

CARACTÉRISATION SOL DE L'INSTRUMENT MICROCARB

ELODIE CANSOT (CNES)

COMET OOE – ETALONNAGE SOL DES INSTRUMENTS OPTIQUES

25/06/2024



MISSION MICROCARB

Objectifs de la mission

- Mesurer les concentrations de CO₂ sur toute la Terre pour quantifier les échanges de Carbone atmosphère – terres – océans (flux naturels)
- Précurseur de la future mission ESA – EUMETSAT CO₂M

Mesure de la concentration de CO₂

- Biais régionaux :
 - < 0.1 ppm (Obj)
 - < 0.2ppm (Seuil)
- Erreur aléatoire :
 - < 0.5 ppm (Obj)
 - < 1.5ppm (Seuil)

→ **Mesure Difficile / Spécification très exigeante**

Orbite polaire

- SSO 649 km 10H30 LTDN
- Cycle de 25 jours (sous cycle de 7 jours)

Satellite

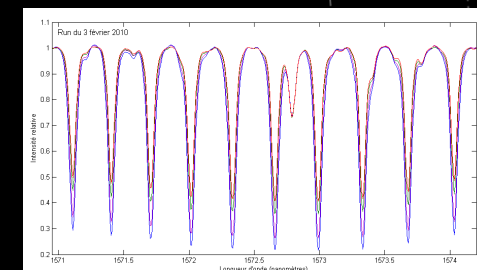
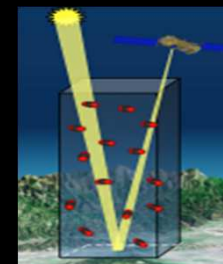
- Utilisation de la filière Myriade (< 200 kg)

Durée de vie

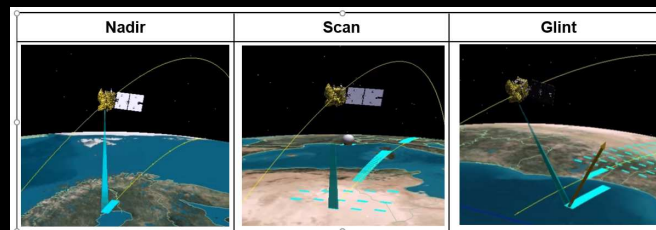
- 5 ans

Principe de la mesure – Spectromètre Passif SWIR

- Analyse du rayonnement solaire réfléchi par la Terre
- Le spectre solaire est modifié par interaction (absorption) avec les molécules présentes dans l'atmosphère
- Détection se fait dans 4 bandes
 - 2 bandes spécifiques du CO₂ (1.6µm, 2µm)
 - 2 bandes O₂ (0.76µm, 1.27µm)
- Mesures en NADIR, GLINT, SCAN



Spectre de raies d'absorption du CO₂ 1,6 µm



INSTRUMENT

Concept innovant basé sur un brevet Airbus Defense & Space

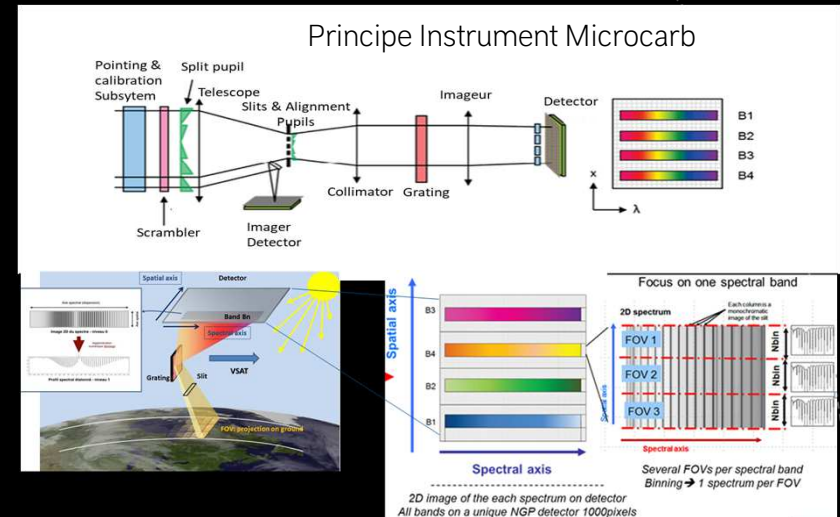
- Principe Séparation pupillaire et dans le champ
- Réseau échelle en configuration quasi Lithrow (multiplexage spectral)
- Forte compacité :
 - 1 seul télescope
 - 1 seul spectromètre SWIR à haute résolution spectrale
 - 4 bandes spectrales acquises sur le même détecteur SWIR
 - 1 Imageur (détection nuages) 550 nm – 700nm
 - 1 miroir de changement de visée 1 axe
 - Refroidissement passif (165K sur détecteur SWIR)

Spécifications géométriques

- 3 FOV 4.5 km (ACT) * 9 km (ALT)
- Bonne coregistration interbande < 10%
- Bonne coregistration intrabande < 280μrad (180m)

Spécifications radiométriques

- RSB > 200 (B1/B2/B4) & 133 (B3)
- Calibration absolue **< 4%** / Calibration interbande < 3%
- Connaissance de la Non Linéarité **< 0.1% (Obj), 0.2% (Seuil)**
- Polarisation **< 0.25%** en GLINT / 1 % en NADIR
- Lumière parasite : en tout point ghost < 5 . 10⁻⁶ / Intégré sur la zone utile < 10⁻²



Spécifications Spectrales

- Bandes Spectrales
 - B1 : 758.28 nm – 768.75 nm / B4 : 1264.6 – 1282.05 nm
 - B2 : 1596.76 nm – 1618.79 nm / B3 : 2022.97 nm – 2050.88 nm
- Résolution > **24000**, FWHM > 2.6 pixels
- Bonne caractérisation de la réponse spectrale (ISRF)
- Bonne connaissance de la réponse spectrale (ISRF) **< 0.5% (Obj), 1% (Seuil)**

Bilans Instrument

- Masse < 80Kg
- Consommation : ~44W (moyenne orbitale)
- Volume : ~460mm x 780 mm x 1310 mm

CARACTERISATIONS INSTRUMENT PFM

Mesures au niveau détecteur (banc de caractérisation développé à ADS / au CNES)

- Des mesures dans les conditions Microcarb (faibles flux) ont permis de mettre en évidence des défauts
- Ajout d'un Fond Optique Diffus (Led éclairant le détecteur) pour augmenter le signal
- Mise à jour du plan de caractérisation instrument

Mesures à l'ambiante lors du couplage Spectromètre / télescope / détecteur SWIR de calibration

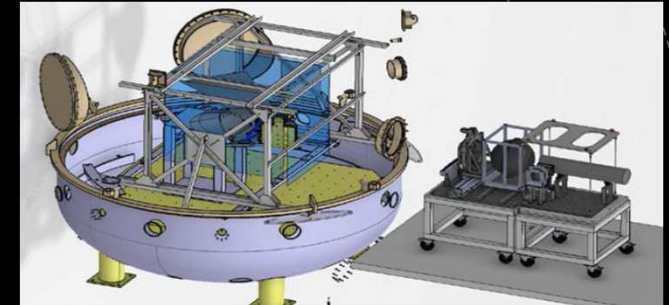
- Mise en évidence de certains défauts équipements (Rowland Ghost)
 - Validation du set up, des procédures et des outils de traitement de données
 - Premières estimations de performances
- ➔ Dérisking des mesures TVAC et adaptation de certaines mesures

Mesures en TVAC instrument (Détecteur refroidi à 160/165K) - 28 /09/2022 au 25/11/2022

- Cuve GAIA Airbus Defense & Space Toulouse
- Configuration instrument en Glint
- Lampe interne de calibration
- OGSE en salle et quelques éléments dans de la cuve

Mesures limitées en TVAC satellite - 02/10/2023 au 18/10/2023

- Pas d'OGSE
- Lampe interne de calibration, dark, Fond Optique Diffus



Configuration TVAC instrument – Instrument + OGSE

Set up Cuve GAIA



TVAC INSTRUMENT - OGSE

Set up Collimateur (NPL)

- Sources : Lumière blanche, laser, soleil, cellule CO2
- Masque de champ sur une platine de translation : Point source, un FOV, 3 FOV, fibres
- Shutter en sortie de la petite sphère pour effectuer des transitions de lumière rapide
- ➔ Mesures géométriques, radiométriques, spectrales

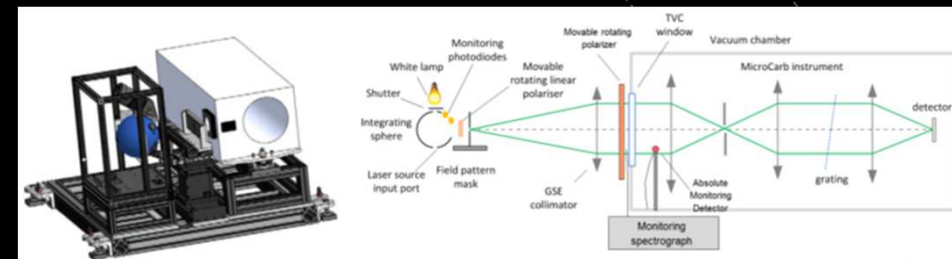
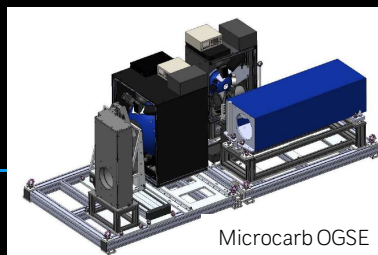
Set up Large Sphère (NPL)

- Labsphère Helios Source
- Eclairage en lumière blanche à différents niveaux de luminance
- Source étalonnée en absolue (durée limitée à 40h)
 - Calibration NPL 2021 / Calibration PTB 2023
 - 8 à 13 % de différence
- Mesures radiométriques à différents flux

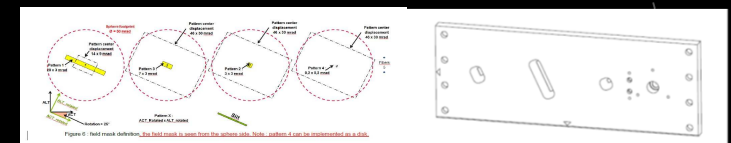
Polariseur linéaire en sortie des deux OGSE

- Mesure en lumière polarisée et non polarisée

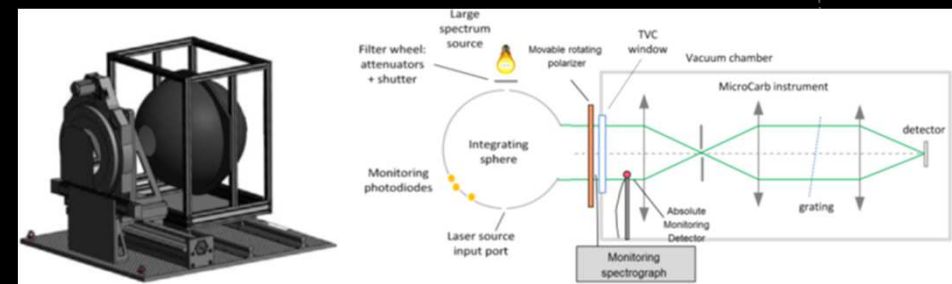
Shutter en sortie des OGSE



OGSE – Set up Collimateur



Masques de champ



OGSE – Set up Large Sphère

TVAC sensor dans la cuve dans un plan pupille (Monitoring spectrograph)

- 2 photodiodes (1 silicium et 1 InGaAs)
- 1 spectroradiomètre fibré

TVAC INSTRUMENT - OGSE

Laser accordable Msquared

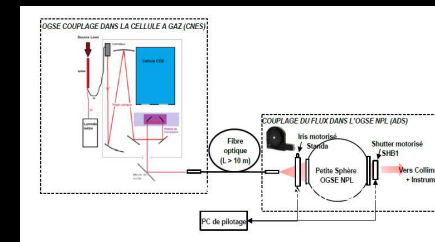
- Loué uniquement pour la durée du TVAC
- Quelques anomalies lors des tests liées à la mise en place tardive du set up
 - Lambdamètre non connecté à l'EGSE AIT
 - Saut de longueurs d'onde
 - Sensibilité au flushage

LASER Accordable Msquared	Pas	FWHM	Connaissance et stabilité λ
B1	< 1.06GHz (2pm)	< 55MHz (0.1pm)	< 55MHz (0.1pm)
B2	< 520MHz (4.4pm)	< 26MHz (0.2pm)	< 26MHz (0.2pm)
B3	< 400MHz (5.7pm)	< 20MHz (0.3pm)	< 20MHz (0.3pm)
B4	< 650MHz (3.6pm)	< 33MHz (0.18pm)	< 33MHz (0.18pm)

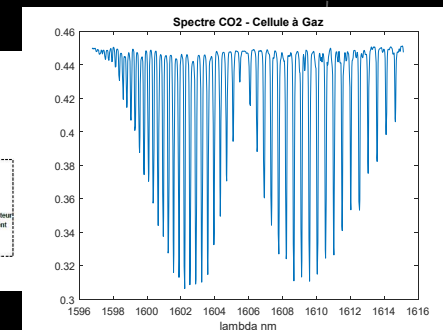
Cellule à Gaz CO₂ - Acquisition d'un spectre CO₂ en B2

- Banc cellule à Gaz fourni par le CNES
- Couplage au set up collimateur par fibre optique
- Ajout d'un diaphragme pour faire des mesures à différents flux

Héliostat – Voir présentation de Denis Jouglet *Essai solaire de l'instrument MICROCARB*, pendant le vide thermique



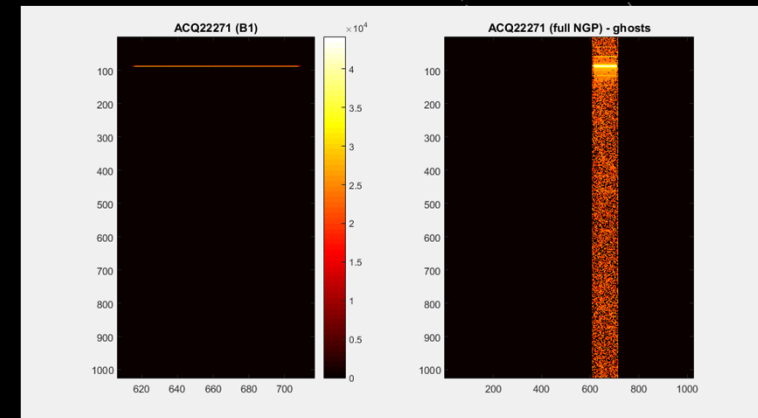
Set up cellule à Gaz et Spectre CO₂



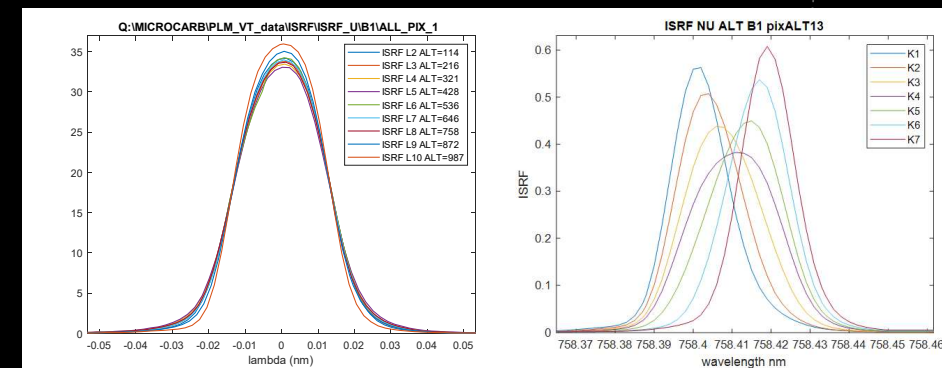
MESURES SPECTRALES

Dans chaque bande spectrale, on mesure la réponse en 10 canaux (set up collimateur + Laser accordable + masques de champ)

- En scène uniforme : 300 points de mesures par canal réparties sur +/- 10 FWHM par pas de FWHM/15
 - En scène non uniforme ACT : 15 positions de masque, 1 mesure par canal
 - En scène non uniforme ALT : 7 positions de masque, entre 20 et 50 points mesurés par canal répartis sur +/- 2 pixels à 10 pixels
- Mesures longues (10 jours) ce qui explique le choix de faire une caractérisation partielle et de faire une interpolation pour obtenir les ISRF de tous les canaux
- Processing préliminaire des mesures pendant le TVAC : Rejeu de certaines longueurs d'onde (saut laser) et complément des mesures en B2 & B4 .
- Très bonne résolution spectrale > 24000, bandes spectrales conformes et forme de la réponse spectrale proche d'une gaussienne
- Travail en cours pour améliorer la connaissance de la réponse spectrale (ISRF) (Rappel du besoin $\leq 0.5\%$ (Obj), 1% (Seuil))



Balayage laser pour mesurer l'ISRF



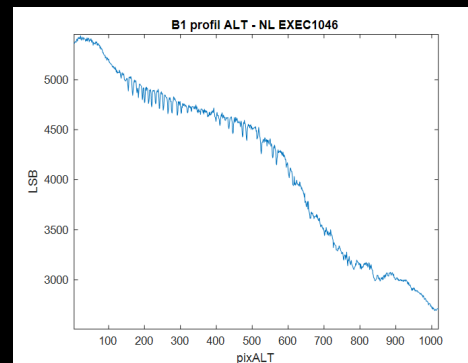
ISRF B1 en 10 canaux

ISRF B1 canal 13 en scène non uniforme (7 positions de masques)

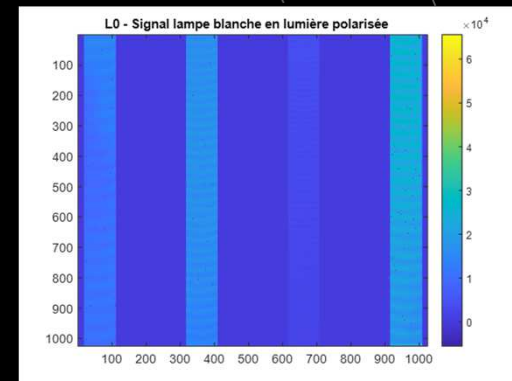
MESURES RADIOMÉTRIQUES

Mesure de polarisation (set up Large Sphère) à fort flux

- Observation de doublets O2 en B1 en lumière non polarisée
 - Observation d'interférences dans le polariseur, moyennage dans la bande
 - Limitation par le bruit de mesure (0.1%)
- Bonne performance de polarisation (< 0.25% en position Glint)



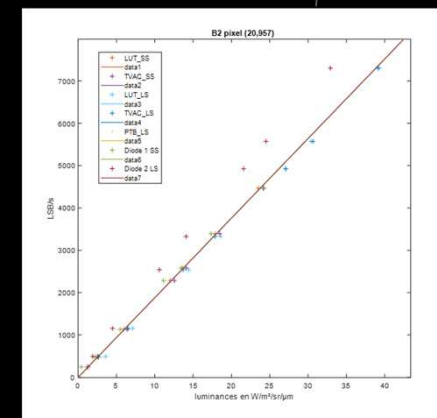
Mesure B1 avec la Large Sphère



Mesure fort flux avec polariseur

Mesures à différents niveaux de luminances avec les deux set up pour calibrer la Non Linéarité et estimer le rapport signal à bruit

- Les mesures donnent des résultats différents pour la NL .
- 3/5 configurations donnent des gains non linéaires proches
- Mesure de non linéarité très complexe
- Fort besoin de précision (connaissance de la NL < 0.2%)
 - Gamme de dynamique très large (niveau fond de raie jusqu'au continuum)
- Les analyses se poursuivent (discussion en cours avec le NPL)



Mesures de non linéarité (Signal LSB en fonction de la luminance)

MESURES RADIOMÉTRIQUES

Mesures de rémanence

- Sensibilité au niveau de signal, de FOD et de la température

→ Validation de la performance de rémanence

Mesures Lumière parasite – Mesure Fort Flux

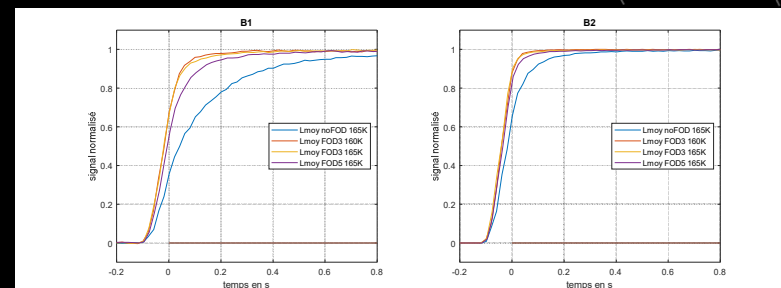
- Les mesures en configuration point source n'ont pas permis d'atteindre le niveau suffisant (Objectif : $10^{-5}/10^{-6}$)
- Décision de faire des mesures en éclairant un FOV
- Utilisation des mesures géométriques et héliostat pour estimer le niveau

→ Estimation du niveau de lumière parasite en cours

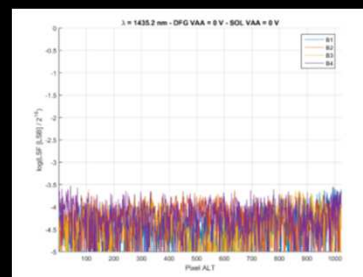
Mesures Lumière parasite hors bandes

- Laser Msquared + set up collimateur
- Plusieurs longueurs d'onde émises entre 700nm et 2100 nm

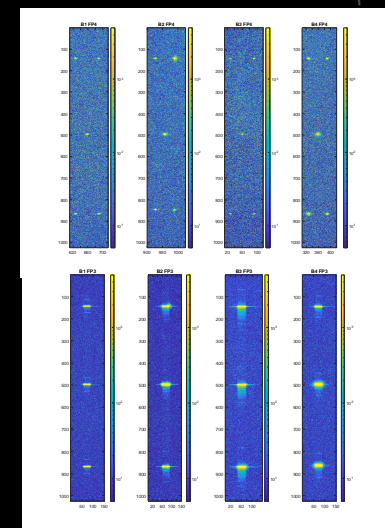
→ Les ordres parasites du réseau restent faible et en ligne avec les calculs théoriques ($<10^{-5}$)



Mesures de rémanence B1/B2 – Transitions de lumière



Mesures de lumière parasite hors bande



Mesures de lumière parasite – Point source et un FOV éclairé

MESURES GÉOMÉTRIQUES

Utilisation du set up collimateur

- Déplacement du masque de champ (champ complet) dans l'axe ALT (130 positions)
- Déplacement du masque de champ (1 FOV) dans l'axe ACT (49 positions)
- Mesures en scène polarisée et non polarisée

→ Processing des mesures

→ Calcul de la coregistrations intrabande et interbande

→ Calcul de la forme du FOV (FOV Spread Function)

→ Résultats proches des valeurs attendues

- Bonne caractérisation au niveau équipement
- Bon alignement des optiques
- Performances conformes aux spécifications

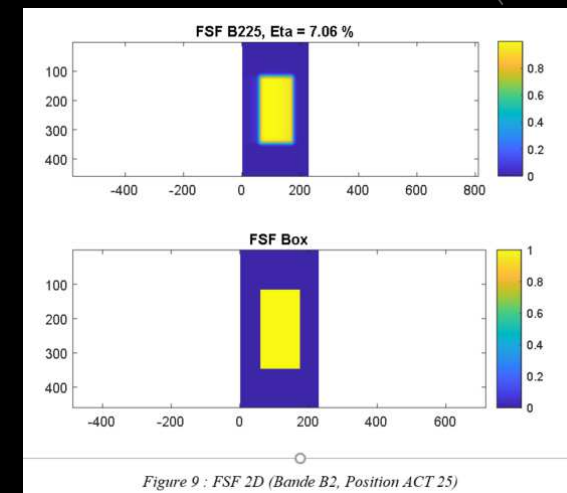
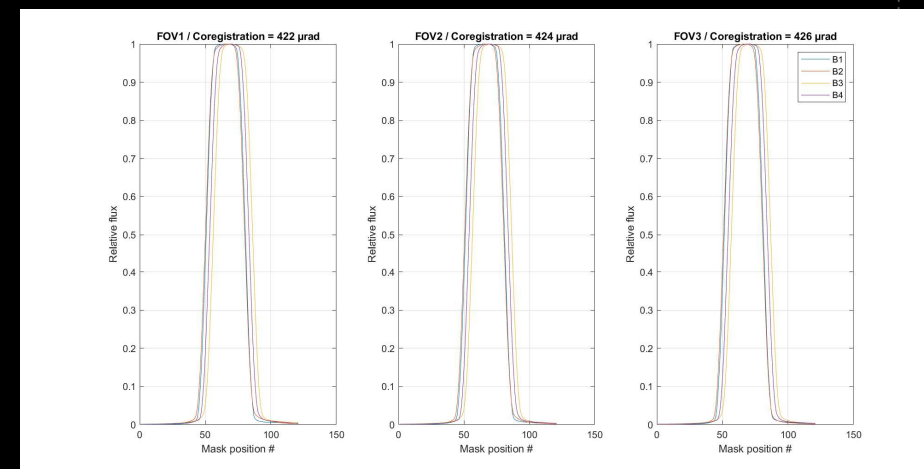


Figure 9 : FSF 2D (Bande B2, Position ACT 25)

Forme du FOV

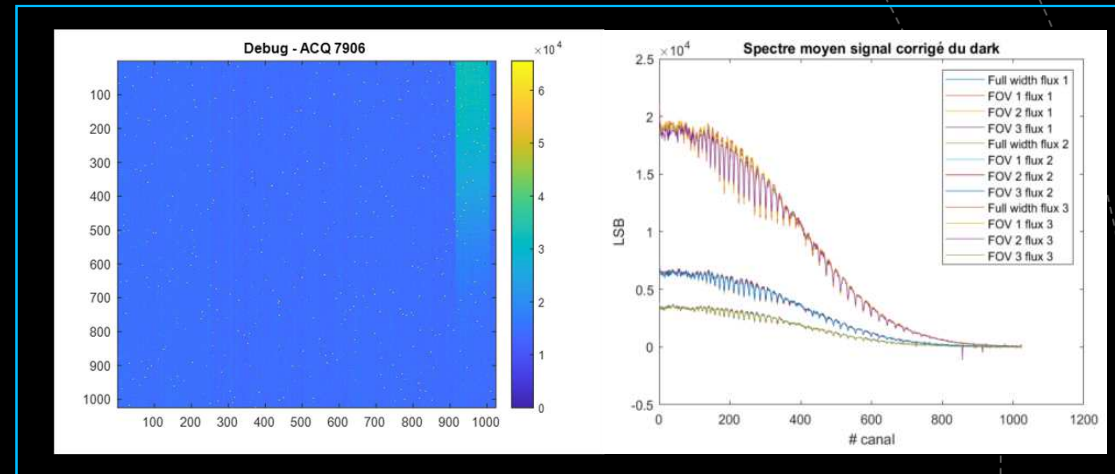


Coregistration interbandes

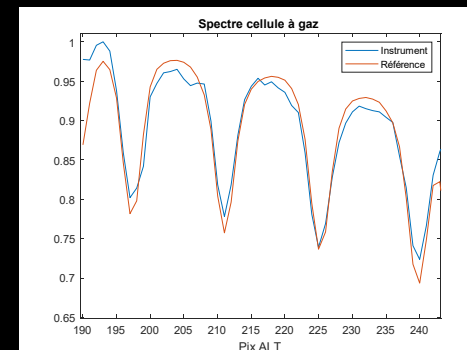
MESURES CELLULE À GAZ - B2

Objectif : Validation de l'instrument dans une configuration représentative du vol (spectre en absorption en B2)

- Spectre CO₂ mesuré à l'aide d'un laser accordable et d'une photodiode → Spectre de référence
 - Spectre CO₂ acquis par l'instrument Microcarb
 - Estimation du cross talk entre bandes
 - Mesure à différents niveaux de flux en B2 uniquement
 - Application des paramètres de calibration radiométrique et spectrale (darks, PRNU, Non linéarité, loi de dispersion) pour obtenir des spectres étalonnés
- Comparaison du spectre mesuré par l'instrument et du spectre de référence convolué par les ISRF instruments (réponses spectrales)
- Permet de valider les paramètres de calibration et les traitements de correction



Spectres niveaux 0 et après binning



Comparaison Spectre mesuré par l'instrument / Spectre référence

SYNTHÈSE

Les mesures au niveau équipement ne permettent pas toujours de mettre en exergue certains défauts

- Les set up de mesures ne sont pas toujours adaptés
- Les mesures doivent si possible être faites dans une configuration représentative du fonctionnement instrument

Spécifications instruments de plus en plus exigeantes

- Impact sur les OGSE qui doivent être plus performants et bien maîtrisés
- Démarrer le développement des OGSE au plus tôt
- Anticiper les mesures OGSE + instrument

Sur MICROCARB, l'exploitation des mesures TVAC est toujours en cours (600Go de données).

- De nombreux moyens ont été mis en place pour caractériser au mieux l'instrument.
 - La multiplicité des OGSE et des mesures permet de mieux identifier les défauts venant de l'OGSE et de l'instrument
 - Une première analyse des mesures a permis d'estimer les performances de l'instrument. Un reprocessing des mesures est en cours pour extraire de nouvelles informations et mieux corriger les données.
- ➔ L'exploitation se poursuit afin d'améliorer la connaissance de l'instrument, de trouver le point de fonctionnement optimal (température, niveau de FOD) et préparer le plan de cal/val

