

Imagerie Hyperspectrale miniaturisée pour l'étude de l'environnement et du climat

Atelier Spectro OSUG/FOCUS 11-2021

UGA/IPAG : Silvère Gousset, Etienne Le Coarer, Juana Rodrigo, Hélène Ehrhardt

ONERA/DOA : Laurence Croizé, Yann Ferrec, Florence de la Barrière, Nicolas Guérineau

CNRS/LTM : Jumana Boussey, Cécile Gourgon, Nadine Gergès, Marie Panabière

ONERA : Structuration du détecteur pour intégrer des fonctions de spectrométrie

- **SP**ectrometer **On Chip SPOC** [Rommelure S. et al. *Opt. Lett.* 2008]

IPAG : Spectromètre Fourier intégré dans des guides d'onde

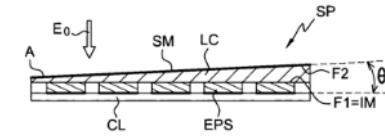
- **Stationary-Wave Integrated Fourier Transform Spectroscopy SWIFTS** [Le Coarer et al. *Nature* 2007]

Collaboration ONERA-IPAG dans FOCUS, sur le volet Détecteurs Innovants :

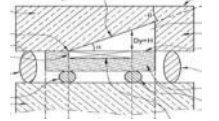
- **SWIFTS-LA** Collage de composants optiques sur le détecteur [Le Coarer et al. *ICSO2014*]
- **ImSPOC** Imagerie Hyperspectrale compact [Brevet 2017]

Des financements initiaux des Labex ont permis de mettre en place l'activité :

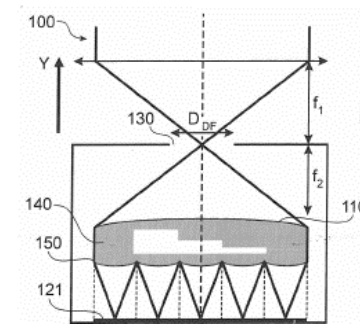
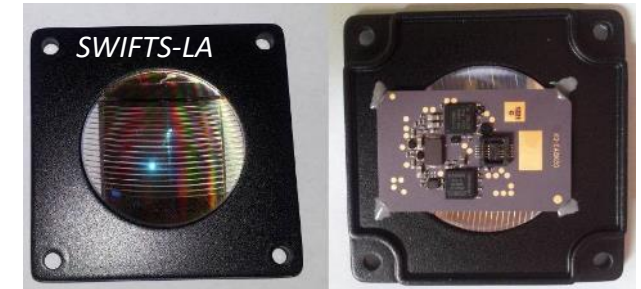
- Etude de marché FOCUS *Tematys* «Projet SPOC, Etude des Marchés Applicatifs en Hyperspectral», 2017
- FOCUS 2 ans post-doctorat, 2016-2018
- OSUG : pré-prototypage 2016
- FOCUS apprenti ingénieur 2017-2020
- OSUG 10 mois IR 2021



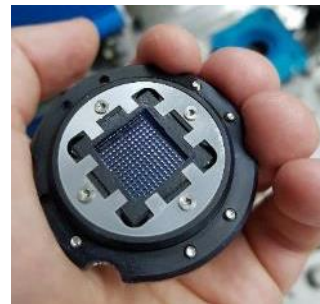
Microspoc monolithique
(Patent ONERA, 2003)



Microspoc "demi-hybride"
(Patent ONERA-CEA, 2010)



Imaging-SPOC
(Brevet ONERA-IPAG, 2017)



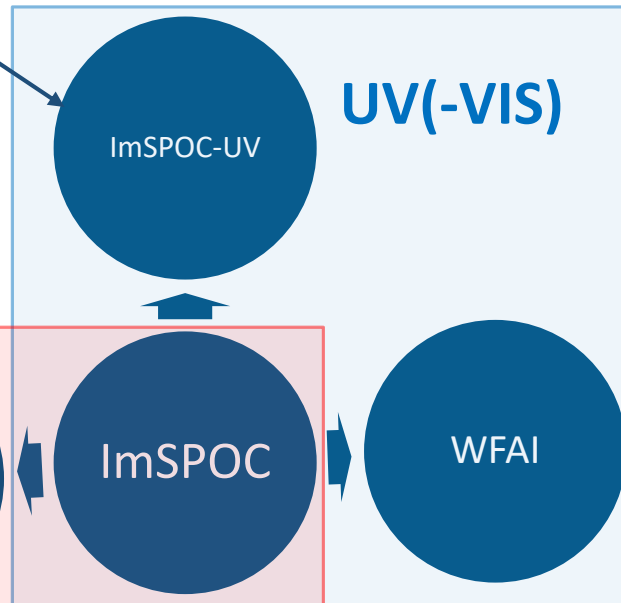
TERRA FORMA
 Designing and testing a smart observatory of socio-ecological systems in the Anthropocene

Partners:
 CNRS (INSU, INSE, INSIS, INSP2, INP, INSU, INSHS, INSB), IPGP, IRD, INRAE, Mines ParisTech, INRIA

Universités (Toulouse, Grenoble, Rennes, Clermont-Auvergne, Paris-Diderot, Montpellier, Reims, Toulon, Franche-Comté, Orléans, Strasbourg, Aix-Marseille)

Suivit de végétations / sédiments

MaxDOAS – Etude de polluants dans la troposphère depuis le sol et l'espace



IMARAM

Imagerie Raman pour la planétologie et le médical

CSUG

Surveillance de l'activité solaire par l'observation des aurores polaires depuis l'espace

FuMultiSPOC

Fusion de données multi-échelles multi-résolutions

Imageur hyperspectral pour la détection de gaz endo-atmosphérique

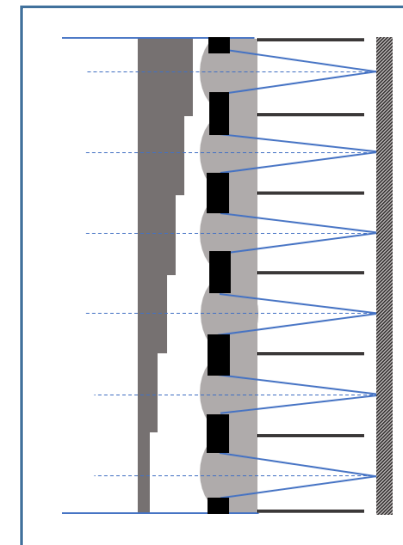
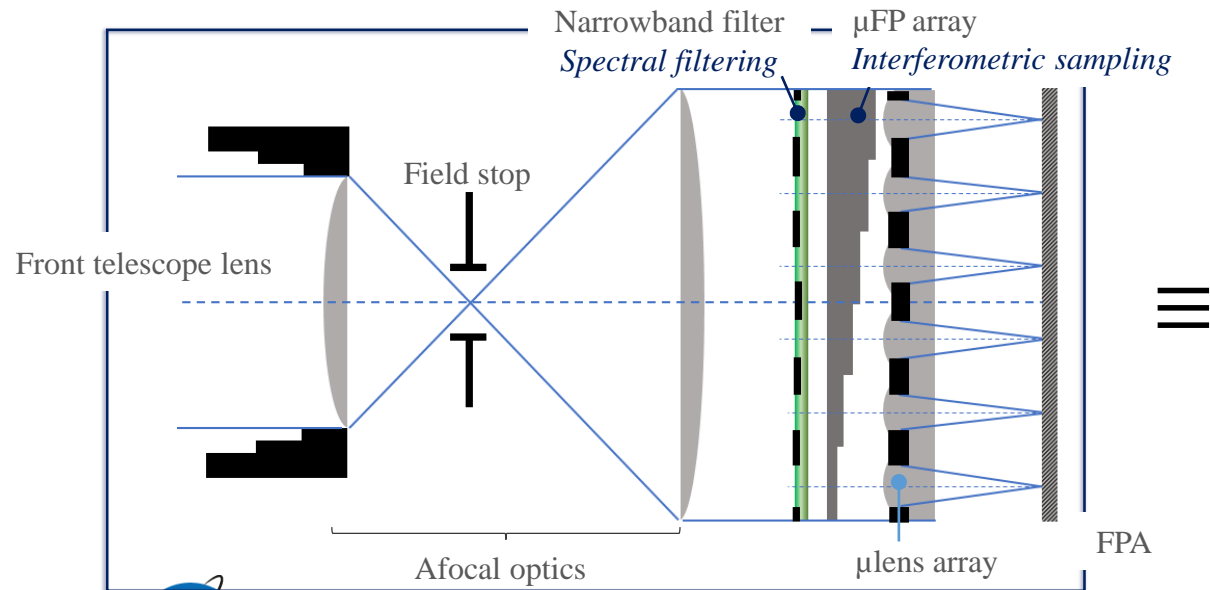
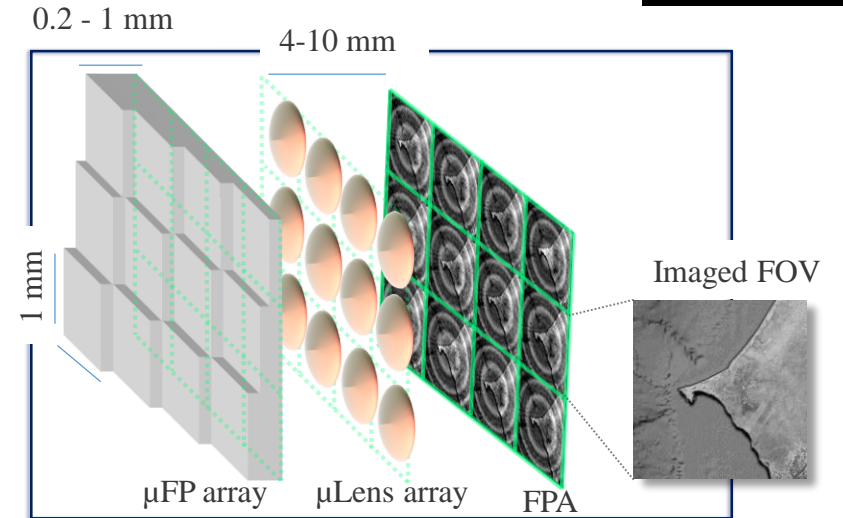


NanoCarb: Mesures de gaz à effet de serre depuis l'espace

Compact Fourier Transform imaging spectrometer (0.1 – 1 kg), designed for on-board application

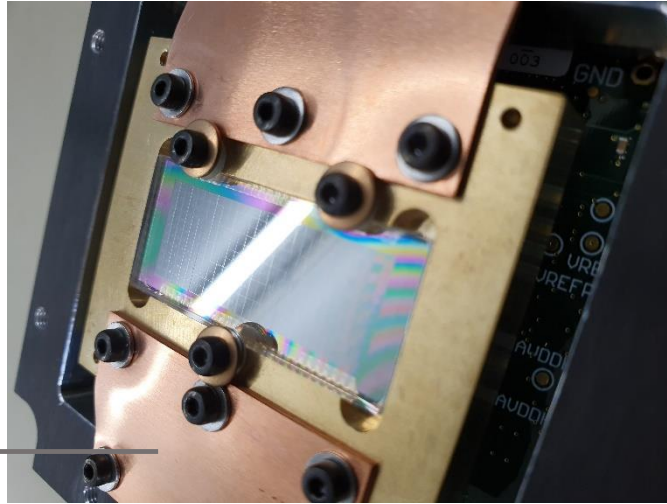
Static, snapshot, Fourier-based interferometer:

- Array of low-finesse micro Fabry-Perot (FP) interferometers coupled with an array of micro-lenslet
- Focal-plan intensity modulated by interferences





Pré-prototype TERRA FORMA
400-850 nm/30 canaux



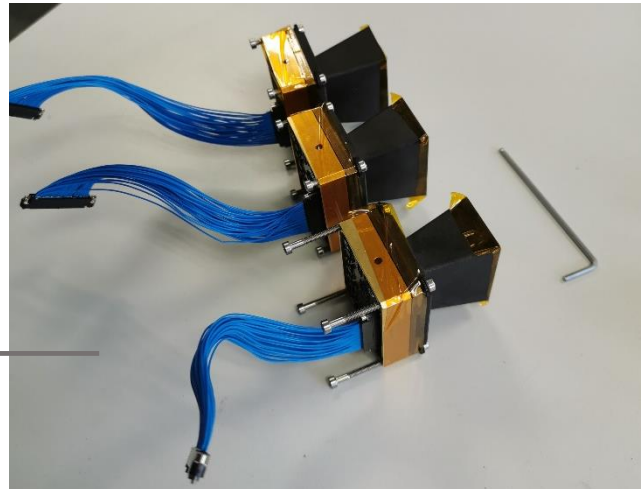
Proto ImSPOC-UV
380-1000 nm/100 canaux



Prototype de vol
CO₂ NanoCarb



Proto SWIR
1200-1700 nm/40 canaux



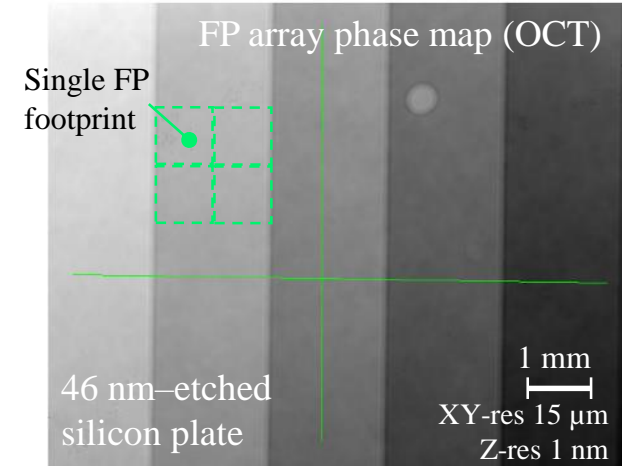
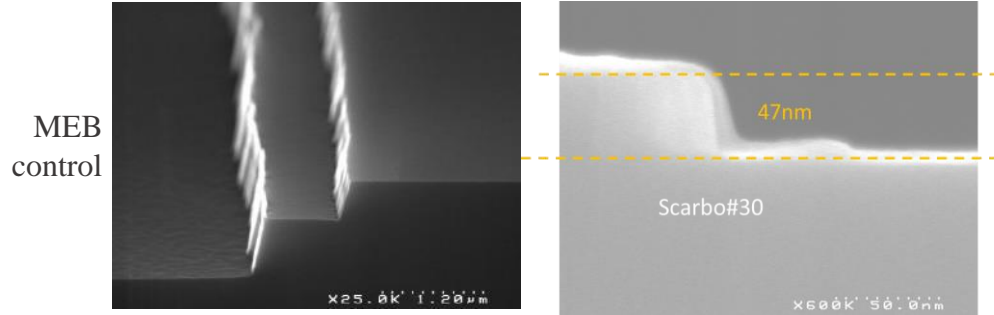
Modules WFAI

Caractéristiques générales

- 0.1-2 kg (w/o computer)
- FoV ~ 10-15°
- ~100 x 100 pixels in the FoV
- 100-300 spectral channels
- Spectral resolution in visible ~1-5 nm
- R~3000-5000 in nIR in correlation mode

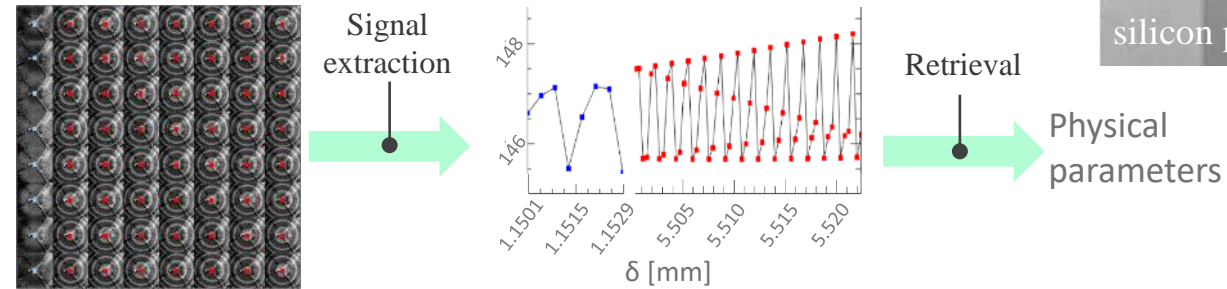
Technology

- Manufacturing of micro-interferometric components with nanometric etching then lab characterization



Data processing

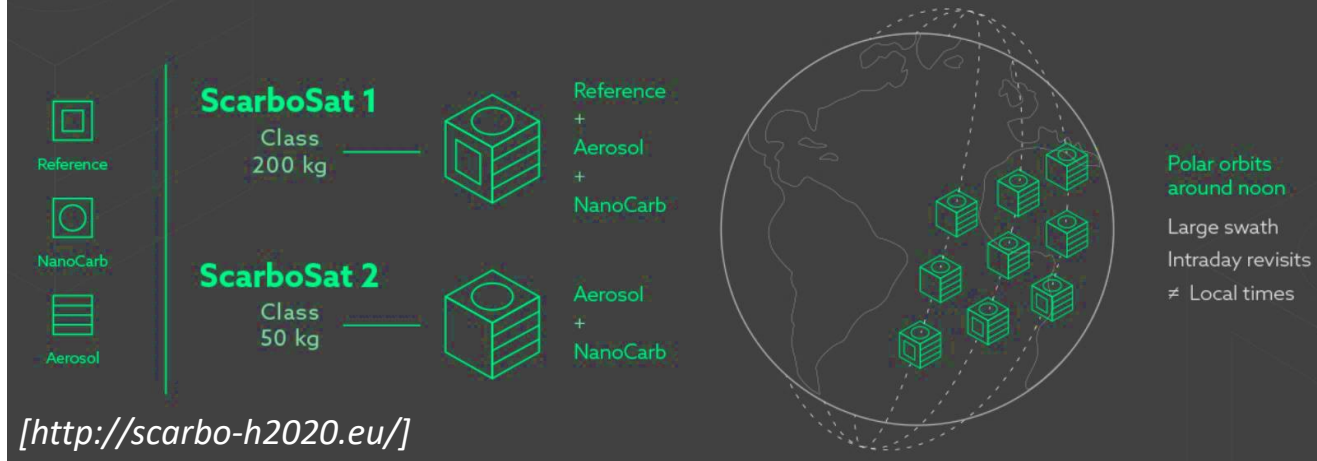
- Signal extraction, co-registration → optical calibration, detector NUC, etc



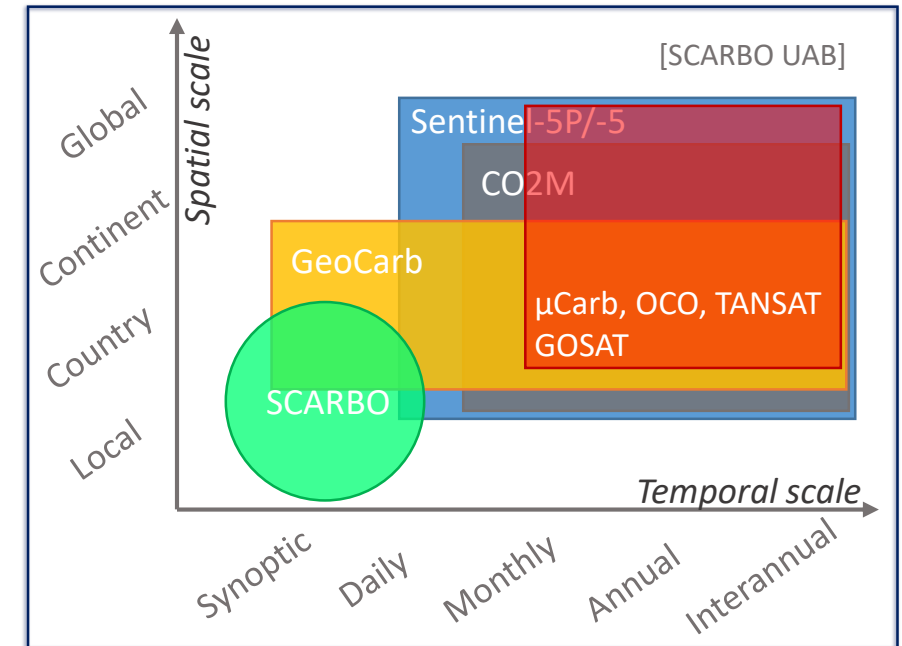
Design & data exploitation

- Retrieval strategy quiet uncommon, requiring close interaction between science and instrumentation physics

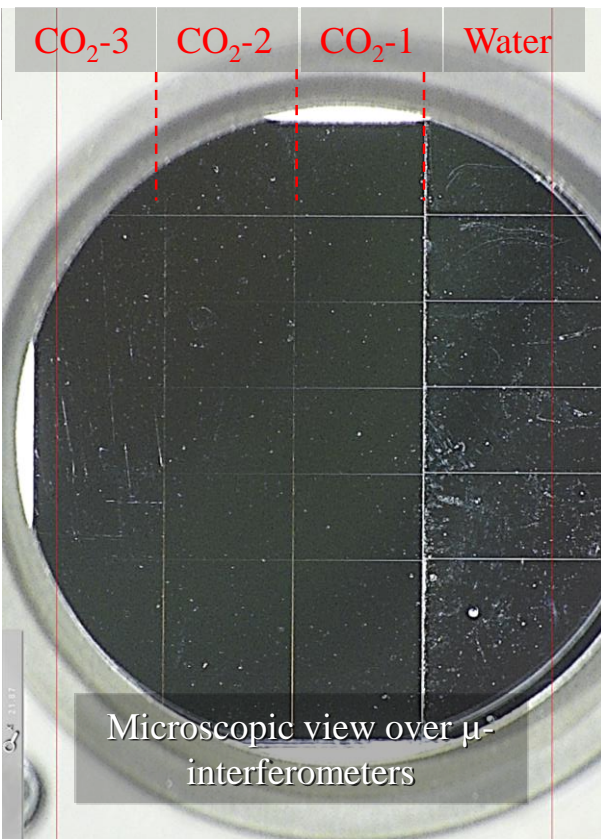
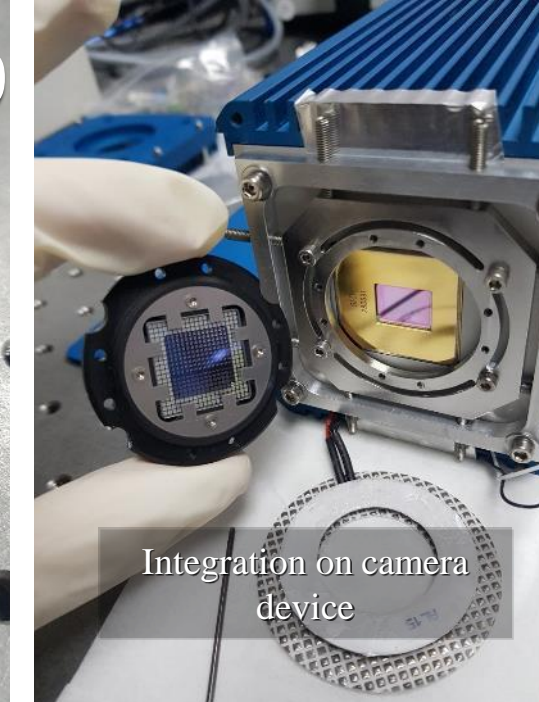
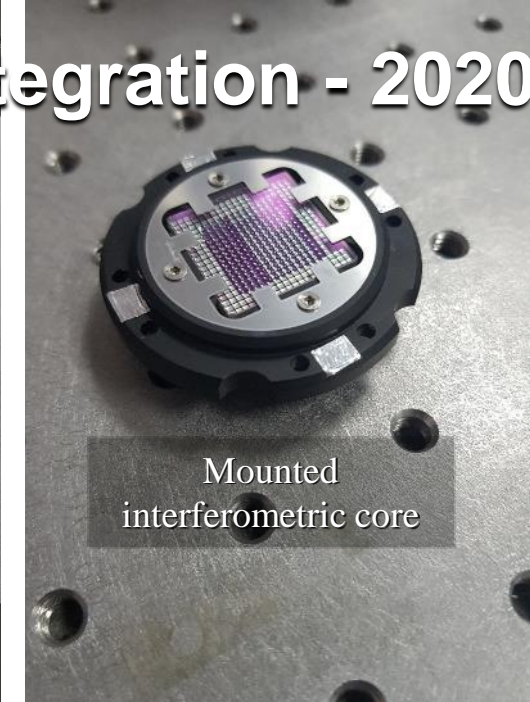
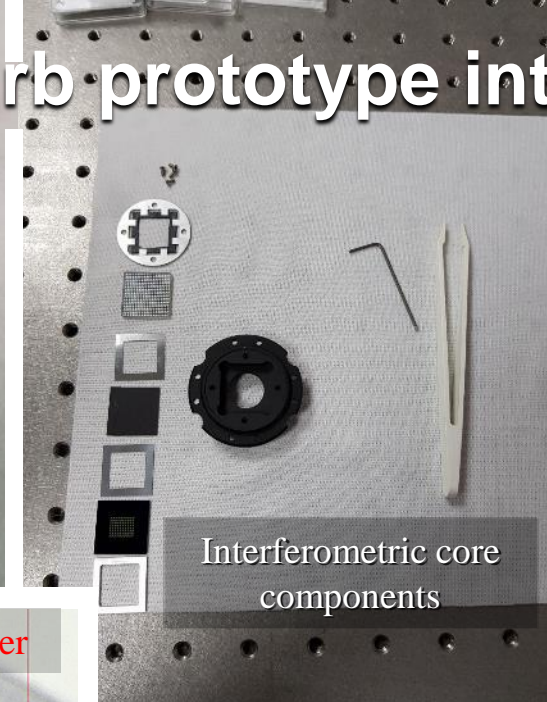
- H2020 2017-2021: Feasibility study of a hybrid constellation assessing anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄

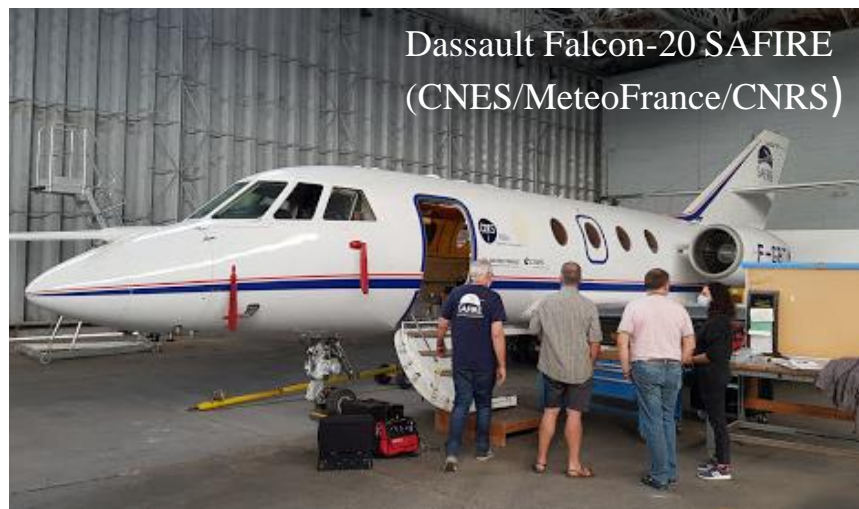


- NanoCarb (SWIR ImSPOC gas correlator) hyperspectral imager is the key miniature GHG sensor of the smallsat constellation
- NanoCarb aims within SCARBO:
 - i. Payload design for a space mission
 - ii. Technological development of the components
 - iii. TRL rising
 - iv. Prototype development and proof of concept within airborne demonstration



NanoCarb prototype integration - 2020



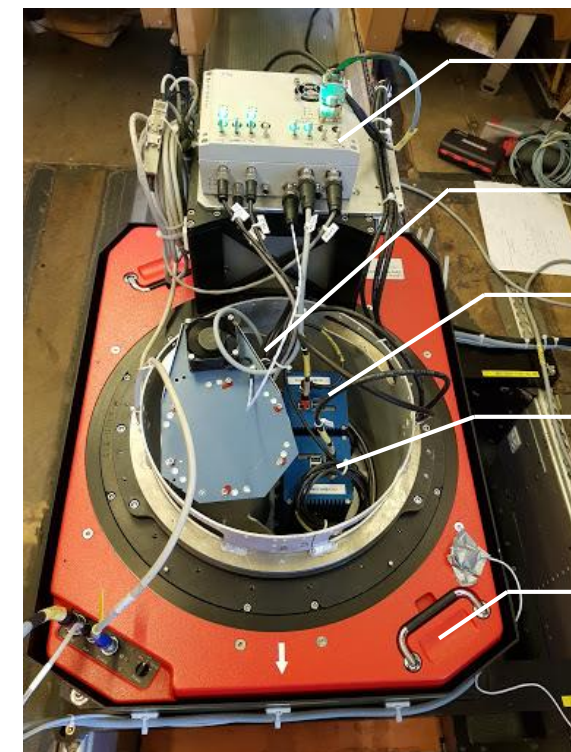


VIS cam. front optics

MAMAP emplacement

Interface plate

Ncarb front optics



IMU

VIS cam.

CO₂ cam.

CH₄ cam.

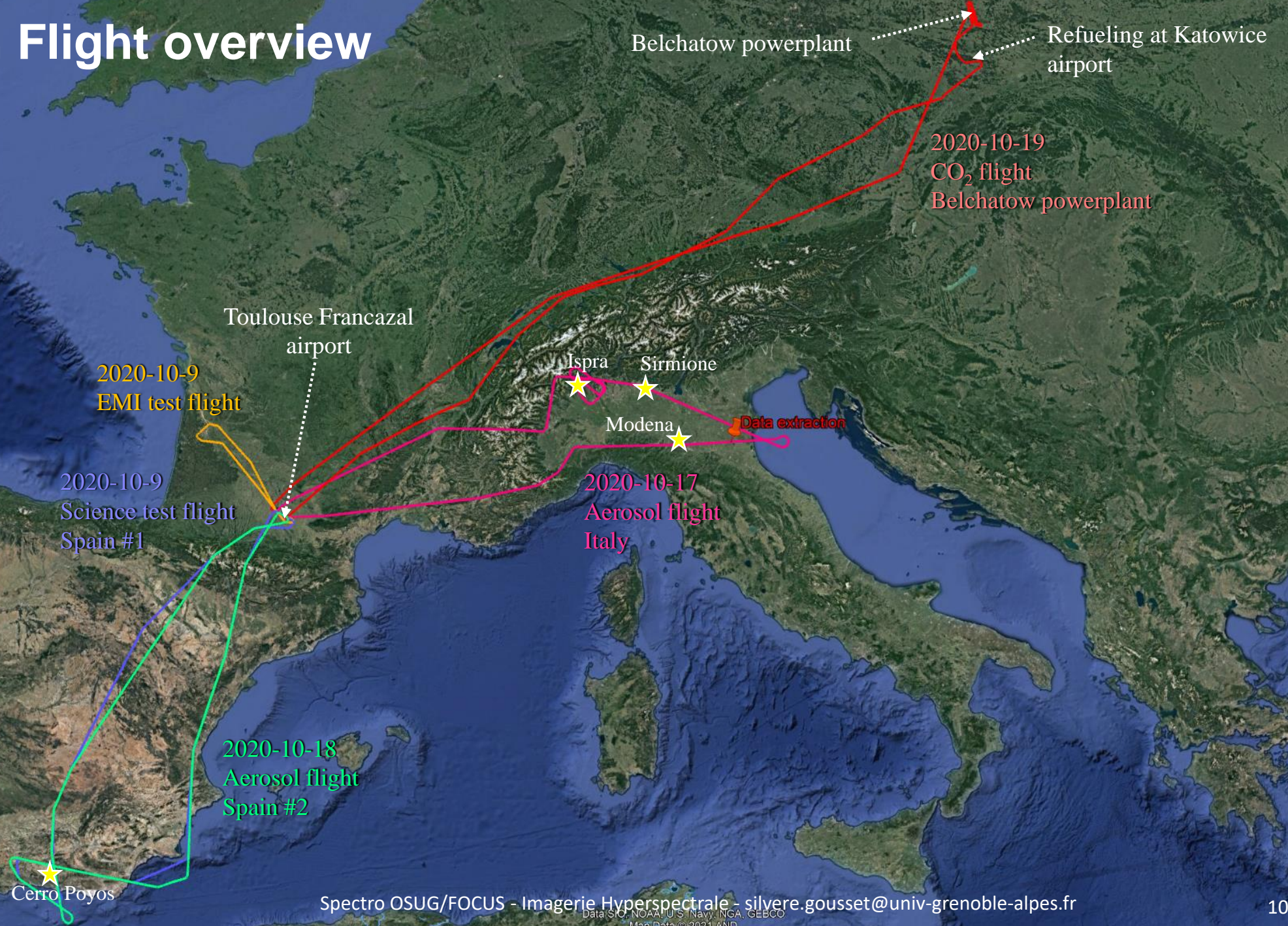
Gyrostab. mount



- 1 Chief operator
- 2 NanoCarb operator
- 3 NanoCarb 2nd op.
- 4 SPEX operator
- 5 NanoCarb
- 6 SPEX

Mission Flight overview

★ Aeronet station



Challenging signal extraction

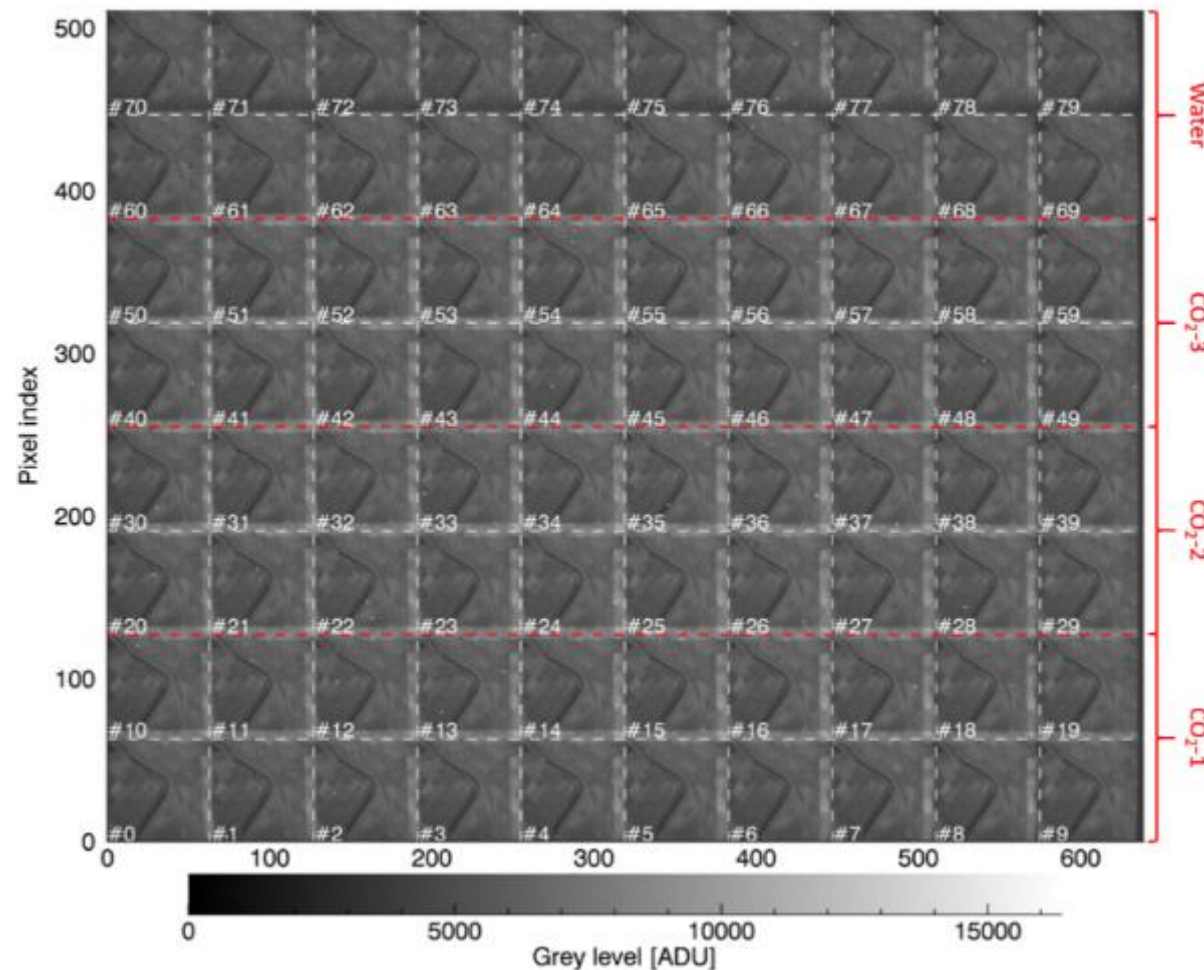
- Interferometric modulation => ~1-5% of the signal
- Sub-pixel co-registration of the different thumbnails
- Pixel's interferometric state calibration

Processing of the raw data:

- PRNU & cosmetic correction
- Dark subtraction
- Conversion ADU => radiometric units

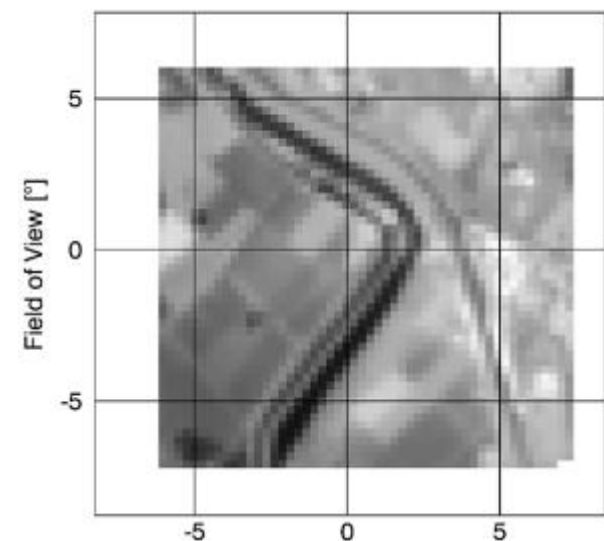
Italy flight, 2020-10-17, 11h50, acquisition between Adriatic Sea and Modena

Raw output - CO₂ band - median level: 6101 ADU



Panchromatic frame

Visible frame

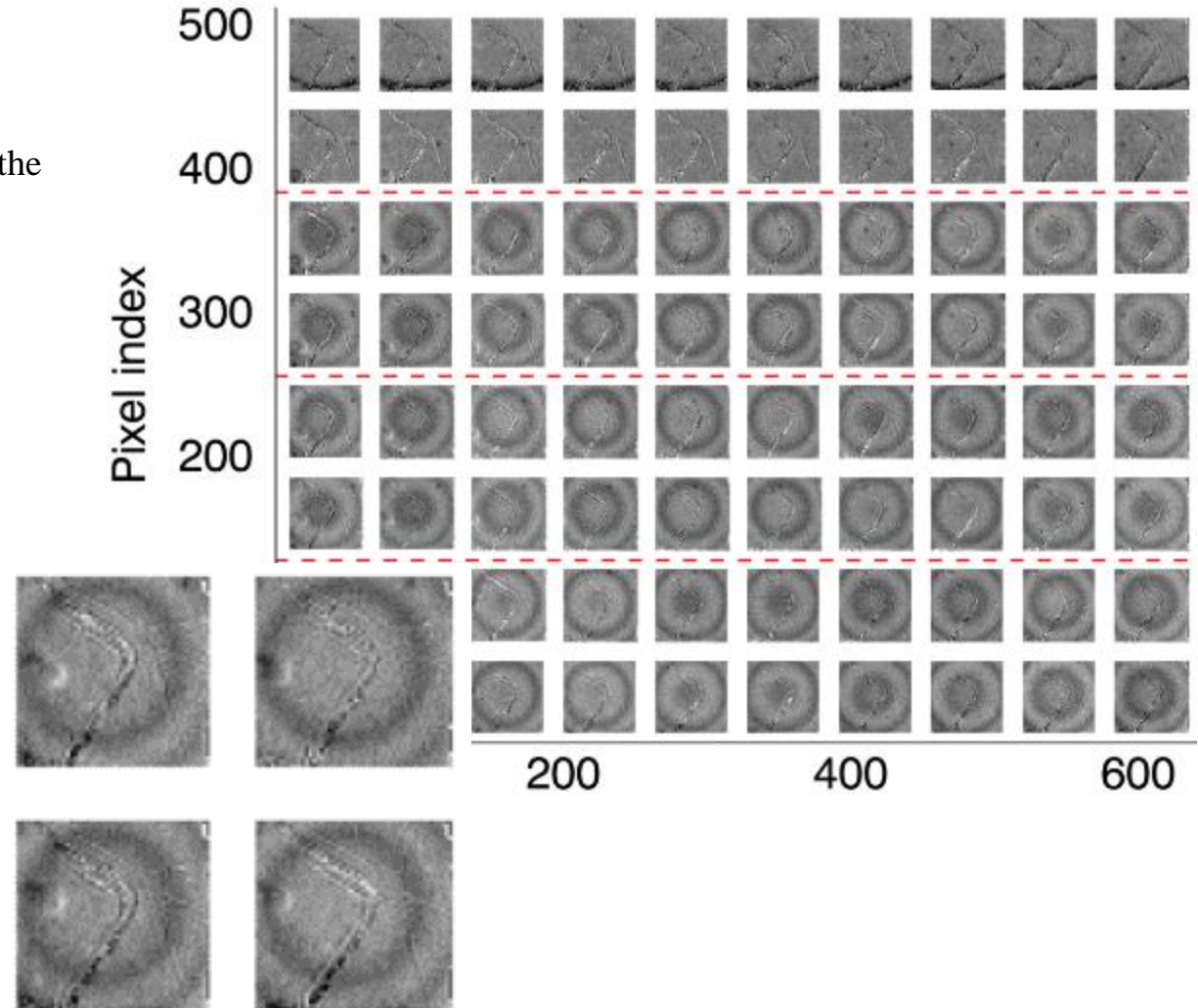
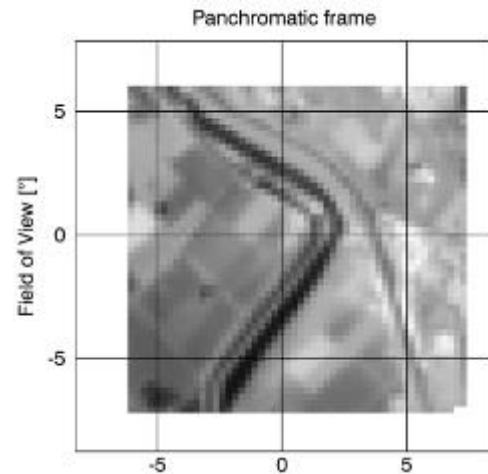


A normalization by the panchromatic thumbnail make apparent the useful interferometric signal:

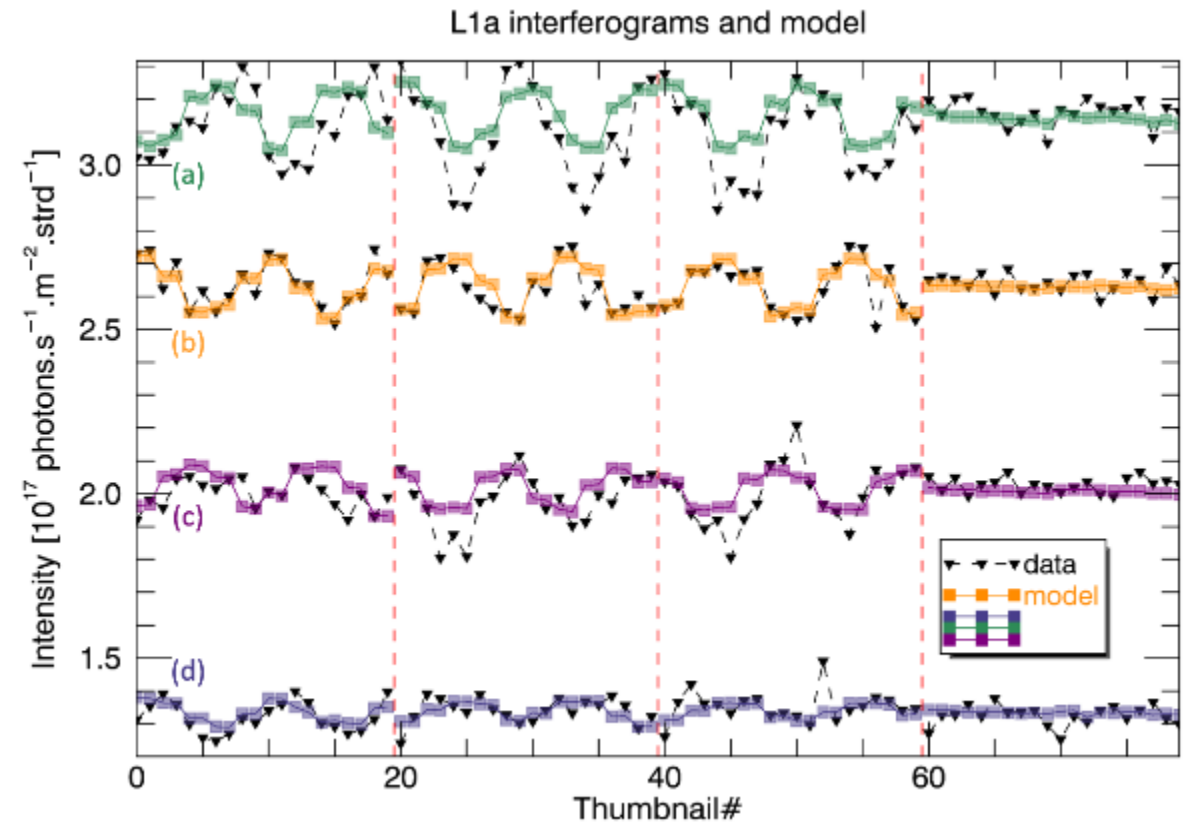
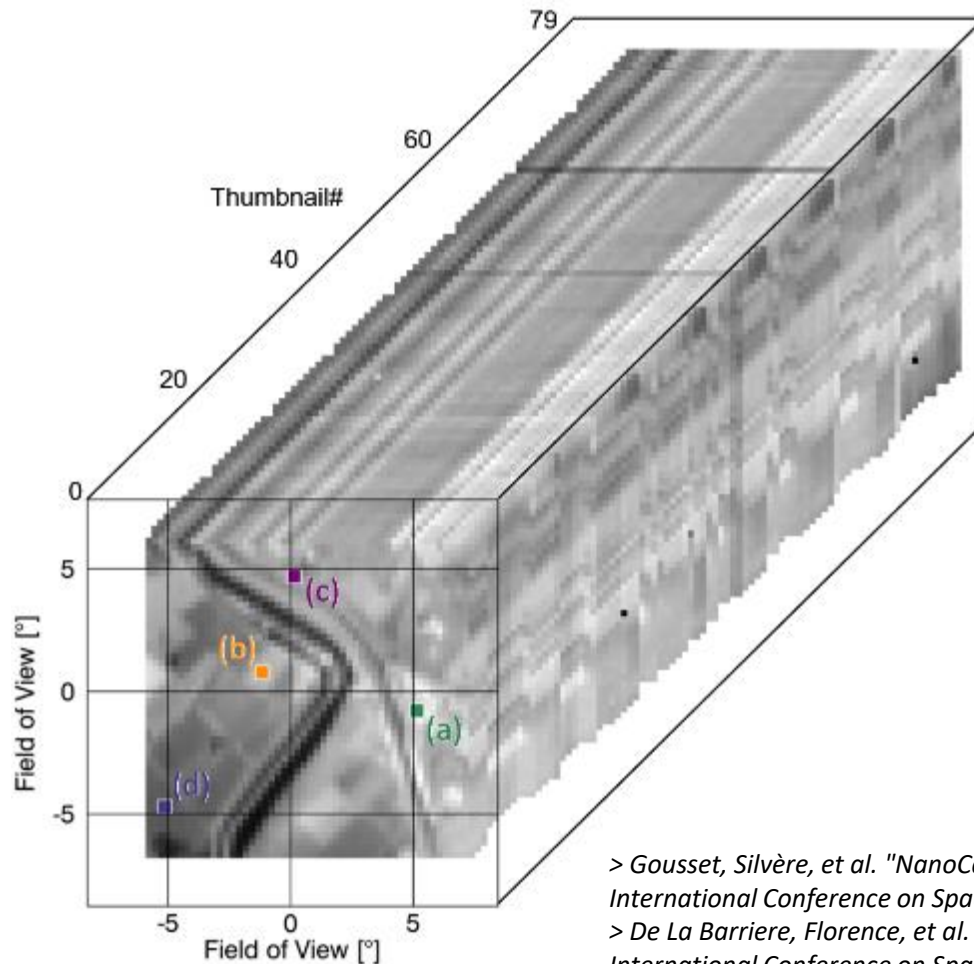
- ✓ Nominal shape of the FP-induced interferometric rings
- ✓ Nominal amplitude for CO₂ and water

Some instrumental/processing issues:

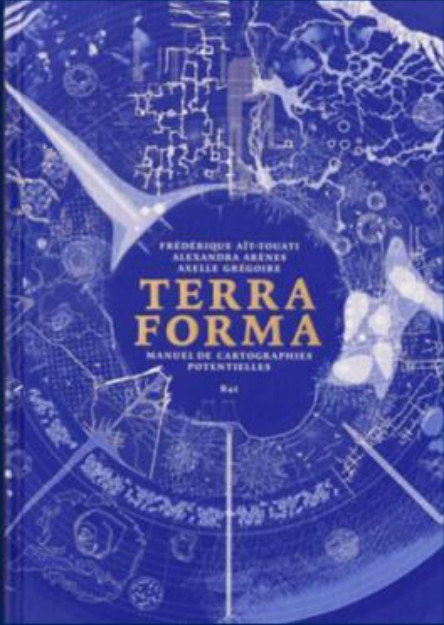
- ✗ Some dusts over the optics and aircraft window
- ✗ Vignetting over the water channel
- ✗ Artefact of thumbnail co-registration/interpolation



- Applying spatial co-registration + radiometric calibration, we are able to extract interferograms in the FoV.
- We are testing here model reliability (Radiative transfer + calibration-based instrumental model)



> Gousset, Silvère, et al. "NanoCarb spaceborne miniaturized GHG sensor: first experimental results." International Conference on Space Optics—ICSO 2020. International Society for Optics and Photonics, 2021.
 > De La Barriere, Florence, et al. "Instrumental development of NanoCarb, a new spectro-imaging sensor." International Conference on Space Optics—ICSO 2020. International Society for Optics and Photonics, 2021.



TERRA FORMA
PIA3 EQUIPEX+

Concevoir et tester l'observatoire intelligent des territoires à l'ère de l'Anthropocène

PI : Laurent Longuevergne (CNRS/UR1, OZCAR)
co-PI : Arnaud Elger (UPS, RZA)

Zones Ateliers eLTER OZCAR

Partners
CNRS (INSU, INEE, INSIS, IN2P3, INP, INS2I, INSHS, INSB)
IPGP, IRD, INRAE, Mines Paristech, INERIS

Universités (Toulouse, Grenoble, Rennes, Clermont-Auvergne, Paris-Diderot, Montpellier, Reims, Toulon, Franche-Comté, Orléans, Strasbourg, Aix-Marseille)
Extralab company

3

- PIA3 Equipex pour l'instrumentation d'observatoires de l'environnement et le déploiement de capteurs intelligents
 - ImSPOC est au cœur du volet télédétection/imagerie hyperspectrale
 - Le déploiement opérationnel de ~20 prototypes est actuellement prévu
 - Migration de la réalisation des instruments vers une entreprise
- Déploiement de ImSPOC sur des thématiques de suivi de végétation et d'étude de sédiments dans les cours d'eau

Mesure aux Alpes Volants Lautaret-Galibier sur des placettes de végétaux **07/2021**

- ⇒ 400-850 nm avec pré-prototype TERRA FORMA
- ⇒ Comparaison avec mesure spectro + imageur multi-bande



Visée zénithale à l'OHP pour la mesure de NO_2 , comparaison à spectro SAOZ, **02/2021**

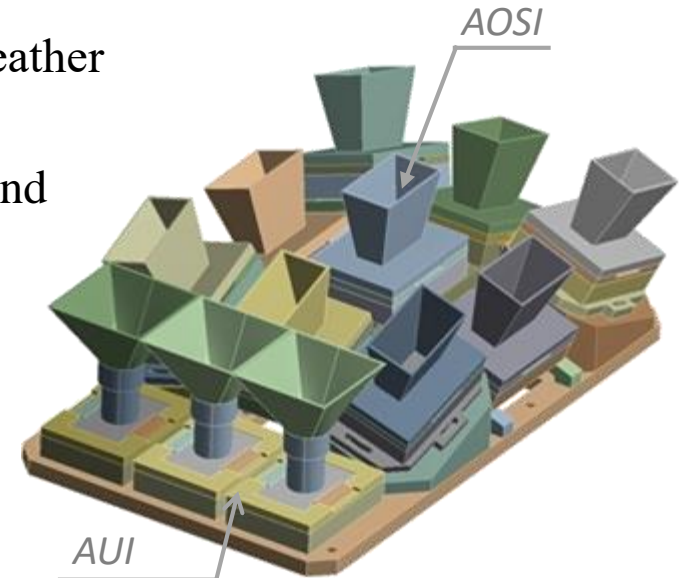
- ⇒ Technique DOAS appliquée à ImSPOC
- ⇒ Acquisitions supplémentaires prévues pendant ERCA 2022



Survol d'un site TOTAL pour la détection d'un panache de méthane **07/2021**

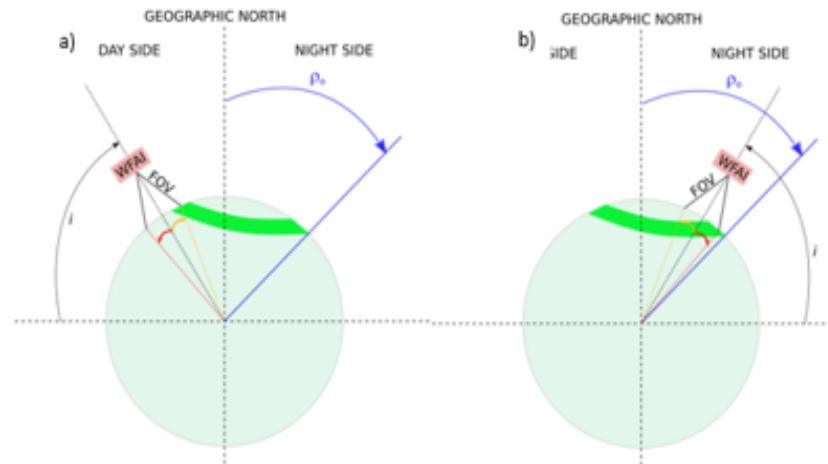
- + Mesure sol FTIR CNES
- + Lâché de ballon AirCore

- Miniature Auroral Imager developed in the framework of ESA's Distributed Space Weather Sensor System(D3S) Program.
- Payload is composed of two instruments to **observe the full aurora oval** in the UV and visible:
- *Auroral UV Imager (AUI) [130 nm – 135 nm]*
- *Auroral Optical Spectral Imager (AOSI) [350 nm – 700 nm]*



AOSI Performances

| | |
|------------------------|----------------------|
| FOV one module | 18.9° x 18.9° |
| AOSI number of modules | 3 x 3 |
| FOV | 56.7° x 56.7° |
| Module dimension | 45 x 60 x 57.3 mm |
| AOSI dimension | 212.5 x 170 x 100 mm |
| Angle fov 1 pixel | 0.005 rad |
| Resolution spectral | 1.05 nm @ 350 nm |
| Spatial resolution | 12.5 km @ 2500 km |



100 x 200 x 250 mm
5 kg
30 W

ImSPOC, concept inventé en 2016-2017 au sein de FOCUS, est maintenant une thématique instrumentale qui adresse un grand nombre de thématiques scientifiques à l'OSUG

Concept miniature idéal pour des applications terrains ou embarquées

Après une phase de maturation, un grand nombre de prototypes opérationnels sont maintenant disponibles et ont permis récemment des mise en œuvre sur le terrain

Interaction entre science thématiques & instrumentale primordiale pour aboutir à un déploiement du concept sur des applications pertinentes

NanoCarb, né de l'écosystème FOCUS, est un développement techno-push pour la mesure des GES.

La communauté scientifique des sciences de l'atmosphère s'approprie maintenant cette technologie grâce à SCARBO :

- Dogniaux, Matthieu, et al. "The Space CARBone Observatory (SCARBO) concept: assessment of XCO₂ and XCH₄ retrieval performance", AMT 2021 (soumis)
- Collaboration initiée avec le CNES, Visibilité à l'échelle Européenne

TERRA FORMA : appropriation du concept par une communauté de l'OSUG, vers une instrumentation transverse sur le volet imagerie hyperspectrale

Toutes les infos sur <https://ims poc.osug.fr/> (site en construction)