispensable	Peu critique sauf pour gestion de crise	
<b>Atmosphère</b>	Très haute résolution spectrale IR thermique intéressant	Grands champs (observation régionale ou globale)	Variable jusqu'à l'observation permanente	
<b>Défense : concept 1<sup>ère</sup> capacité (thèmes traficabilité et ciblage)</b>	Nombre de bandes discrètes : classe 15 entre 400 et 1000 nm, classe 15 entre 1800 nm et 2500nm. Résolution spectrale : classe 10 nm entre 400 et 2500 nm	Champ : 20 km x 20 km Pas au sol : classe 10 m entre 400 et 2500 nm.	Temps de revisite : 60 h Nombre maximal de zones imagées entre deux transmissions sol : 12	SNR : classe 250 entre 400 et 1000 nm, classe 100 entre 1000 et 2500 nm.
<b>Défense : concept capacité nominale (thèmes traficabilité et ciblage)</b>	Nombre de bandes discrètes : classe 25 entre 400 et 1000 nm, classe 40 entre 1000 nm et 2500nm, classe 10 entre 8000 et 12 000 nm. Résolution spectrale : classe 10 nm entre 400 et 2500 nm, classe 170 nm entre 8000 et 12 000 nm.	Champ : 20 km x 20 km Pas au sol : classe 5 m entre 400 et 1000 nm, classe 10 m entre 1000 et 2500 nm, classe 100 m entre 8000 et 12 000 nm.	Temps de revisite : 24 h Nombre maximal de zones imagées entre deux transmissions sol : 8	SNR : classe 250 entre 400 et 1000 nm, classe 100 entre 1000 et 2500 nm, classe 100 entre 8000 et 12 000 nm.

*Tableau 7 – Tableau de synthèse des besoins technologiques par thème.*

### Aspects technologiques

La bande spectrale utile est (0,4-2,5 $\mu$ m), échantillonnée avec un pas de 5 à 10nm. Cette bande est réduite à (0,4-1,0 $\mu$ m) pour les applications côtières et lacustres qui sont sûrement l'un des thèmes les plus mûrs. La superposition des besoins montre que l'ensemble de la bande est utile bien que chaque thème n'en exploite qu'une fraction (par exemple : couleur de l'eau (0,4-0,8 $\mu$ m), contenu en eau et en matière sèche de la végétation (0,9-2,5 $\mu$ m)).

La composante infrarouge thermique est intéressante pour les applications en géosciences et de défense. L'option hyperspectral infrarouge thermique s'avère nettement plus ambitieuse technologiquement. La fiche « Technologie / Industrie » suggère des pistes d'innovation dans le domaine visible / SWIR, parmi lesquelles l'amélioration des performances des capteurs MCT.

La résolution spatiale des images des missions allemande, italienne et américaine (30m pour EnMAP, 20-30m pour PRISMA, 60m pour HypsIRI) est typiquement insuffisante par rapport au besoin exprimé, qui est plutôt à 10m ou mieux, les applications en urbain nécessitant même des résolutions métriques, peut-être en dehors des capacités envisageables à moyen terme.

La faible répétitivité temporelle limite les opérations de suivi et de surveillance et pénalise en particulier les applications littorales dédiées aux mers à marée. Les capteurs proposés à ce jour (sauf peut-être HypsIRI), répondant à un cahier des charges scientifique et de démonstration, fourniront par ailleurs trop peu d'images pour valider des concepts de suivi (littoral, végétation, défense). D'un point de vue technologique, la répétitivité peut être améliorée par la multiplication des satellites (voir fiche défense) ainsi que par l'agilité de la ligne de visée bien que le dépointage doive rester souvent limité pour ne pas induire d'effets spectro-angulaire.

### Positionnement par rapport aux missions en cours

Deux missions européennes sont en phase de réalisation à l'horizon 2011, EnMAP et PRISMA, avec des caractéristiques proches

de celles d'Hyperion (résolution spatiale d'environ 30m, gamme spectrale (0,4-2,5 $\mu$ m)). D'autres projets civils et de défense sont moins avancés mais proposent des solutions plus innovantes permettant de mieux répondre aux besoins ; parmi eux, notamment, Hyper-X (Japon) qui couple un multispectral 4 bandes avec l'hyperspectral, HypsIRI (Etats-Unis, prévu pour 2013) qui couple un hyperspectral (0,4-2,5 $\mu$ m) et un multispectral infrarouge thermique (8 bandes) avec une résolution spatiale de 60m, ARTEMIS (Etats-Unis, défense) pour lequel peu d'informations techniques sont accessibles et Warfighter (Etats-Unis, défense) qui a subi un échec au lancement et qui devait fournir une résolution spatiale inférieure à 10m. Ce sont pour l'essentiel des missions de démonstration. Des concepts de marché sont à valider dans différents domaines (littoral, géologie, végétation). Le nombre d'images fournies par ces systèmes est limité (sauf peut-être pour HypsIRI).

Des innovations technologiques peuvent être envisagées dans les domaines utiles aux thématiciens qui sont principalement la résolution spatiale et la qualité radiométrique des images. L'innovation technologique doit permettre d'atteindre des variables clefs.

### Engagement de la défense

La défense française s'est beaucoup engagée dans le domaine hyperspectral ces dernières années. La réflexion a conduit à déterminer des axes mûrs en imagerie hyperspectrale (traficabilité, ciblage). La défense aura des difficultés à s'engager seule dans une mission spatiale (pas de programme hyperspectral dans la prochaine LPM<sup>10</sup>, possibilité d'études de type PEA ou ETO). Un engagement de la communauté civile et du CNES pourrait contribuer à la valorisation de l'effort produit par la défense (par exemple, une solution duale travaillant conjointement avec un système hyperspectral et un imageur de la défense serait intéressante).

---

<sup>10</sup> LPM : Loi de Programmation Militaire

## 3.2 SCENARIOS D'IMPLICATION CROISSANTE DU CNES

Nous proposons dans la liste des recommandations suivante quatre scénarios prospectifs correspondant à des niveaux croissants d'ambition et d'implication du CNES :

- pas d'engagement du CNES dans l'hyperspectral,
- soutien de base à la communauté,
- mission hyperspectrale de 1<sup>ère</sup> génération,
- mission hyperspectrale de 2<sup>nde</sup> génération.

Les trois derniers scénarios peuvent être articulés en un plan de développement progressif d'une capacité hyperspectrale opérationnelle.

Par 1<sup>ère</sup> et 2<sup>nde</sup> génération, on entend respectivement :

- celle correspondant aux missions accessibles avec les technologies actuelles (représentée par Hyperion, EnMAP, PRISMA et HypSIRI ou par un système hyperspectral dont on aura sélectionné les bandes spectrales d'intérêt en fonction des applications visées),
- et celle incluant des innovations instrumentales importantes (représentée principalement par le satellite Warfighter, voir tableau 9 en annexe 4.1).

Nous proposons ensuite des recommandations sur la base d'un calendrier.

### 3.2.1 Scénario 1 : Pas d'Engagement du CNES dans l'Hyperspectral

Le CNES pourrait envisager de ne pas s'investir dans l'hyperspectral. Outre que cette analyse serait en décalage avec les orientations prises par ses partenaires, elle présente des risques de positionnement stratégique dans le domaine de l'imagerie optique en Europe et dans le monde. La composante spectrale offre en effet dans ce domaine un potentiel d'innovation et de croissance plus important que les composantes « résolution spatiale » et « champ » qui ont déjà connu un fort

développement et sont considérés aujourd'hui à l'international comme faisant partie des axes de R&D industriels (c'est notamment le cas pour Pléiades).

Enfin, le développement d'une filière d'imagerie hyperspectrale opérationnelle où le CNES jouerait un rôle moteur et pérenne, constituerait une ré-orientation logique de ce dernier suite à la fin de son investissement lourd dans la filière Spot champ large, maintenant mature et transférée au privé ou à d'autres agences en démarrage.

### 3.2.2 Scénario 2 (Minimal) : Soutien de Base à la Communauté

Le soutien de base à la communauté comporte plusieurs volets :

- faciliter aux utilisateurs l'accès aux images et informations provenant d'autres capteurs (EnMAP, PRISMA, HypSIRI, Hyperion, *etc.*),
- financer des études civiles et de défense pour maintenir les compétences scientifiques, pour progresser vers des capacités opérationnelles (constitution de base de données spectrales, mesures en aéroporté, traitements spécifiques aux applications thématiques, études et développement de nouvelles applications, études de dimensionnement de systèmes spatiaux, amélioration des technologies, *etc.*),
- contribuer à la structuration de la communauté (par exemple par un soutien à la création d'un groupe de recherche ou autre).

Cette solution minimale permet d'approfondir l'exploitation scientifique et le niveau de traitement des données hyperspectrales, mais elle n'assure ni le développement ni le maintien au bon niveau des compétences technologiques nationales dans un domaine où les postes d'innovation technologiques sont clairement identifiés (configuration des spectromètres, performances des détecteurs, composante infrarouge notamment).

### 3.2.3 Scénario 3 : Mission Spatiale de 1<sup>ère</sup> Génération

L'implication du CNES dans une mission spatiale de première génération (à base de technologies existantes) offrirait une capacité de niveau opérationnel permettant dès l'horizon 2012 de :

- maîtriser la quantité et la qualité des images disponibles (amélioration des capacités de suivi et de répétitivité),
- valider le concept opérationnel de l'hyperspectral avec des risques technologiques minimisés (domaine spectral limité à (0,4-2,5µm)),
- positionner à moindre coût la communauté nationale (recherche, industrie, applications, *etc.*),
- mettre en œuvre rapidement des complémentarités, par exemple en utilisant conjointement un tel imageur avec un imageur civil ou de défense à haute résolution spatiale ou fonctionnant dans l'infrarouge thermique.

Cette implication pourrait se faire soit :

- par le développement d'une première capacité, et ce au niveau national, s'appuyant par exemple sur la technologie micro-satellite pour obtenir des services innovants. Dans ce cas, il est probable que la limite budgétaire conduira à utiliser au mieux les technologies disponibles, réduisant ainsi l'innovation technologique et la réponse apportée aux besoins identifiés dans les fiches thématiques du présent document,
- par le biais d'une coopération avec un pays tiers ayant déjà des développements ou un programme en cours, ce qui permettrait de partager les coûts et/ou d'obtenir un premier niveau de performance plus ambitieux.

L'inconvénient majeur est de positionner le CNES en suiveur des pays innovants et de mobiliser les moyens pour une mission de 1<sup>ère</sup> génération en réponse à des besoins limités.

L'avantage est de bénéficier rapidement et à moindre coût d'un premier niveau de service à l'aide d'une composante

hyperspectrale accessible grâce à des compromis sur les spécifications (nombre de bandes spectrales et résolution spatiale) et des risques réduits.

### 3.2.4 Scénario 4 : Mission Spatiale de 2<sup>nde</sup> Génération

Ce scénario repositionne le CNES par le développement d'un programme de 2<sup>nde</sup> génération, de performances nettement plus ambitieuses que les systèmes actuels ou en développement (Hyperion, EnMAP, PRISMA, HypSIRI), correspondant pleinement aux besoins des utilisateurs thématiques.

Compte tenu de l'ambition et du budget nécessaire, ce programme serait développé :

- soit en coopération avec les pays déjà impliqués (Allemagne, Italie, Etats-Unis) et désireux de poursuivre,
- soit en coopération avec ceux (Belgique) au stade de la déclaration d'intérêt,
- avec tout autre pays tiers avec lequel une coopération aurait déjà été lancée (continuité).

L'objectif serait ici de développer, pour l'horizon 2015-2020, donc en bénéficiant d'un premier retour des missions de démonstration déjà prévues ailleurs, des capacités réellement opérationnelles pour la science, la défense et les exploitations commerciales, entrant ainsi réellement dans la phase totalement opérationnelle de cette nouvelle filière d'imagerie hyperspectrale.

Les technologies nouvelles à pré-développer concerneraient essentiellement :

- le spectromètre, le détecteur, la voie infrarouge,
- la synergie multi-instruments : exploitation combinée de l'hyperspectral et d'autres capteurs (panchromatique, multispectral, infrarouge, radar),
- la capacité d'acquisition, répétitivité accrue, *etc.*

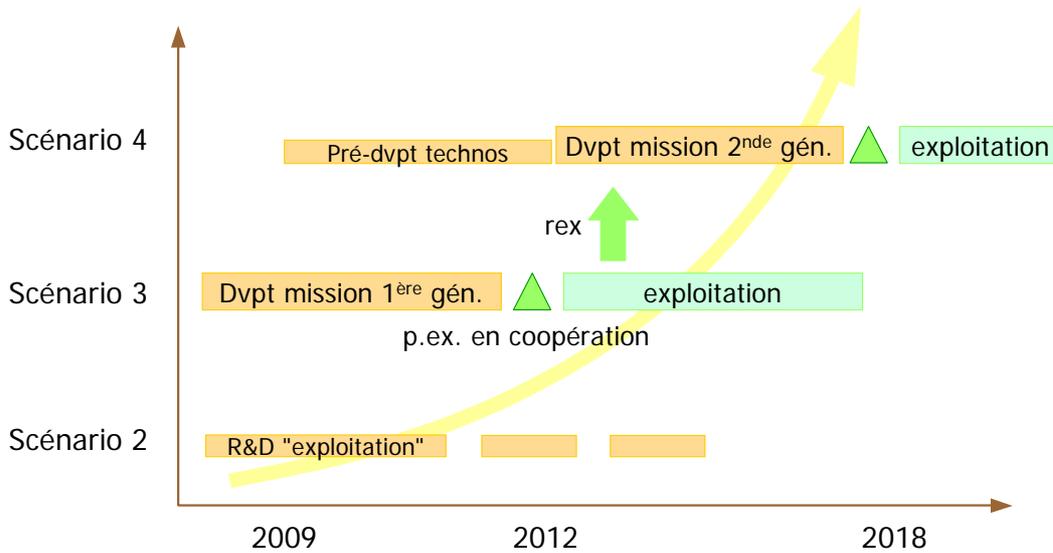
Ce scénario (voir figure 5) peut se combiner en tout ou partie avec le scénario 2 ou/et le scénario 3. Par exemple, un scénario « 2+4 » consisterait à initier en parallèle :

## Scénarios d'Implication Croissante du CNES

- la recherche immédiate de nouvelles applications (pour la défense en particulier) à partir des données disponibles et d'expérimentations thématiques le cas échéant,
- le développement immédiat de capacités d'exploitation thématique, utilisant des images de systèmes tiers,
- le pré-développement, en conséquence, des technologies nécessaires au système opérationnel de 2015-2020,
- la finalisation des spécifications de qualité image (bandes spectrales, etc.) d'ici 3-4 ans sur la base d'expérimentations thématiques et de recherches de nouvelles applications à l'aide des données disponibles.

et de mener ensuite :

- les études de définition de systèmes opérationnels après mises à jour des besoins,



*Figure 5 – Stratégie combinant plusieurs scénarios pour aboutir à une filière hyperspectrale opérationnelle à l'horizon 2015-2020.*

## 4 Annexes

### 4.1 LES CAPTEURS HYPERSPECTRAUX

Senseur (agence / compagnie)	Nombre de bandes	Domaine spectral (nm)	Largeur de bande à mi-hauteur (nm)	IFOV (mrad)	FOV (°)	Période d'utilisation	Applications
AAHIS / LASH (NRL, USA)	144	432-832	3	1,8	40	1994	Défense : bathymétrie, détection de mines, détection de pollution
AHI	32	7300 – 11500	14 cm <sup>-1</sup>	0,9x2	7	1996	Défense
AHS (INTA)	20 1 42 7 10	430 – 1030 1550 – 1750 994 – 2540 300 – 5400 8200 – 12700	30 200 13 300 400	2,5	90		Applications duales, préparation mission satellite
AIRS		2000 – 12000	1, 2, 4, 8, 16 cm <sup>-1</sup>	1 à 3	(1 à 3) x (8x8 pixels)		Défense
AIS (NASA/JPL)	128	800-1600 1200-2400	80 – 200	2,05	7,3	1982	Minéraux, végétation, roches
AISA Eagle Hawk LWIR L120M	340 254 42	400 – 970 970 – 2450 8000 – 12000	2,9 8,5 96	0,029 – 0,060° 0,054° – 0,111° 0,063°	29,9 – 62,1 17,8 – 35,5 24		Applications civiles, analyse chimique, détection de gaz
APEX	313 – 500	400 – 2500	1000 – 277	0,5	28	2008	Applications civiles, préparation mission spatiale
ARES	128 30	400 – 2500 8000 – 12000	30 – 125 64 – 100	2	65	2008	Applications civiles, préparation mission spatiale
ASAS (NASA/GSFC)	62	400 – 1060	11,5	0,80	25	1992	Luminances directionnelles des surfaces, validation des algorithmes utilisant des visées obliques
AVIRIS (JPL)	224	380 – 2500	9,7 – 12,0	1	30	1989	Ecologie, neige, océanographie, géologie, hydrologie, atmosphère
CASI (Itres Research)	288	430 – 870	1,8	0,3 – 2,4	40	1990	Applications générales en télédétection
CIS (Chine)	64 24 1 2	400 – 1040 2000 – 2480 3530 – 3940 10500 – 12500	10 20 410 1000	1,2 x 3,6 1,2 x 1,8 1,2 x 1,2 1,2 x 1,2	80	1994	Applications générales en télédétection, préparation d'instruments satellitaires futurs
CHRIS (SAIC)	40	430 – 860	11	0,05	10	1994	Applications générales en télédétection, surveillance de la pollution en mer, environnement, végétation
DAIS-7915 (GER/DLR/CE)	32 8 32 1	400 – 1000 1500 – 1800 2000 – 2500 3000 – 5000	15 – 30 45 20 2µm	3,3	+/- 26	1994	Géologie, écologie terrestre et marine, environnement

## Les Capteurs Hyperspectraux

	6	8000 – 12600	0,9µm				
Scanner GER-63 (GER)	24 4 29 6	400 – 1000 1500 – 2000 2000 – 2500 8000 – 12500	25 125 17,2 750	2,5 – 3,3 ou 4,5	90	1986	
HIRIS (LLNL / LANL)		1 – 14 µm	1cm <sup>-1</sup>			1999	Défense (détection de mines et de gaz)
HYDICE (NLR/SITAC)	206	400 – 2500	7,6 – 14,9	0,5	8,94	1994	Agriculture, forêt, environnement, gestion des ressources, cartographie, gestion des désastres
HYMAP	128	400 – 2500	30 – 125	2	65	1994	Applications civiles
HYSPEX	160 160 256	400 – 1000 1000 – 1700 1300 – 2500	4,5 6 6	0,185 0,75 0,75	17 14 14	2006	Applications générales en télédétection
ISM (DESPA/IAS/OPS)	64 64	800 – 1600 1600 – 3200	12,5 25,0	3,3 x 11,7	40 (sélection)	1991	Géologie, nuages, glace, neige, végétation
MAIS (SITP/China)	32 32 7	440 – 1080 1500 – 2500 7800 – 11800	20 30 400 – 800	1,5 – 3 4,5 3	90°	1991	Applications générales en télédétection, surveillance de la pollution
MIVIS (Daedalus)	20 8 64 10	433 – 833 1150 – 1550 2000 – 2500 8200 – 12700	20 50 8 400 – 500	2,0	70	1993	Géologie, étude de l'environnement
MUSIC (Lockheed)	90 90	2500 – 7000 6000 – 14500	25 – 70 60 – 1400	0,5	1,3	1989	Etudes de la chimie de la vapeur d'eau, des jets et des signatures spectrales
PROBE-1 (ESSI/USA)	32 32 32 32	400 – 880 880 – 1350 1350 – 1800 1940 – 2490	13 – 17 13 – 17 12 – 15 16 – 19	2	60		Géologie, végétation
ROSI (MBB/DLR/GKSS)	84	430 – 830	4 – 12	0,56	16	1993	Zones côtières, végétation
SARIS Bomem		3500 – 5000	1, 2, 4 ou 8 cm <sup>-1</sup>	1	16	> 2000	Défense (signatures de missile, explosions, flash de signalisation, etc.)
SEBASS (Aerospace Corporation)	128 + 128	2400 – 5300 7600 – 13500	40 – 60	1	7,3	1996	Défense
SFSI (CCRS / Canada)	122	1200 – 2400	10	0,4	11,7	1994	Télédétection des sols et de la végétation
SMIFTS U. of Hawai	100	1000 – 5200		0,66	9,7	1994	
TELOPS		3000 – 5500 7800 – 11600	0,25cm <sup>-1</sup>	0,35	6,3 x 5,1°	2007	Détection de gaz, détection de mines, décamouflage, signature, géologie, pollution, feu
TIRIS	64	7500 – 14000	100				Environnement, détection de gaz, battlefield
TRWIS-B TRWIS-II (TRW)	90 128	450 – 880 900 – 1800 ou 1500 – 2500	4,8 12	0,4 – 2 0,45	5 – 25 6	1991	Géologie, végétation, neige, glace, couleur de l'eau

## Les Capteurs Hyperspectraux

WAR HORSE / DARK HORSE (NRL)	64	400 – 1000	11	0,16	9,3	2000	Défense
WIS-FDU WIS-VNIR WIS-SWIR (Hughes SBRC)	64 17+67 27+45	400 – 1030 400 – 950 950 – 2500	10,3 12,5 et 6 30 et 23	1,36 0,66 1,05	10 et 15 19,1 19,1	1992 1994 1995	Végétation, géologie

*Tableau 8 – Capteurs aéroportés.*

	Résolution spatiale (m)	Domaine spectral (nm)	Résolution spectrale (nm) (nombre de bandes)	Fauchée (km)	Revisite (jour)	S/B	Thématique	Concept instrumental
MSTI-3 EU – 1996	30	600 – 860	17 (prob. 15)	7,1	1 ?	NeSR 0,001	Démonstrateur technologique militaire	Filtre wedge
HSI (Lewis) EU – 1998 Perte en orbite	30	400 – 1000 900 – 2500	5 (128) 6 (256)	7,7	7	150 75 – 200	Démonstrateur technologique	2 spectrographes à réseaux plans
LEISA/AC (Lewis, EO-1) EU – 2000	250	850 – 1600	3 – 9 (256)	185			Corrections atmosphériques	3 objectifs à filtres wedge
FTHSI (Mightysat II.1) EU – 2000	26 ou 51	500 – 1050	0,6 – 5 (512) ou 1,2 – 10 (256)	6,6 à 26,3		73	Démonstrateur technologique militaire	Spectrographe par TF statique type Sagnac
Hyperion (EO-1) EU – 2000	30	400 – 1000 950 – 2500	10 (60) 10 (160)	7,5		140 50-130	Démonstrateur technologique	2 spectrographes à réseaux convexes
Warfighter (Orbview-4) EU – 2001 Echec au lancement	8 ou 30	450 – 905 830 – 1740 1580 – 2490 3000 – 5000	11,4 (40) 11,4 (80) 11,4 (80) 25 (80)	5			Défense et commercial	2 spectrographes à réseaux
CHRIS (Proba) ESA – 2002	25 ou 50	415 – 1050	2 à 10 (37 à 118)	19		200	Démonstrateur technologique	Spectrographe à prismes
MERIS (Envisat) ASE – 2002	300 – 1200	390 – 1040 (15 bandes programmables)	1,25 (520)	5 x 230	3		Couleur de l'océan, surfaces continentales	Spectrographe à réseau concave
MSMI (ZASat 2) Af. Sud	15	440 – 990 940 – 2350	10 (200)	15	5		Environnement, agriculture	2 spectrographes à prismes
ARTEMIS (TacSat-3)		400 – 2500	5 (420)				Démonstrateur technologique	Spectrographe à réseau

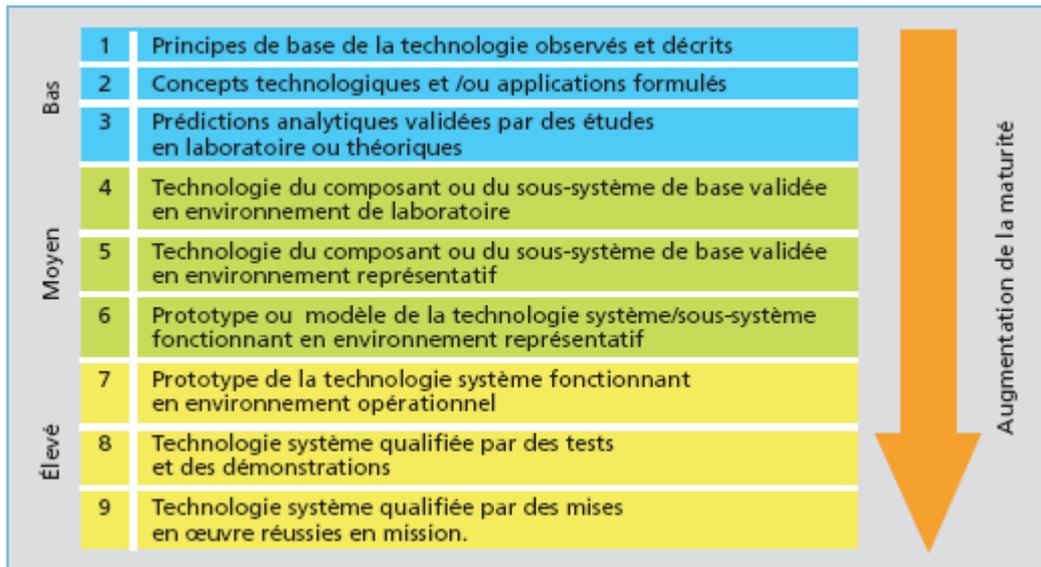
## Les Capteurs Hyperspectraux

EU – 2008							militaire	convexe
EnMAP All – 2011	30	420 – 1000 900 – 2450	5 (115) 10 (155)	30	4	500 150	Environnement, géologie	2 spectrographes à prismes
PRISMA It. – 2011	20 – 30	400 – 1000 1000 – 2500	10 (prob. 210)	40		200 130		2 spectrographes à prismes
Hyper-X Japon	15  5	400 – 2500  400 – 900	10 – 12 (185)  (>4)	15  90		200  200		
HypIRI EU – 2013	60 60	380 – 2500 3 – 5 µm 7 – 12 µm	10 84 (1) 400 (7)	150 600 600	19 (3j) 5 5	400 (réflectance 0,25)  NEdT < 0,2K	Terre globale et eaux côtières et lacustres	Proche Hyperion (VIS-SWIR)  Proche ASTER et MODIS (TIR)

*Tableau 9 – Capteurs et projets spatiaux.*

## 4.2 TECHNOLOGY READINESS LEVEL (ECHELLE TRL)

L'échelle TRL<sup>11</sup> (*Technology Readiness Level*) est un système de mesure développé par la NASA permettant de mesurer la maturité d'une technologie. Ce système est détaillé ci-dessous et utilisé dans la présente étude pour évaluer la maturité des différentes thématiques.



---

<sup>11</sup> Mankins, John C., (6 April 1995), Technology Readiness Levels: A White Paper, NASA, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office



## 5 Bibliographie thématique

### 5.1 LA VEGETATION

- Blackburn G.A. (2007), "Hyperspectral remote sensing of plant pigments," *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, pp. 855-867.
- Cheng Y.B., Zarco-Tejada P.J., Riaño D., Rueda C.A. and Ustin S.L. (2006), "Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes," *Remote Sensing of Environment*, vol. 105, pp. 354-366.
- Dash J. and Curran P.J. (2004), "The MERIS terrestrial chlorophyll index," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, pp. 5403-5413.
- Gamon J.A., Penuelas J. and Field C.B. (1992), "A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency," *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, pp. 35-44.
- Gitelson A.A., Keydan G.P. and Merzlyak M.N. (2006), "Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves," *Geophysical Research Letters*, vol. 33, pp. 1-5.
- Goetz A.F.H., Vane G., Solomon J.E. and Rock B.N. (1985), "Imaging spectrometry for Earth remote sensing," *Science*, vol. 228, pp. 1147-1153.
- Huang Z., Turner B.J., Dury S.J., Wallis I.R., Foley W.J. (2004), "Estimating foliage nitrogen concentration from Hymap data using continuum removal analysis," *Remote Sensing of Environment*, vol. 93, pp. 18-29.
- Le Maire G., François C. and Dufrêne E. (2004), "Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements," *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, pp. 1-28.
- Miller J., Berger M., Goulas Y., Jacquemoud S., Louis J., Mohammed G., Moise N., Moreno J., Moya I., Pedrós R., Verhoef W. and Zarco-Tejada P.J. (2005), "Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model," *European Space Agency*, 138 pp.
- Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. and Nemani R.R. (1997), "Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991," *Nature*, vol. 386, pp. 698-702.
- Nagler P.L., Inoue Y., Glenn E.P., Russ A.L. and Daughtry, C.S.T. (2003), "Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes," *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, pp. 310-325.
- Vane G. and Goetz A.F.H. (1988), "Terrestrial imaging spectroscopy," *Remote Sensing of Environment*, vol. 24, pp. 1-29.
- Wessman C.A., Aber J.D., Peterson D.L. and Melillo J.M. (1988), "Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystems," *Nature*, vol. 335, pp. 154-156.
- Zarco-Tejada P.J., Miller J.R., Morales A., Berjona A. and Agüerad J. (2004), "Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops," *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, pp. 463-476.

## La Vegetation

## 5.2 LES ECOSYSTEMES COTIERS ET LACUSTRES

- Adler-Golden S.M., Acharya P.K., Berka A., Matthew M.W., Gorodetzky D. (2005), "Remote Bathymetry of the Littoral Zone From AVIRIS, LASH, and Quickbird Imagery," *IEEE Trans. Geosci. and Rem. Sens.*, vol. 43, n°2, pp. 337-347.
- Antoine D. (1998), "Apport de la télédétection spatiale, de la couleur de l'océan à l'Océanographie," *Oceanis*, vol. 24, n°2, pp. 81-150.
- Babin M., Stramski D., Ferrari G.M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N. (2003), "Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, non algal particles and dissolved organic matter in coastal waters around Europe," *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, n°C7, pp. 3211.
- Bajjouk T., Guillaumont B., Populus J. (1996), "Application of airborne imaging spectrometry system data to intertidal seaweed classification and mapping, *Hydrobiologia*," vol. 326-327, n°1, pp. 463-471.
- Binding C.E., Bowers D.G. and Mitchekson-Jacob E.G. (2005), "Estimating suspended sediment concentration from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties," *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, pp. 373-383.
- Bricaud A., Morel A., Prieur L. (1981), "Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domain," *Limnology and Oceanography*, vol. 26, n°1, pp. 45-53.
- Bricaud A., Stramski D. (1990), "Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non algal biogenous matter. A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso sea," *Limnology and Oceanography*, vol. 35, n°3, pp. 562-582.
- Brace B.K., "Shallow water bathymetry from hyperspectral imagery: a procedure for the Australian hydrographic service," 12p., [www.coastgis.org/cgis06/Papers/Brace.pdf](http://www.coastgis.org/cgis06/Papers/Brace.pdf)
- Carrere V. (2002), "Mapping spatial distribution of chlorophyll as an estimation of microphytobenthic biomass and possible sediment erodability in the intertidal zone using hyperspectral airborne and field data," Séminaire Imagerie Hyperspectrale, DGA, Arcueil, 21 juin 2002.
- Cipollini P., Corsini G. (1995), "Ocean colour analysis by hyperspectral MIVIS radiometer: model-derived algorithms," *Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, vol. 3, pp. 10-14, July 1995.
- Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S.J. and Castaing P. (2002), "Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter," *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, pp. 149-161.
- Doxaran D., Froidefond J-M. and Castaing P. (2003), "Remote Sensing reflectance of turbid sediment dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects using reflectance ratio," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 2623-2634.
- Gege P. (2004), "The water colour simulator WASI: An integrating software tool for analysis and simulation of optical in-situ spectra," *Computers and Geosciences*, vol. 30, pp. 523-532.
- Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.M., Delmas D., Huret M. and Herbland A. (2005), "Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay," *Remote Sensing of Environment*, vol. 95, pp. 29-46.
- Heege T., Hausknecht P., Kobryn H. (2007), "Hyperspectral seafloor mapping and direct bathymetry calculation using HyMap data from the Ningaloo reef and Rottneest Island areas in Western Australia," *Proceedings 5<sup>th</sup> EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Bruges, Belgium, April 23-25 2007, pp. 1-8.

- Holden H. and Le Drew E. (1999), "Hyperspectral identification of coral reef features," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n°13, pp. 2545-2563.
- Hubert-Moy L., Clément B., Lennon M., Houet T., Lefeuvre E. (2003), "Etude de zones humides de fonds de vallées à partir d'images hyperspectrales CASI : Application à un bassin versant de la région de Pleine-Fougères (Bretagne, France)," *Photo-Interprétation*, n°2003/01, pp. 41-48.
- IOCCG Report Number 5 (2006), "Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms and Applications," Venetia Sturt. 122p.
- Lafon V., Froidefond J.M., Lahet F., Castaing P. (2002), "SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements," *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, pp. 136-148.
- Lennon M., Mouchot M.C., Talec P. (1999), "Etude de la pollution par les algues vertes dans la Baie de St-Michel-en-Grève à l'aide du spectrographe imageur hyperspectral CASI," *CoastGIS'99, GIS and new advances in integrated coastal management*, Brest, France, 9-11 sept. 1999.
- Lennon M., Babichenko S., Thomas N., Mariette V., Mercier G., Lisin A. (2006), "Detection and mapping of oil slicks in the sea by combined use of Hypersectral Imagery and Laser Induced Fluorescence," *EARSel eProceedings*, vol. 5, n°1, pp. 120-128.
- Meleder V., Barille L., Launeau P., Carrere V., Rince Y. (2003), "Spectrometric constraint in analysis of benthic diatom biomass using monospecific cultures," *Remote Sensing of Environment*, vol. 88, pp. 386-400.
- Minghelli-Roman A., Cauneau F., Marni S., Petit M. (2003), "From hyperspectral satellite images to decision processes: a user-oriented approach," *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, vol. 4, pp. 2386-2388, 21-25 July 2003.
- Morel A. and Maritorena S. (2001), "Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal," *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, pp. 7163-7180.
- Ouillon S. and Petrenko A.A. (2005), "Above-water measurements of reflectance and chlorophyll-a algorithms in the Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea," *Optic Express*, vol. 13, n°7, pp. 2531-2548.
- Pinnel N. (2007), "A method for mapping submerged macrophytes in lakes using hyperspectral remote sensing," PhD thesis, Technical University Munich, pp. 191.
- Salem F. and Kafatos M. (2001), "Hyperspectral image analysis for oil spill mitigation," *22<sup>nd</sup> Asian Conference on remote sensing*, 6p., 5-9 nov. 2001, Singapore.
- Sandidge J.C. and Holyer R.J. (1998), "Coastal bathymetry from Hyperspectral observations of water radiances," *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, n°3, pp. 341-352.

### **5.3 LES GEOSCIENCES – SCIENCES DE LA TERRE SOLIDE**

- Ben-Dor E., Irons J.A. and EPEMA A. (1999), "Soil Spectroscopy. In: Manual of Remote Sensing," Third Edition, A. Rencz (ed.) J. Wiley & Sons, Inc., New York, pp.111-188.
- Ben-Dor E., Goldshleger N., Benyamini Y., Agassi M. and Blumberg D. (2002), "Soil crusting and infiltration processes as monitored by soil reflectance spectroscopy in the SWIR region," *Remote Sensing of Environment*, vol. 23, pp. 3909-3920.
- Ben-Dor E., Taylor G.R., Hill J., Dematté J.A.M., Whiting M.L., Chabrillat S. and Sommer S. (2008), "Imaging spectrometry for soil applications," *Advances in Agronomy Journal*, vol. 97, pp. 321-392.
- Carrère V. and Abrams M.J. (1988), "An Assesment of AVIRIS Data for Hydrothermal Operation Mapping in the Goldfield Mining District, Nevada," *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication 88-38, pp. 134-154.
- Chabrillat S., Goetz A.F.H., Krosley L. and Olsen H.W (2002), "Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution," *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, pp. 431-445.
- Chabrillat S. and Goetz A.F.H. (2006), "Remote sensing of expansive soils: Use of hyperspectral methodology for clay mapping and hazard assessment," In: A. Ali Al-Rawas and M.F.A. Goosen (eds), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*, Technomic Publishing, pp. 187-209.
- Clark R.N., Gallagher A.J. and Swayze G.A. (1990), "Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra," *Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*, JPL Publication 90-54, pp. 176-186.
- Clark R.N. (1999), "Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy," in *Manual of Remote Sensing*, A.N. Rencz (Ed), John Wiley, New York, pp.3-58.
- Clark R.N., Swayze G.A., Livo K.E., Kokaly R.F., Sutley S.J., Dalton J.B., McDougal R.R. and Gent C.A. (2003), "Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems," *J. Geoph. Res.*, vol. 108, n°E12, 5131, doi:10.1029/2002JE001847, pp. 5-1 to 5-44.
- Cudahy T., Caccetta M., Wells M. and Skwarnecki M. (2006a), "Mapping alteration through the regolith at Kalgoorlie using airborne hyperspectral data," AESC 2006, Melbourne, Australia.
- Cudahy T., Hewson R., Barnes S. and Groenewald B. (2006b), "Mapping non-magnetic, talc-bearing ultramafic rocks in the Kalgoorlie region using airborne hyperspectral data," AESC 2006, Melbourne, Australia.
- Dehaan R. and Taylor G.R. (2003), "Image-derived spectral endmembers as indicators of salinity," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 775-794.
- Dematté J.A.M., Dematté J.L.I., Camargo W.P., Fiorio P.R. and Nanni M.R. (2001), "Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences," *Mapping Sciences and Remote Sensing*, vol. 38, n°2, pp. 79-102.
- Ellis J.M., Davis H.H. and Quinn M.B. (2000), "Airborne hyperspectral imagery for the petroleum industry," *Proceedings 14<sup>th</sup> International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, Las Vegas, Nevada, 6-8 November 2000.
- Ellis J.M., Davis H.H. and Zamudio J.A. (2001), "Exploring for onshore oil seeps with Hyperspectral imaging," *Oil and Gas Journal*, vol. 99, n°37, pp. 49-58.

- Gingerich J.C., Peshko M. and Matthews L.W. (2002), "The development of new exploration technologies at Noranda: Seeing more with hyperspectral and deeper with 3-D seismic," *Bull. CIM*, vol. 95, n°1058, pp. 56-61.
- Goetz A.F.H. and Srivastava V. (1985), "Mineralogical mapping in the Cuprite Mining district, Nevada," *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Airborne Imaging Spectrometer (AIS) Data Analysis Workshop*, JPL Publication 85-41, pp. 22-31.
- Goetz A.F.H., Chabrilat S. and Lu Z. (2001), "Field reflectance spectrometry for detection of swelling clays at construction sites," *Field Analytical Chemistry and Technology*, vol. 5, n°3, pp. 143-155.
- Hackwell J.A., Warren D.W., Bongiovi R.P., Hansel S.J., Hayhurst T.L., Mabry D.J., Sivjee M.G. and Skinner J.W. (1996), "LWIR/MWIR imaging Hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing," *SPIE*, vol. 2819, pp. 102-107.
- Hunt G.R. (1977), "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared," *Geophysics*, vol. 42, pp. 501-513.
- Keeling J., Mauger A., Stamoulis V. and Morris B. (2005), "Role for airborne Hyperspectral surveys in the search for diamonds in the Flinders Ranges," *MESA Journal*, vol. 39, pp. 30-33.
- Lagacherie P., Baret F., Feret J.B., Madeira Netto J. and Robbez-Masson J.M. (2008), "Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements," *Remote Sensing of Environment*, in press.
- Montero I.C., Brimhall G.H., Alpers C.N. and Swayze G.A. (2005), "Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping," *Chemical Geology*, vol. 215, pp. 453-472.
- Mustard J.F. and Pieters C.M. (1987), "Abundance and distribution of ultramafic microbreccia in Moses Rock Dike: quantitative application of mapping spectroscopy," *J. Geoph. Res.*, vol. 92, n°B10, pp. 10376-10390.
- Okin G.S. and Painter T.H. (2004), "Effect of grain size on remotely sensed spectral reflectance of sandy desert surfaces," *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, pp. 272-280.
- Ong C. and Cudahy T. (2002), "Deriving quantitative monitoring data related to acid drainage using multitemporal hyperspectral data," *Proceedings of the 2002 Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*.
- Palacios-Orueta A. and Ustin S.L. (1998), "Remote sensing of soil properties in the Santa Monica mountains: I. Spectral analysis," *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, pp. 170-183.
- Richter N., Jarmer T., Chabrilat S., Kaufmann H. and Hostert P. (2008), "Spectroscopic determination of free iron oxides using linear regression analysis," *Soil Science Society of America Journal*, in revision.
- Stevens A, Van Wesemael B., Vandenschrick G., Touré S. and Tychon B. (2006), "Detection of Carbon Stock Change in Agricultural Soils Using Spectroscopic Techniques," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, pp. 844-850.
- Swayze G.A., Smith K.S., Clark R.N., Sutley S.J., Pearson R.M., Vance J.S., Hageman P.L., Briggs P.H., Meier A.L., Singleton M.J. and Roth S. (2000), "Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste," *Environmental Science and Technology*, vol. 34, pp. 47-54.
- Vaughan R.G., Calvin W.M. and Taranik J.V. (2003), "SEBASS Hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping," *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, pp. 48-63.

Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M. and Taranik J.V. (2005), “Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 99, pp. 140-158.

Whiting M.L., Lin L. and Ustin S.L (2004), “Predicting water content using Gaussian model on soil spectra,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, pp. 535-552.



## 5.4 L'URBAIN

- Ben Dor E., Kindel B. and Goetz A.F.H. (2004), "A method to estimate aerosol load on a pixel by pixel basis using airborne hyperspectral sensors: A case study over Santa Monica LA," *Proceedings of AVIRIS workshop 2004*, Pasadena 19-23, 2004.
- Bennett J.H. and Hill A.C. (1973), "Absorption of gaseous air pollutants by a standardized plant canopy," *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 23, pp. 203-206.
- Evans J.R. (2007), "A verification of optical depth retrieval from high resolution satellite imagery," PhD thesis, March 2007.
- Freer-Smith P.H., Holloway S. and Goodman A. (1997), "The uptake of particulates by an urban woodland: Site description and particulate composition," *Environmental Pollution*, vol. 95, pp. 27-35.
- Givoni B. (1991), "Impact of planted areas on urban environmental quality: A review," *Atmospheric Environment*, vol. 25B, pp. 289-299.
- Gomez F., Gil L. and Jabaloyes J. (2004), "Experimental investigation on the thermal comfort in the city: relationship with the green areas, interaction with the urban microclimate," *Building and Environment*, vol. 39, pp. 1077-1086.
- Gratani L. and Varone L. (2006), "Carbon sequestration by *Quercus ilex* L. and *Quercus pubescens* Willd. and their contribution to decreasing air temperature in Rome," *Urban Ecosystems*, vol. 9, pp. 27-37.
- Gross B., Ogunwuyi O., Moshary F., Ahmed S., Cairns B. (2004), "Aerosol retrieval over urban areas using spatial regression between V/NIR and MIR Hyperion channels," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5547, pp. 111-121.
- Gulyas A., Unger J. and Matzarakis A. (2006), "Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements," *Building and Environment*, vol. 41, pp. 1713-1722.
- Hill A.C. (1971), "Vegetation: a sink for atmospheric pollutants," *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 21, pp. 341-346.
- Nowak D.J. and Crane D.E. (2002), "Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA," *Environmental Pollution*, vol. 116, pp. 381-389.
- Ould-Dada Z. and Baghini N.M. (2001), "Resuspension of small particles from tree surfaces," *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 3799-3809.
- Thönnessen M. (2002), *Elementdynamik in Fassadenbegrünendem Wein (Parthenocissus tricuspidata) – Nährelemente, anorganische Schadstoffe, Platin-Gruppen-Elemente, Filterleistung, immissionshistorische Aspekte, Methodische Neu- & Weiterentwicklungen. Kölner Geographische Arbeiten 78*, 136 pages.
- Wania A. (2008), "Urban vegetation: detection and function evaluation for air quality assessment," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, <http://eprints-scd-ulp.u-strasbg.fr:8080/913/>, 267 pages.
- Weng Q., Hu X. and Lu D. (2008), "Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery: a comparison," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n°11, pp. 3209-3232.
- Winter M.E., Winter E.M., Beaven S.G. and Ratkowski A.J. (2007), "Hyperspectral image sharpening using multispectral data," *Proc. of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT CD-ROM (2007).

## L'Urbain

## 5.5 L'ATMOSPHERE

- Alakian A., Marion R. and Briottet X. (2006), "Hyperspectral Remote Sensing of Biomass Burning Aerosol Plumes: Sensitivity to Optical Properties Modeling," *SPIE Remote Sensing Europe*, Stockholm, September 2006.
- Alakian A., Marion R. and Briottet X. (2007a), "Radiative Modeling and Characterization of Aerosol Plumes in Hyperspectral Imagery," in *Proc. 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Bruges, Belgium, 23-25 April 2007.
- Alakian A., Marion R. and Briottet X. (2007b), "Radiative modeling and characterization of aerosol plumes in hyperspectral imagery," *IGARRS 2007*, Barcelona, July 2007.
- Alakian A., Marion R. and Briottet X. (2008), "Hyperspectral remote sensing of aerosol plumes: a semianalytical model," *Applied Optics*, vol. 47, n°11, pp. 1851-1866.
- Marion R., Michel R. and Faye C. (2004), "Measuring Trace Gases in Plumes from Hyperspectral Remotely Sensed Data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 42, n°4, pp. 854-864.
- Marion R., Michel R. and Faye C. (2006), "Atmospheric Correction of Hyperspectral Data Over Dark Surfaces via Simulated Annealing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 44, n°6, pp. 1566-1574.

## L'Atmosphere

## 5.6 LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'IMAGE

- Achard V., Landrevie A. and Fort J.C. (2004), "Anomalies detection in hyperspectral imagery using projection pursuit algorithm," *SPIE Int. Sym. Remote Sensing*, Maspalomas, Sept. 2004.
- Achard V., Chédin A. and Poutier L. (2006), "Atmospheric correction of airborne infrared hyperspectral images using neural networks," *Proc of SPIE European remote sensing symposium*, Stockholm, Sept. 2006.
- Achard V., Lesage S. and Poutier L. (2007), "Retrieval of spectral emissivity and surface temperature from airborne infrared hyperspectral sensor, using neural network and spectral smoothness approaches," *Proc. of SPIE European remote sensing symposium*, Florence, Sept. 2007.
- Dobigeon N. and Achard V. (2005), "Performance comparison of geometric and statistical methods for endmembers extraction in hyperspectral imagery," *SPIE proc.*, Bruges, Sept. 2005.
- Kanani K., Poutier L., Nerry F. and Stoll M.-P. (2007), "Directional effects consideration to improve out-doors emissivity retrieval in the 3-13  $\mu\text{m}$  domain," *Opt. Express*, vol.15, pp. 12464-12482.
- Lachérade S., Miesch C., Boldo D., Briottet X., Le Men H. and Valorge H.C. (2006), "An inverse radiative transfer model to extract ground spectral reflectance of urban areas," *First Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Urban Remote Sensing « Challenges and Solutions »*, Mars 2006.
- Lachérade S., Miesch C., Boldo D., Briottet X., Valorge C. and Le Men H. (2008), "ICARE: A physically-based model to correct atmospheric and geometric effects from high spatial and spectral remote sensing images over 3D urban areas," accepté début 2008 dans *Meteorology and Atmospheric Physics* (numéro special Capitoul).
- Miesch C., Poutier L., Achard V., Briottet X., Lenot X. and Boucher Y. (2005), "Direct and Inverse Radiative Transfer Solutions for Visible and Near-Infrared Hyperspectral Imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 43, n°7, pp. 1552-1562.



## 6 Glossaire

3I	Improved Initialization Inversion
AAC	Autonomous Atmospheric Compensation
ACI (1)	Analyse en Composantes Indépendantes
ACI (2)	Action Concertée Incitative
ACORN	Atmospheric CORrection Now
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADM-Aeolus	Atmospheric Dynamics Mission
AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
AIS	Airborne Imaging Spectrometer
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
APEX	Airborne Prism EXperiment
ARES	Airborne Reflective Emissive Spectrometer
ARIES	Australian Resource Information and Environmental Satellite
ASD	Analytical Spectral Devices
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATCOR4	Atmospheric and Topographic Correction (version 4)
ATREM	ATmosphere REMoval program
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
BRGM	Bureau de Recherche en Géologie Minière
CAI	Cellulose Absorption Index
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CAO	Carnegie Airborne Observatory
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CDD	Charge-Coupled Device
CDOM	Coloured Dissolved Organic Matter
CELAR	Centre d'ELectronique de l'ARmement
CEVA	Centre d'Etude et de Valorisation des Algues
CIRAD	centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CISAM	Centro Italiano di Studi sull'Alto Medioevo
CMOS	Complementary Metal Oxide Semi-conductor
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales

COCHISE	COde de Correction atmosphérique Hyperspectrale d'Images de Senseurs Embarqués
COGEMA	COmpagnie GENérale des MATières nucléaires
COIS	Coastal Ocean Imaging Spectrometer
COSTEL	Climat et Occupation du Sol par TELédétection
DAIS	Digital Airborne Imaging Spectrometer
DBFE	Decision Boundary Feature Extraction
DDASS	Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
DDE	Direction Départementale de l'Équipement
DGA	Délégation Générale pour l'Armement
DIREN	DIrection Régionale de l'ENvironnement
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	DiMethyl Sulfide (sulfure de diméthyle)
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
DRIRE	Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
DRM	Direction du Renseignement Militaire
DSTL	Defence Science Technology Laboratory
EADS	European Aeronautic Defence and Space company
EDA	European Defence Agency
EDF	Electricité De France
EHR	Extra Haute Résolution
ELICO	Ecosystèmes LIttoraux et COtiers
EMA	Etat Major des Armées
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
ENSTB	Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Bretagne
ENVI	ENvironment for Visualizing Images
ENVISAT	Environmental Satellite
EPA	Environmental Protection Agency
EPOC	Environnements et Paléoenvironnements OCéaniques
ERM	Ecole Royale Militaire
ESA	European Space Agency
ETAS	Etablissement Technique d'AngerS
ETO	Etude Technico-Opérationnelle
EU	European Union
FCME	Fiche de Caractéristiques MilitairEs
FFI	Forsvarets ForskningsInstitutt (Norwegian Defence Research Establishment)

FGAN-FOM	Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften (Research Establishment for Applied Science) - Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung (Research Institute for Optronics and Pattern Recognition)
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
FLEX	Fluorescence EXplorer
FOI	Totalförsvarets Forskningsinstitut (Swedish Defence Research Agency)
FSO	Futur Système Opérationnel
FTHSI	Fourier Transform HyperSpectral Imager
GFZ	GeoForschungsZentrum
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GOSat	Greenhouse gases Observing Satellite
GSH	Groupe de Synthèse Hyperspectral
GTHS Défense	Groupe de Travail HyperSpectral Défense
HIRS	High-resolution Infrared Radiation Sounder
HSI	HyperSpectral Imager
HyBAm	Hydro-géodynamique actuelle du Bassin Amazonien
HyMap	Hyperspectral Mapper
HYPER-I-NET	HYPERSpectral Imaging NETwork
HYRESSA	HYperspectral REMote Sensing in Europe – specific Support Actions
HyspIRI	Hyperspectral InfraRed Imager
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge
ICARE	Inversion Code for urban Areas Reflectance Extraction
IDL	Interactive Data Language
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
IGCP	International Geological Correlation Programme
IMASSA	Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRT	InfraRouge Thermique
ISAC	In-Scene Atmospheric Correction
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JRC ISPRA	Joint Research Center ISPRA
KLT	Karhunen-Loeve Transform
LAI	Leaf Area Index
LASAGEC <sup>2</sup>	LABoratoire de Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier
LED	Light Emitting Diode

LEISA	Linear Etalon Imaging Spectral Array
LiDAR	Light Detection and Ranging
LMTG	Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie
LOV	Laboratoire d'Océanographie de Villefranche
LPM	Loi de Programmation Militaire
LSEET-LEPI	Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre - Laboratoire d'études des Echanges Particulaires aux interfaces
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Index
MCT	Mercury-Cadmium Telluride (Tellurure de Mercure et Cadmium HgCdTe)
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MINEO	Monitoring and assessing the environmental Impact of mining in Europe using advanced Earth Observation Techniques
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MISTERE	Moyen Infrarouge Spectrométrie de Terrain pour l'Evaluation des Réflectivités et des Emissivités
MIVIS	Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer
MNF	Minimum Noise Fraction
MODIS	MODERate resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN4	MODERate resolution atmospheric TRANsmission (version 4)
MOPITT	Measurements Of Pollution In The Troposphere
MSG	Meteosat Second Generation
MSTI	Miniature Sensor Technology Integration
MTCI	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index
MTG	Meteosat Third Generation
MUSIS	MULTinational Space-based Imaging System
MWIR	Middle Wave InfraRed
NAICA	Noise Adjusted Independent Component Analysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEMO	Naval Earth Map Observer
NRBC	Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique
OCO	Orbiting Carbon Observatory
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
ORE	Observatoires de Recherche en Environnement
PEA	Plan d'Etude Amont
PLS-regression	Partial Least Squares Regression
POLDER	POLarization and Directionality of Earth Reflectances

PPI	Pixel Purity Index
PRI	Photochemical Reflectance Index
PRISMA	PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa (Hyperspectral Precursor of the Application Mission)
PSC	Polar Stratospheric Clouds
R&D	Recherche et Développement
RDDC	Recherche et Développement pour la Défense Canada
SAIL	Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY
SEAWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SEBASS	Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIG	Système d'Informations Géographiques
SMACC	Sequential Maximum Angle Convex Cone
SNR	Signal to Noise Ratio
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SSM	Suspended Sediment Matter
STAT	Service Technique de l'Armée de Terre
STEREO	Solar TERrestrial RELations Observatory
SVAT	Surface Vegetation Atmosphere Transfer
SVM	Support Vector Machine
SWIR	Short Wave InfraRed
SYSIPHE	SYstème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés Hyperspectrales Embarqué
TCARI	Transformed Chlorophyll Absorption Index
THR	Très Haute Résolution
TIR	Thermal InfraRed
TMA	Three-Mirrors Anastigmatic
TRAQ	TRopospheric composition and Air Quality
TRL	Technology Readiness Level
ULCO	Université du Littoral Côte d'Opal
UMR	Unité Mixte de Recherche
UPPA	Université de Pau et des Pays de l'Adour
UR	Unité de Recherche
USGS	United States Geological Survey
VNIR	Visible and Near InfraRed

VULNOBS

VULNérabilité au leurrage et au camouflage des systèmes  
d'OBServation

WEAG-THALES

Western European Armament Group's THALES