

WP2.1 Caméras hyper-spectrales

Déploiement large échelle et monitoring pour l'étude du couvert de végétation et le suivi des cours d'eau

11.03.2022

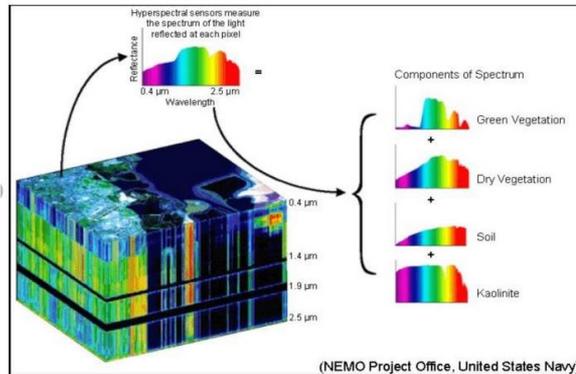
MARATHON TERRA FORMA



Le WP2.1 en bref

Imagerie hyper-spectrale :

- Acquisition par le même instrument d'images de la même scène à différentes longueur d'onde (>10)
- La mesure des propriétés optiques en tout point d'une scène permet de remonter aux caractéristiques des objets imagés et/ou du milieu de propagation de la lumière (physique, chimie)
 - Peu invasive
 - Augmentation de la couverture des mesures



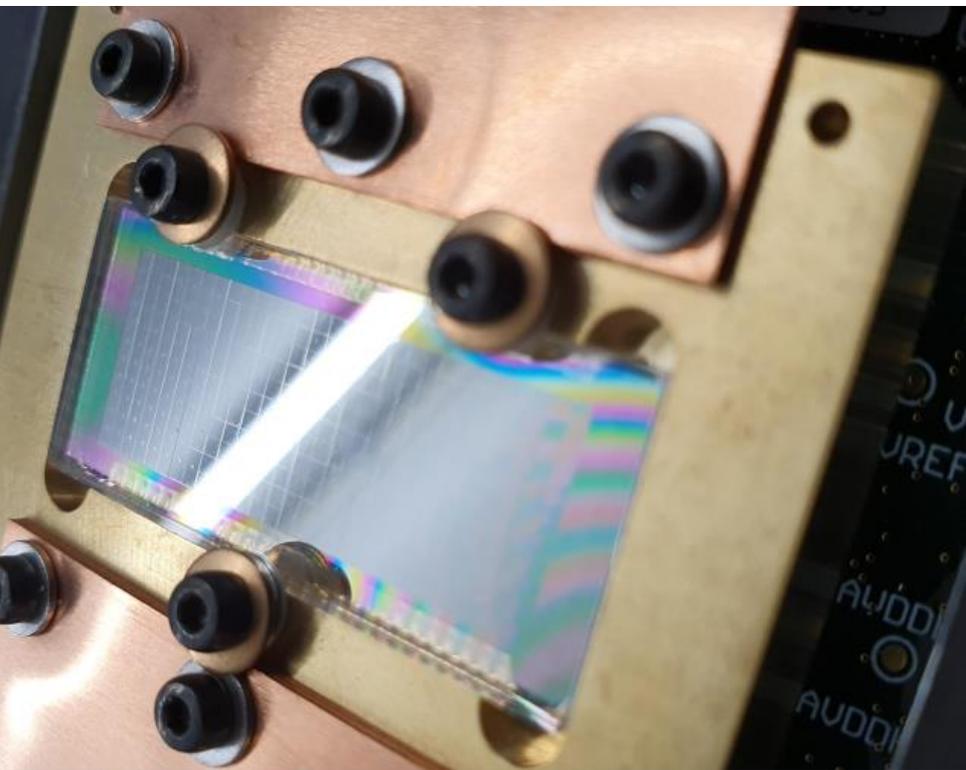
Deux volets applicatifs dans TERRA FORMA :

- Etude du couvert de végétation
- Etude des transferts hydro-sédimentaires

Challenges :

- Déploiement large échelle (20 instruments à déployer sur 10 sites d'ici la fin du projet)
- Monitoring (améliorer la connaissance de la phénologie des écosystèmes et des cours d'eau)
- Low-cost (Instruments du commerce >>50k€)
- Spécialisation des instruments (optimisation des coûts, flux de données et traitement, et miniaturisation)

- 1. Technologie – *Silvère Gousset IPAG***
- 2. Applications – *Philippe Choler LECA & Cédric Legout IGE***



Technologie

Silvère Gousset IPAG

L'imagerie hyper-spectrale à l'IPAG

IPAG, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (~100 permanents dont 60 chercheurs et 30 IT)

- Implication sur grands instruments sols (VLT, ELT - ESO)
- Implication dans missions spatiales (hors dev instru)
- Culture en développement instrumental optique, et quelques innovations en spectrométrie intégrée sur puce optique (SWIFTS, SPOC)

Silvère Gousset (IR UGA) : référant IPAG pour WP2.1

➤ ***Dimensionnement, simulation, développement, intégration, traitement des données***

Optique instrumental, physique & traitement de l'image

- Thèse ONERA (2015) en optique instrumental pour l'astronomie sol.
- Post-doctorat IPAG sur spectrométrie embarquée pour l'exploration du système solaire
- Depuis 2018 : IR IPAG, développement et mise en œuvre d'imageurs hyper-spectraux pour l'étude de l'environnement (IPAG-OSUG)



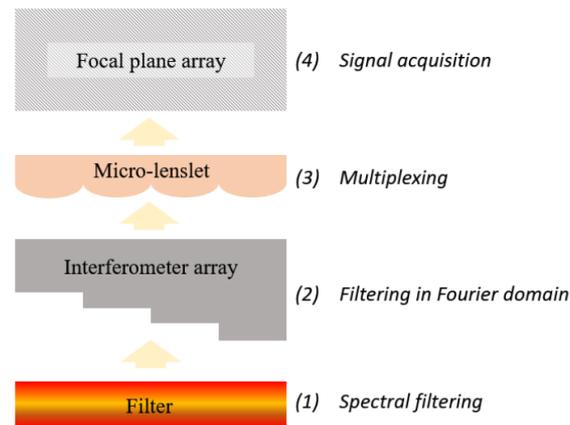
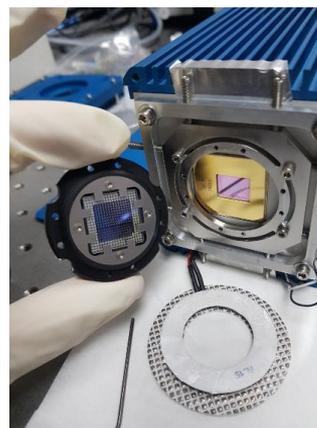
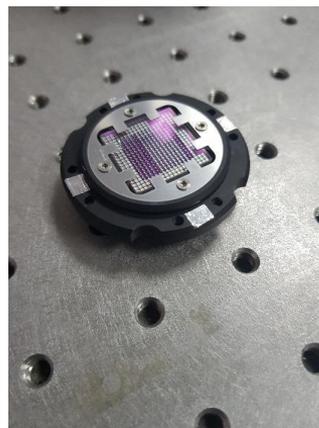
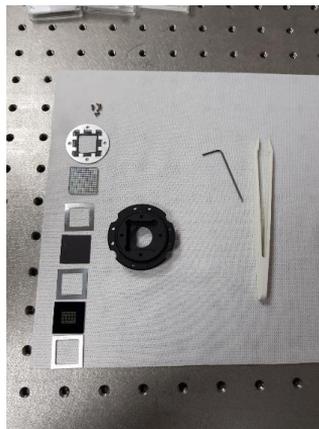
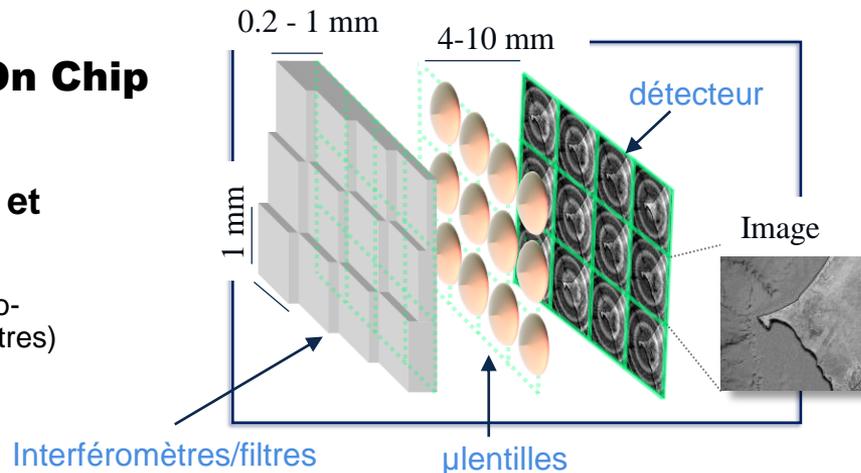
Etienne Le Coarer (IRHC-DR UGA) : Co-inventeur de la technologie du WP2.1 et auteur du brevet.

➤ ***Le cerveau et la valorisation***

ImSPOC - Imaging SPectrometer On Chip

Famille d'imageurs hyper-spectraux compacts et embarqués (Brevet UGA-ONERA 2017)

- Association d'un détecteur matriciel, d'une matrice de micro-lentilles et d'une matrice de micro-interféromètres (ou de filtres) dans un sandwich de 1-2 cm
- Concept multi-voie et snapshot
- Grande versatilité et modularité



Travaux en cours / applications

- ❖ Mesure des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre depuis l'espace (H2020 Space CARBon Observatory)
- ❖ Suivi depuis l'espace de l'activité solaire par l'observation des aurores polaires (programme D3S ESA)
- ❖ Mesure de polluants (NO_2 , O_3 , ...) dans la troposphère depuis le sol (techniques DOAS, MaxDOAS) *IGE*
- ❖ Mesure de flux de gaz à effet de serre en milieu naturel (tourbière, lac de barrage, sources géologiques) et sur sites industriels *ISTERRE, IGE, LESSEM*
- ❖ Imagerie microscopique Raman (minéralogie et biologie) *IPAG, CEA*

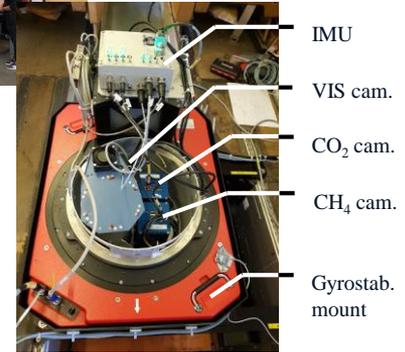


Dassault Falcon-20 SAFIRE (CNES/
MeteoFrance / CNRS)

Campagne Octobre 2020

Complémenter CO2M par 20
petits satellites low-cost

- Etude de performances
- Développement techno
- Démonstration aéroportée



Galerie de prototypes

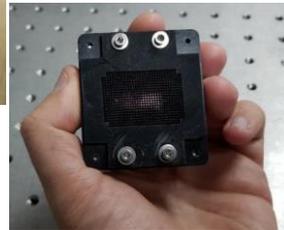
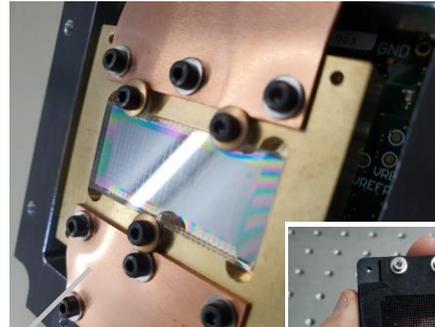


Senseur de polluants troposphériques

380-1000 nm / 100 canaux spectraux / 0.5 kg / 100x100 pixels

Pré-prototype TERRA FORMA

400-850 nm / 30 canaux spectraux / 0.5 kg / 100x100 pixels



Maquette 400-1000 nm / 40 canaux

Prototype SWIR

1200-1700 nm / 40 canaux spectraux / 0.25 kg / 64x64



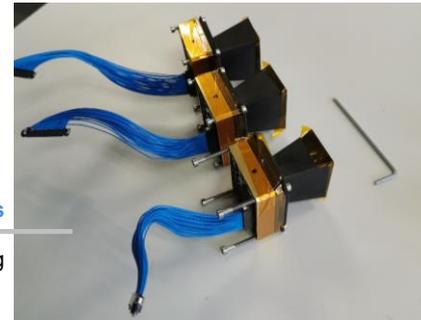
Senseurs d'aurores polaires

380-1000 nm / 200 canaux spectraux / 0.25 kg



Caméra de vol spécialisée CO₂

1609+/-3 nm / 2 kg / 64x64 pixels



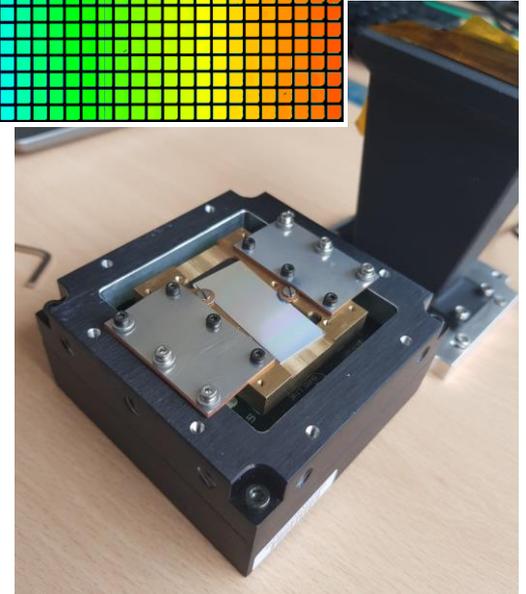
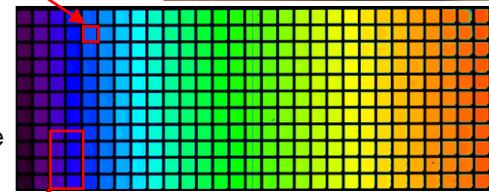
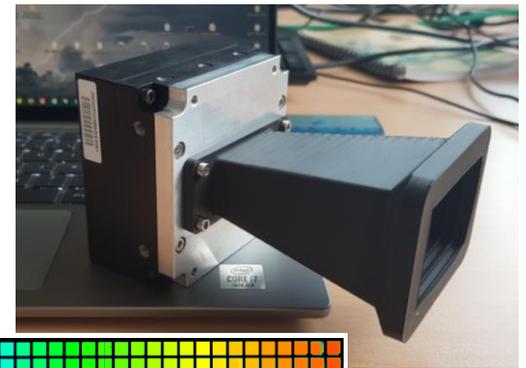
Caméras hyper-spectrale TERRA FORMA

Réalisation courant 2021 d'un pré-prototype optimisé pour les mesures en réflectance (justesse radiométrique relative + absolue)

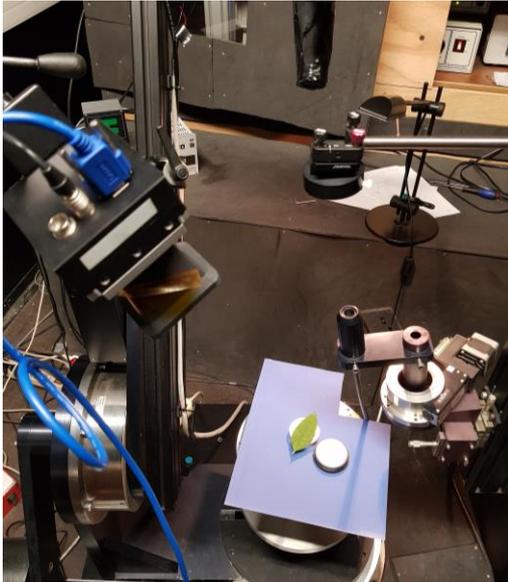
- 440 – 800 nm, 319 voies, résolution spectrale 6 – 12 nm, FoV 12°, 100x100 pixels
- Architecture non optimisée pour TF, héritée des précédents développements
- Composants optiques disponibles dans le commerce (ou semi-custom)
- Mécanique conçue à l'IPAG, sous-traitée pour la réalisation
- Détecteur CMOS Pyxalis (demokit HDPYX + électronique de lecture + logiciel de pilotage propriétaire + SDK)

Roadmap instrumentale dans TERRA FORMA

- 2022-2023 - Levée des verrous instrumentaux (traitement données bas niveau et calibration laboratoire)
- 2022-2023 - Spécification des domaines spectraux
- 2^{ème} moitié 2022 - Augmentation de la résolution spatiale (vers 350x200 pixels)
- 2^{ème} moitié 2023 - Optimisation la résolution spectrale (amélioration facteur 2 à 3)
- Spécification de composants dédiés (prestation labo Fresnel), spécialisation du boîtier détecteur, IHM dédiée
- Développement de l'opérabilité terrain

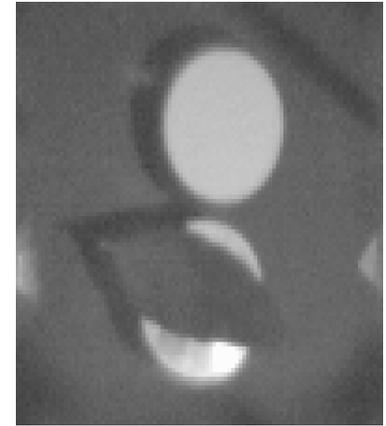
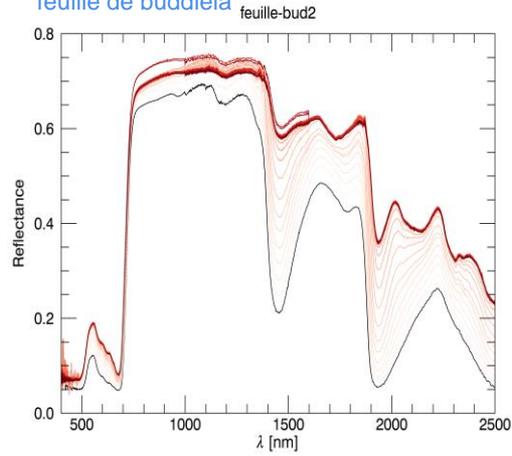


Quelques (pré-)résultats



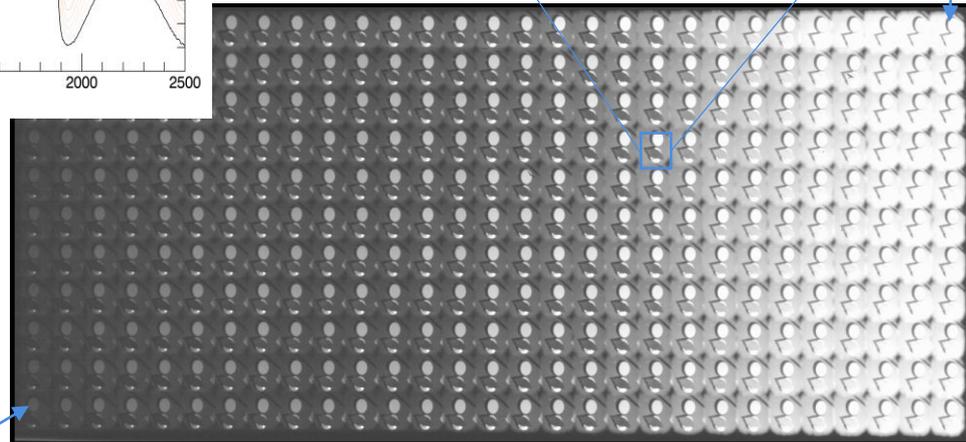
Mesures de laboratoire sur feuilles d'invasives, comparaison d'une mesure de référence aux données acquises avec la caméra hyperspectrale (Novembre 2021 à l'IPAG sur SHINE, avec INRAE-LESSEM)

Suivi spectral de la déshydratation d'une feuille de buddleia



Acquisition hyper-spectrale

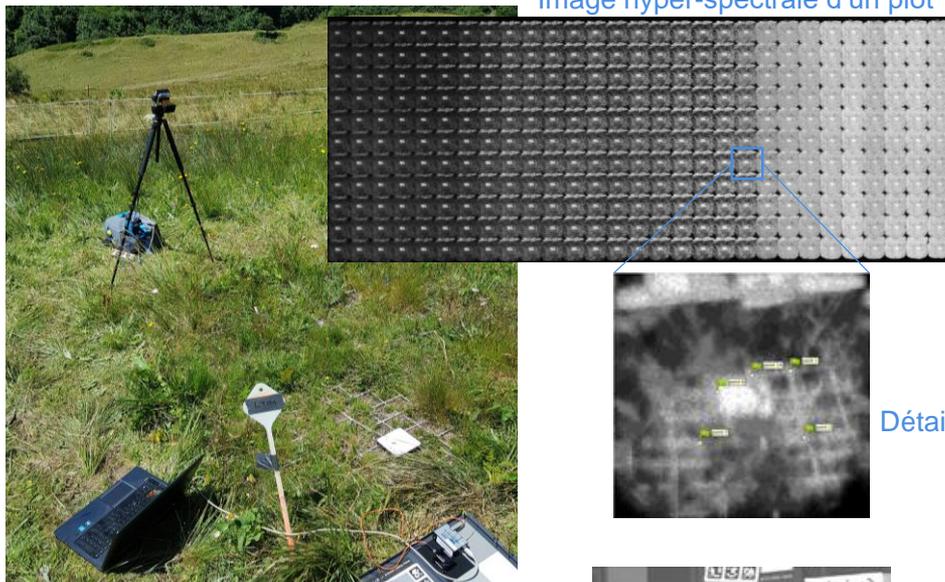
800 nm



440 nm

Quelques (pré-)résultats

Image hyper-spectrale d'un plot



Détail

Test d'opération sur plots aux Alpes Volants du Lautaret Galibier (Juillet 2021, LECA INRAE-LESSEM)

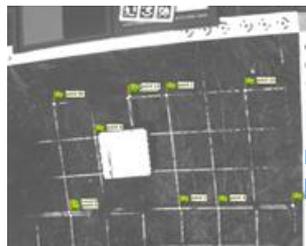


Image multi-bande



Intégration et pilotage sur drone (Janvier 2022, avec INRAE-LESSEM, prestataire Escadrone)

Stratégie de déploiement

20 imageurs hyper-spectraux à intégrer puis déployer => hors capacités IPAG !

- Transfert de cette activité chez l'industriel et partenaire Pyxalis
 - Transfert d'une licence d'exploitation de l'UGA
 - Transfert des plans opto-mécaniques
 - Transfert des procédures de traitement des données bas-niveau



Phase 1 de TERRA FORMA (->2024)

- Cahier des charges, dimensionnement, intégration et test de 3+ prototypes sur demokit (IPAG, IGE, LECA)
 - Prestation Pyxalis 39k€ pour spécialisation des demokit
- Transfert et accompagnement de l'activité chez Pyxalis (apprenti ingénieur plan de relance + CDD)

Phase 2 (->2029)

- Fabrication des composants puis intégration des 20 caméras par Pyxalis
 - Coût unitaire 12,5k€ (coût matière)
 - Duplication des prototypes (différenciés !)
- Déploiement terrain Pyxalis/IPAG
- Exploitation des données IPAG/LECA/IGE/...

Données caméras et opérations

Beaucoup de chose reste à définir sur les aspects déploiement et opérationnel !

Manip sur mât (alimentation solaire ?) à demeure ou embarquée sur drone envisagées

Flux des données brutes :

- Image 3M pixels 14 bits mono (6 mo par image), possibilité d'un mode HDR 20 bits
- Framerate : déclenchement à la demande ou en continu jusqu'à 20ips (et jusqu'à 100ips si spécifié à Pyxalis)
 - A 10ips (typique drone) : 1 Go de données en 17 s
- Pilotage et récupération du flux video par USB3.1
- Acquisition d'une image : 10 – 1000000 µs de temps d'exposition
- Format des fichiers à définir (permettant d'avoir metadonnées dans les entêtes des images – bin, hdf, geotiff, ...)

Actuellement : pilotage puis stockage des données brutes sur PC externe, et récupération des données directement sur le périphérique de stockage pour traitements ultérieurs (bas niveau puis exploitation)

- Géolocalisation possible a posteriori sur vol drone (avec LESSEM : positionnement par RTK à 1 cm)
- Stockage sur disque flash ou carte SD >128Go
- Pilotage du PC de contrôle à distance possible (actuellement WIFI, mais possible par module radio, 4G)
- Alimentation détecteur 12V DC. Conso détecteur max 24W, à 10Hz => 6W en moyenne, + 10W PC stick de contrôle

Contraintes d'installation :

- Soleil à garder en dehors du champ de vue
- Des difficulté si Tamb>35°C
- Pare-soleil, boîtier étanche, pare-buée
- (A positionner à minimum 3-4 m de la cible)

Algorithmes embarqués (perspectives)

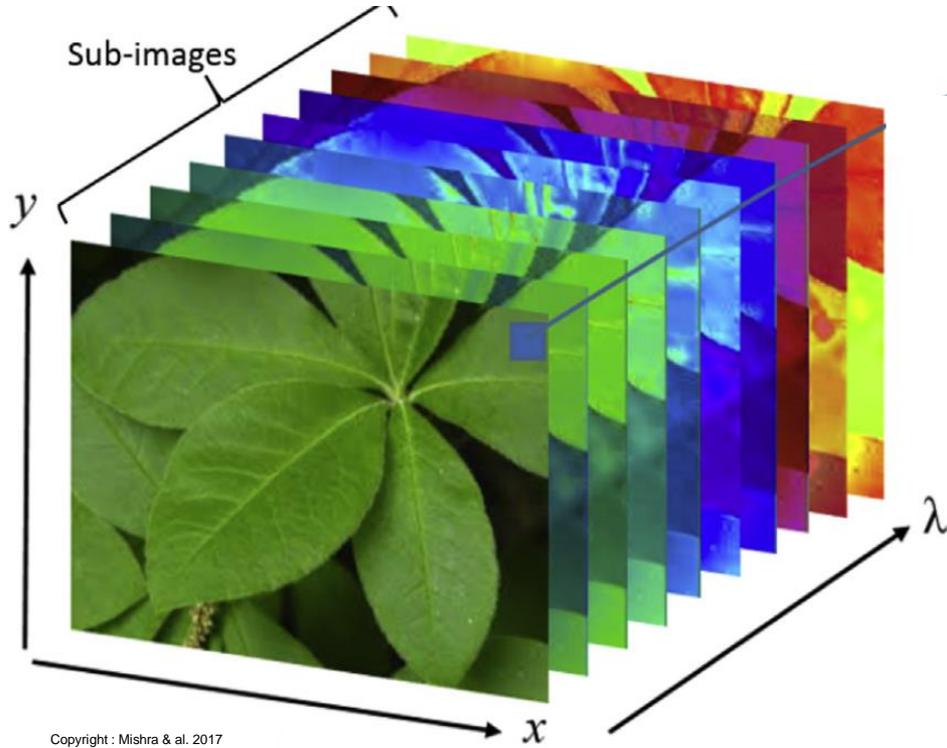
Etat actuel des développements :

- Des efforts fournis sur le traitement des données brutes (différé) pour obtenir des données scientifiquement exploitables (cubes hyper-spectraux) = *traitements bas niveau*
Analyse scientifique ultérieure des images hyper-spectrales.
- Pas d'algorithme embarqué, que ce soit sur les traitements bas niveau ou l'analyse.

Un intérêt majeur pour l'imagerie hyper-spectrale, et d'autant plus pour l'imagerie hyper-spectrale spécialisée !

Collaboration GIPSA-Lab et chaire MIAI

- Redondance importante de l'information
- Information spatiale et spectrale présente sur chaque acquisition
- Si capteur spécialisé : capacité potentielle de déclencher une alerte si reconnaissance d'un pattern
- IA embarquée ? Match filter ?
- Traitement bas niveau des données (très lourd) ou application d'algorithmes d'analyse directement sur les données brutes ?



Copyright : Mishra & al. 2017



Applications

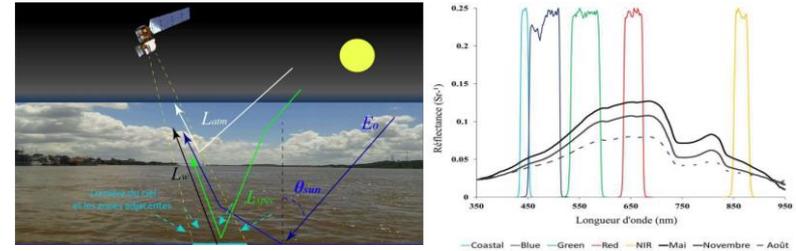
Philippe Choler (LECA) & Cédric Legout (IGE)

Pourquoi l'imagerie hyperspectrale ?

1. technique non intrusive
2. caractérisation à « haute » fréquence temporelle
3. possibilités de chgts d'échelle (liens avec programmes d'observation de la terre)

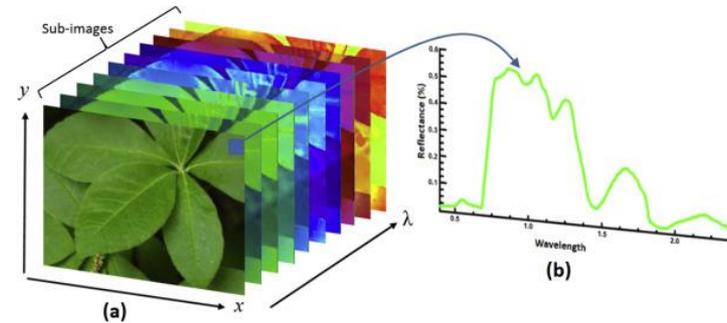
Deux applications retenues

1. Hydrologie -> Erosion et transferts sédimentaires



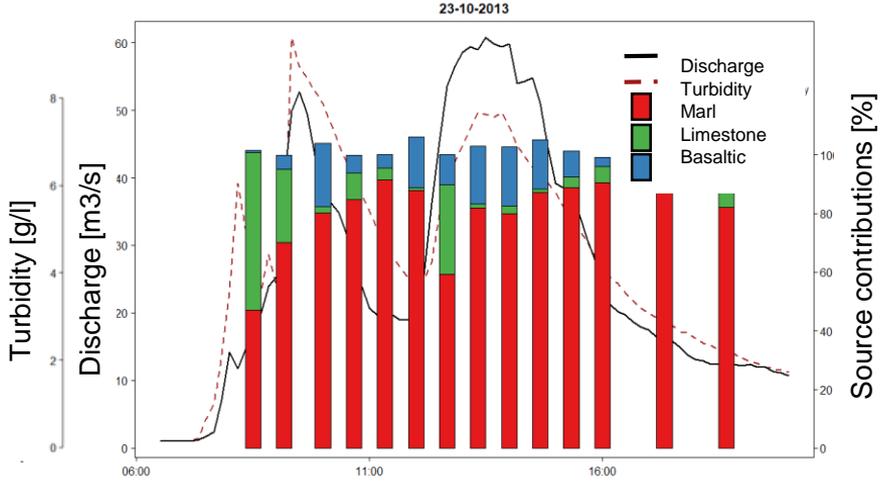
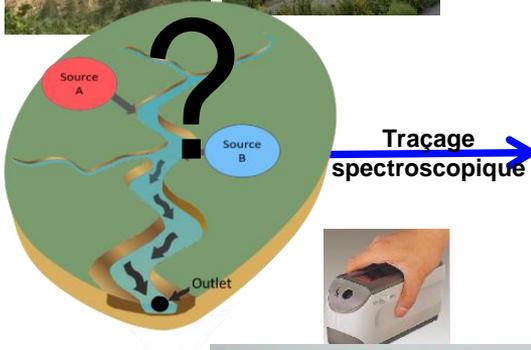
Yepez Figueroa. 2018

2. Ecologie -> biodiversités



Mishra & al. 2017

Erosion et transferts hydrosédimentaires



Poulenard et al. JH (2012)
 Legout et al. JSS (2013)
 Uber et al. JSS (2019)

1- Suivi temporel des concentrations de matières en suspension dans les rivières

2- Caractérisation et traçage de l'origine des matières en suspension transportées dans les rivières

→ Dynamique des processus hydrosédimentaires dans les bassins versants et liens avec les cycles biogéochimiques



Biodiversité

1. Biodiversité fonctionnelle

Biochimie foliaire (équipement pigmentaire, azote etc) -> phénotypage

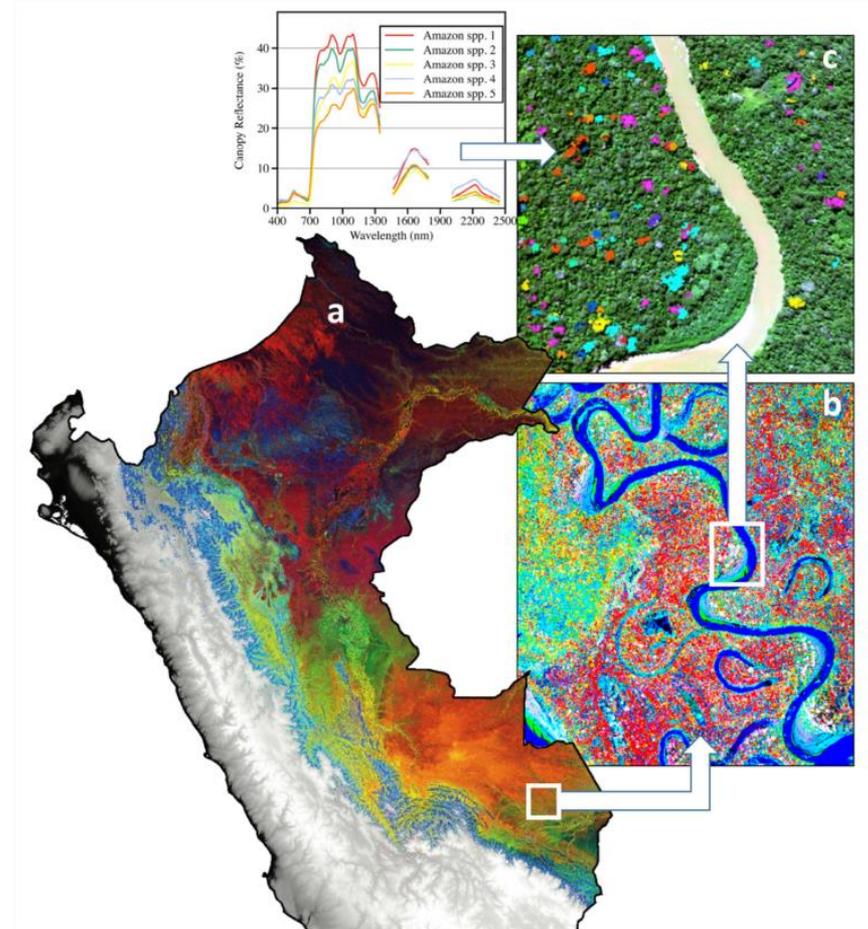
Structure et fonctionnement des couverts végétaux (Indice de surface foliaire, activité photosynthétique, indicateurs de stress...)

2. Monitoring

Détection d'espèces (ex. plantes invasives)

Suivi de placettes expérimentales

-> Liens avec les changements climatiques et les changements d'usage des terres



Source: Asner, G. P., and R. E. Martin. (2016). *Global Ecology and Conservation* 8:212-219.

Quelques défis – côté thématicien

1. Besoin de calibration (sédiments, végétaux, neige, sol)
2. Observation multi-échelle (fixe, aéroportée, satellite)
1. Intégration des données dans des modèles (distribués) biogéochimiques, écohydrologiques (*land surface models*)

Laboratoires impliqués : CARRTEL, CEBC, CEFE, Centre de Géosciences, CERFE, CESBIO, Chrono-environnement, CRAL, CReSTIC, DT-INSU, Dynafor, ECOBIO, ECOLAB, EVS, GET, GR, GSMA, HABITER UR, IGE, IM2NP, IPAG, IPGP, IRISA, IRIT, ISM, ISTO, LAAS, LECA, LEMAR, LHYGES, LIG, LIRMM, LMGE, LPC, LRGP, LIS, RiverLy, SAS, Subatech.

Tutelles et partenaires non académiques : CNRS :INSU, INEE, INSIS, IN2P3, INP, INS2I, INSHS, INSB. **Autres organismes de recherche :** IRD, INRAE, IPGP. **Ecole d'ingénieur :** Mines ParisTech. **Universités :** Grenoble, Savoie-Mont-Blanc, Toulouse, Rennes, Clermont-Auvergne, Montpellier, Reims, Toulon, Franche Comté, Orléans, Strasbourg, Aix Marseille. **EPIC:** INERIS. **PME:** Extralab

Soutiens: CNES, OFB, BRGM, Agence de l'eau Loire Bretagne, Réseau RECOTOX, l'observatoire du sol vivant, Institut Carnot Eau & Environnement, Groupes Régionaux des experts du climat, Régions, Office régionales de la biodiversité, Fondation François Sommer

Remerciement aux autrices du livre TERRA FORMA qui nous ont laissé l'emprunt de leur titre.

Contact(s): terra-forma@services.cnrs.fr

terra-forma.cnrs.fr

anr®
agence nationale
de la recherche



ANR-21-ESRE-0014

TERRA



FORMA



Grille WP4

Quels **types d'acteurs** sont selon vous intéressés par vos travaux ?

- chercheur de mon labo, d'autres labos, hors IRs, lesquels ?
- des entreprises impliquées dans les développements / vers des services, lesquelles ?
- des entreprises impliquées dans l'analyse des données / vers des services, lesquelles ?
- des organismes publics, lesquels ?
- etc.

Quelles sont les **formations universitaires** avec lesquelles vous pouvez travailler ?

Quels seraient les objectifs de ces interactions / intervention dans ces formations ?

projets tutorés autour d'un capteur ?

projets dans les FabLabs ?

travail sur les standards des données et métadonnées ?

réflexion sur les protocoles d'échantillonnage / design ?

réflexion sur les enjeux éthiques, d'acceptabilité ?