

Développements instrumentaux à l'Onera pour l'imagerie hyperspectrale infrarouge

Yann Ferrec, Christophe Coudrain, Laurence Croizé, Nicolas Guérineau,
Armande Pola Fossi, Sylvain Rommeluère, Laurent Rousset-Rouvière

**5e Colloque du Groupe Hyperspectral –
Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection**

Brest, 9 mai 2017



Imagerie hyperspectrale au département d'optique

- **Exploitation des données hyperspectrales** (Toulouse, Palaiseau),
 - essentiellement pour de la télédétection ou de la caractérisation de jets
 - activités pour les sciences de l'atmosphère en développement
- **Mise en œuvre de capteurs hyperspectraux** (Toulouse, Palaiseau)
 - au sol ou aéroportés
 - instruments achetés sur étagère ou développés à l'Onera
- **Développements d'imageurs hyperspectraux** (Palaiseau)
 - principalement (mais pas exclusivement) dans l'infrarouge
 - 2 concepts exploités: filtres multivoies ou interféromètres statiques

- 1. Filtres multivoies**
- 2. Sielelers**
- 3. Sibi**
- 4. Microspoc imageur**

1. Filtres multivoies

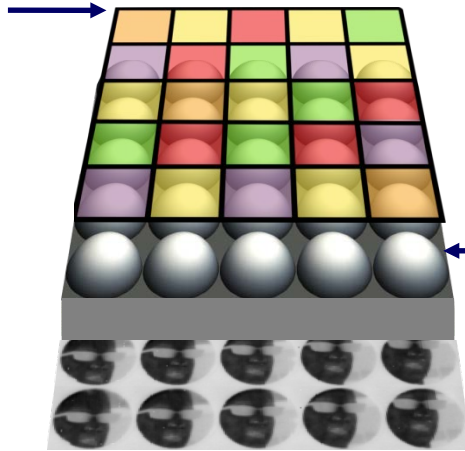
2. Sielelers

3. Sibi

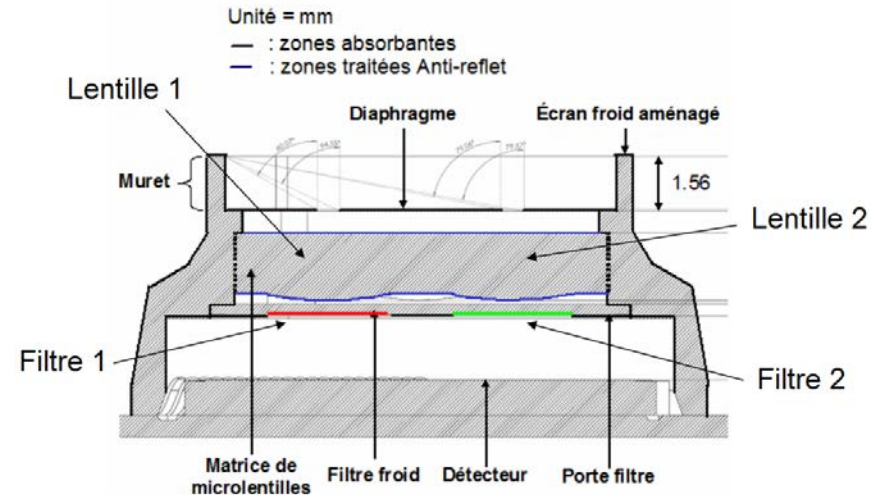
4. Microspoc imageur

Filtres multivoies

matrice de filtres



matrice de mini-lentilles



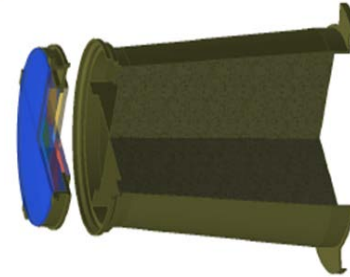
- concept multispectral *snapshot*
- grande compacité
- possibilité d'être entièrement cryogénique

R. Shogenji et al., "Multispectral imaging using compact compound optics," Opt. Express **12**, 1643 (2004)

N. Guérineau et al., "Compact designs of Hyper- or Multi-spectral Imagers Compatible with the Detector Dewar", proc. SPIE Vol. 8012, 2011

Filtres multivoies

- Caméras quadrichromes (MWIR ou LWIR) pour la détection de gaz

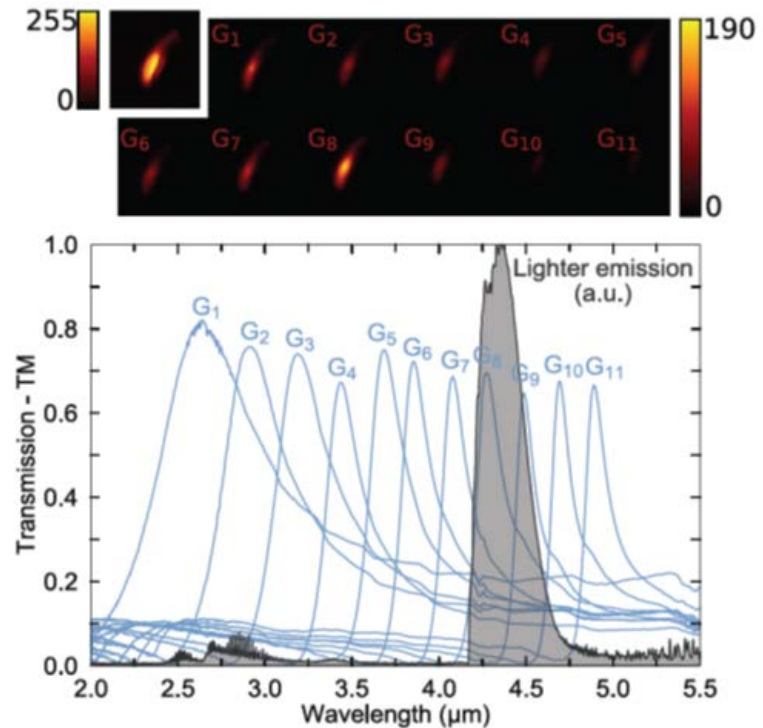


- Augmentation du nombre de bandes (>20): difficulté de réaliser la matrice de filtres

⇒ utilisation de filtres plasmoniques

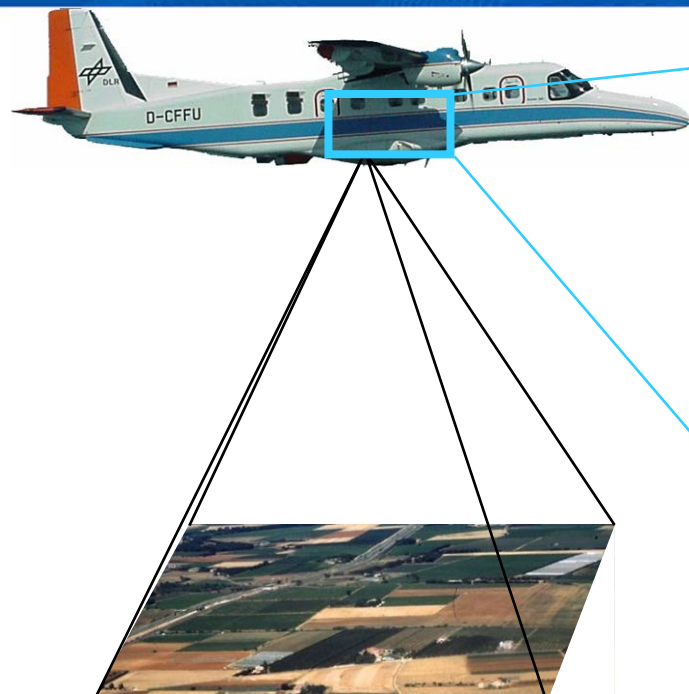
gregory.vincent@onera.fr

R. Haïdar et al., "Free-standing sub-wavelength metallic gratings for snapshot multispectral imaging", Appl. Phys. Lett. 96, 221104 (2010)



1. Filtres multivoies
- 2. Sielelers**
3. Sibi
4. Microspoc imageur

Sieleters : composante infrarouge de Sysiphe



VISNIR et SWIR:
Hypspex-Odin 1024 (NEO)



MWIR et LWIR:
Sieleters (Onera)



Système de Traitement et
d'Archivage des Données



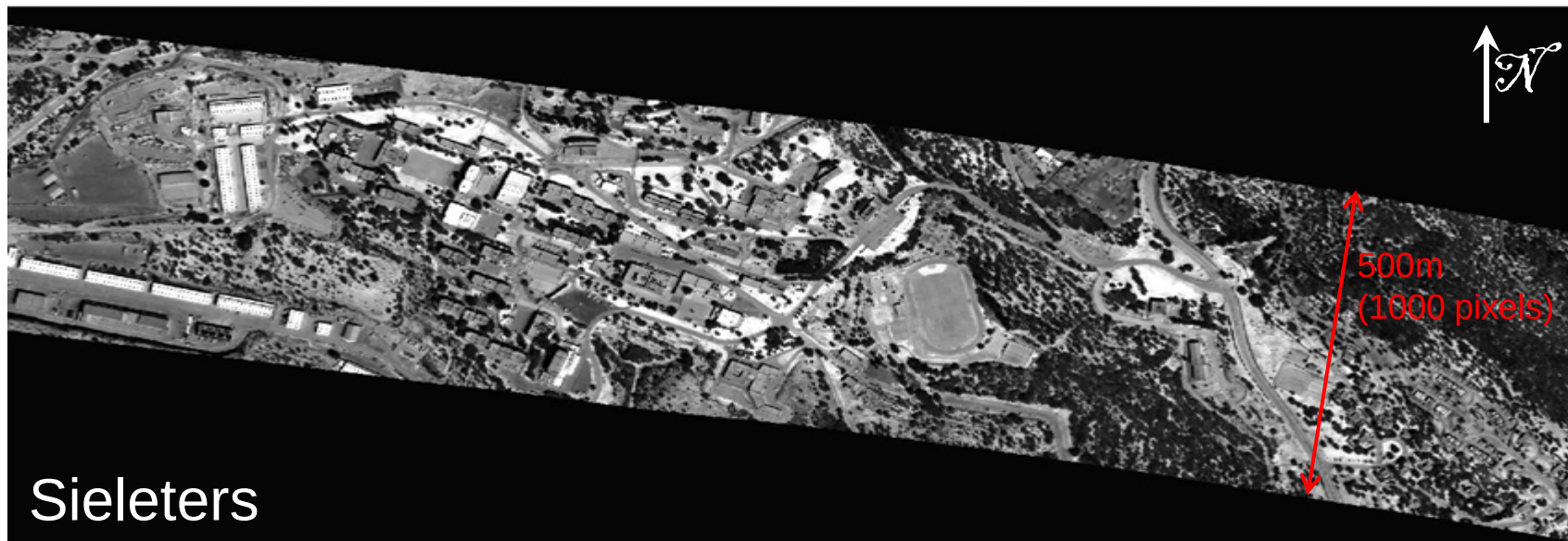
Images géoréférencées :

- **luminance spectrique**
- **réflectance / émissivité / température**

laurent.rousset-rouviere@onera.fr

L. Rousset-Rouviere et al. "Sysiphe, an airborne hyperspectral imaging system from visible to thermal infrared. Results from the 2015 airborne campaign,"
Proc. 10th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy (2017)

Sieleters : composante infrarouge de Sysiphe



Sieleters



Odin

Sieleters : caractéristiques

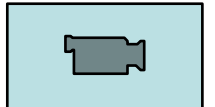
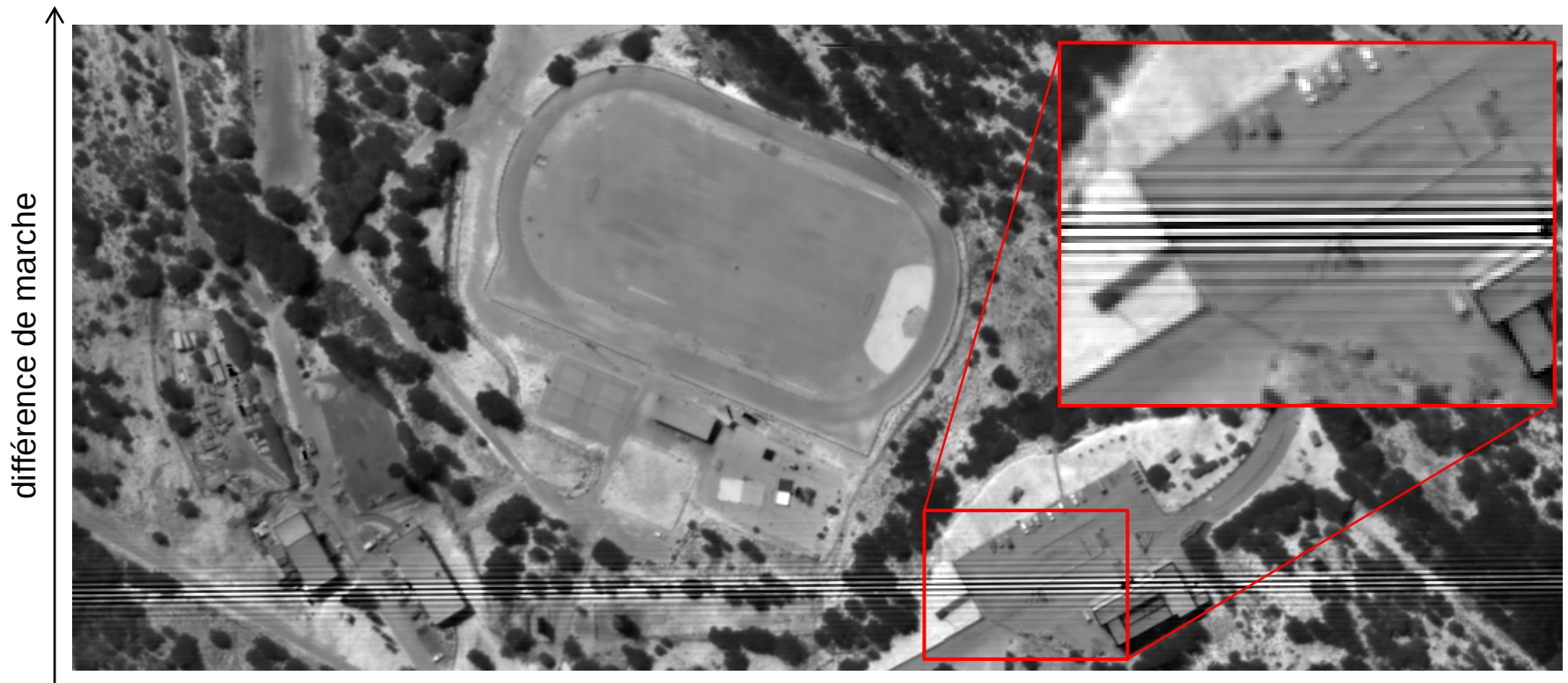
- 2 spectromètres imageurs
- $[3,1\mu\text{m} - 5,3\mu\text{m}]$, 10cm^{-1}
et $[8,1\mu\text{m} - 11,5\mu\text{m}]$, 5cm^{-1}
- entièrement cryogéniques
- interféromètres de Michelson à dièdres
- IFOV=0,25 mrad (50cm à 2000m)
- financé par la DGA
- accessible à des utilisateurs externes (possibilité de ne faire voler qu'un seul instrument)



C. Coudrain et al., "SIELETERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures"
Opt. Express 23, 16164-16176 (2015)

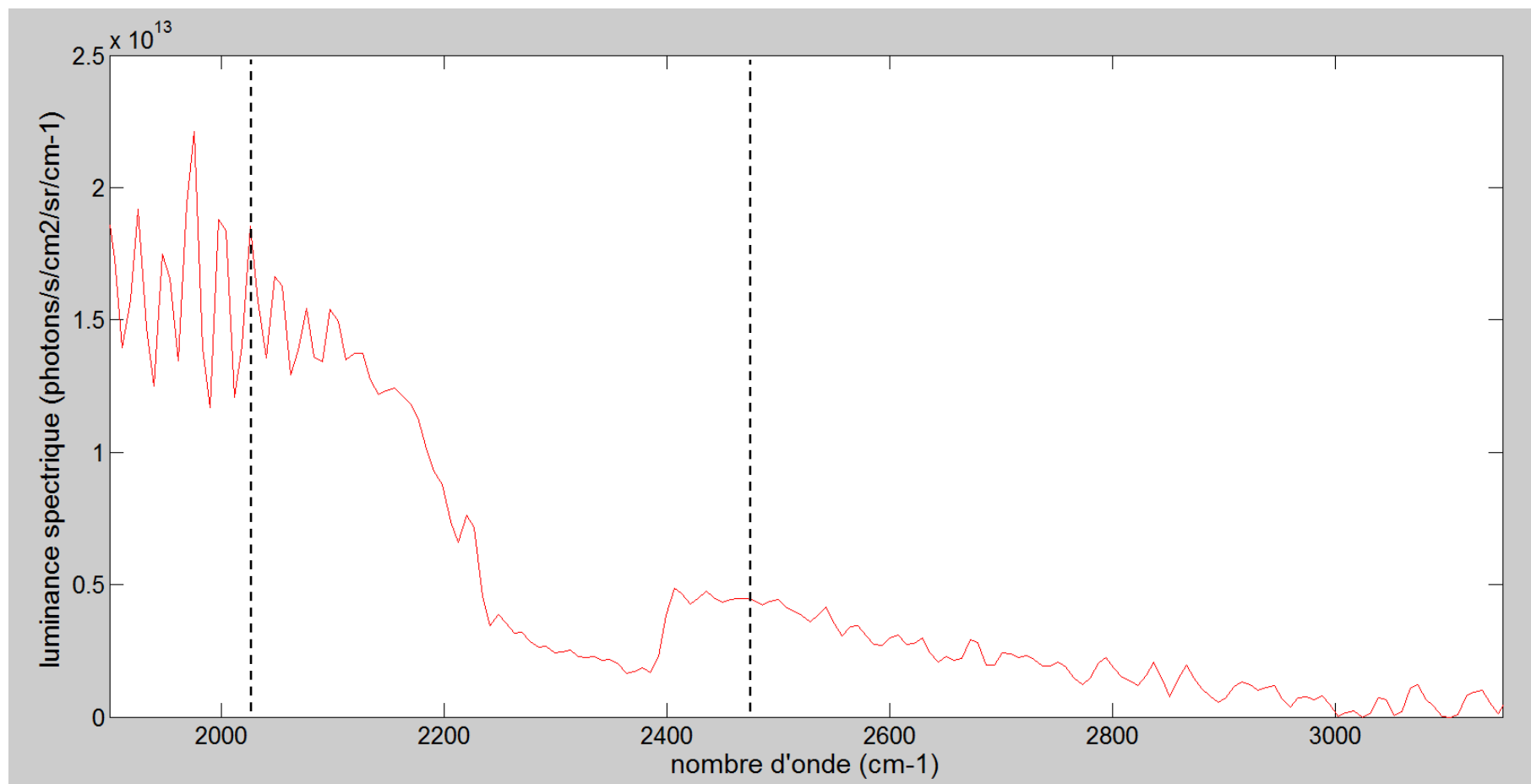
Sieleters : principe d'acquisition

- 1 ligne = 1 différence de marche
- balayage de la scène => chaque point va être vu à chaque différence de marche



Sieleters MWIR : exemples de résultats

spectre d'1 point



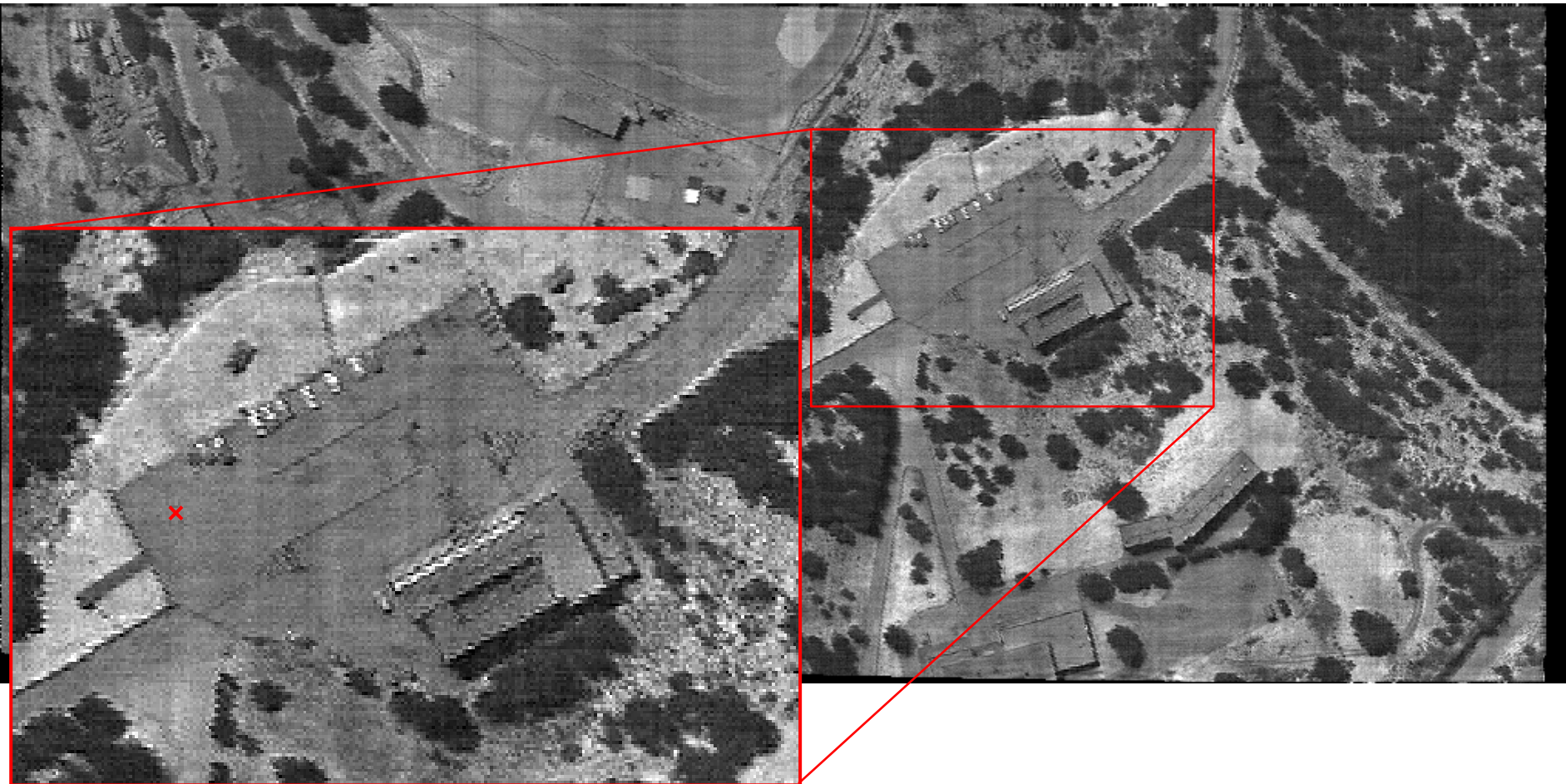
Sieleters MWIR : exemples de résultats

image monochromatique à $4,0\ \mu\text{m}$



Sieleters MWIR : exemples de résultats

image monochromatique à $4,0\ \mu\text{m}$



Sieleters MWIR : exemples de résultats

image monochromatique à $4,9\ \mu\text{m}$



Sieleters MWIR : exemples de résultats

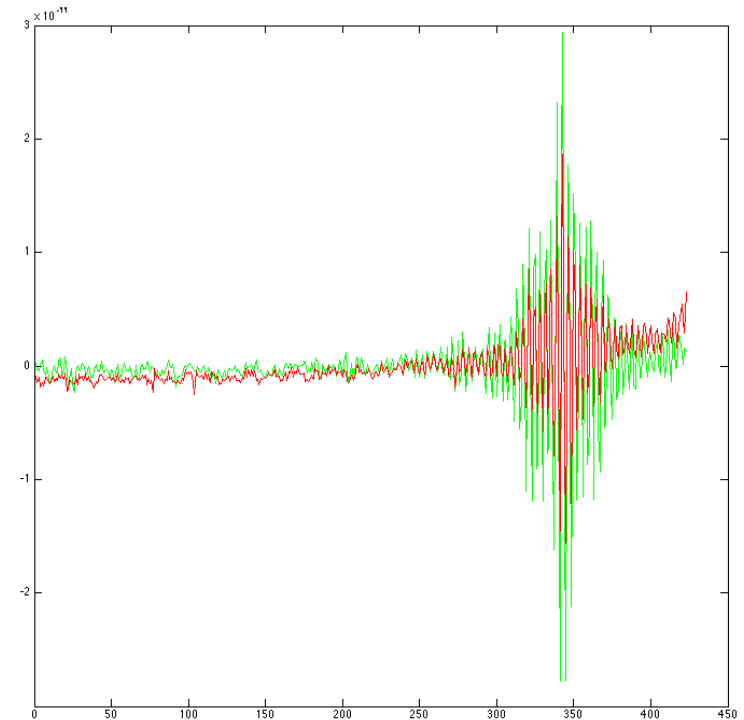
image monochromatique à $4,9\ \mu\text{m}$



Sieleters : estimation du relief

variations d'élévation non prises en compte

⇒ mauvaises correspondances dans la construction des interférogrammes



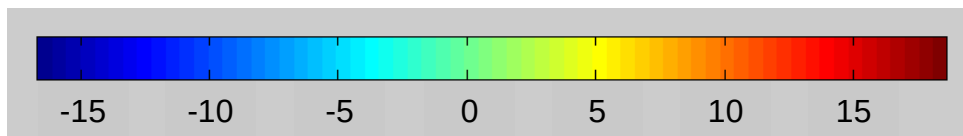
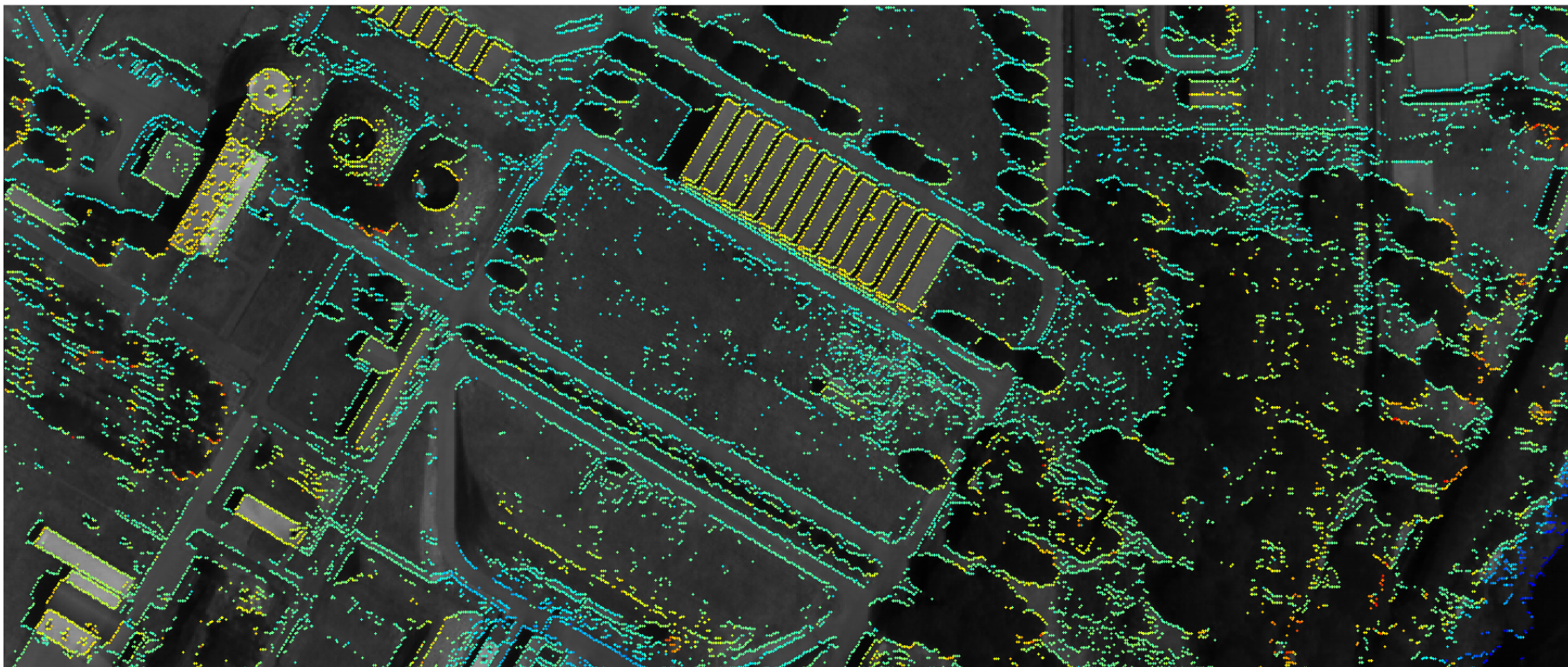
thèse de Clara Barbanson, dir. de thèse: Andrés Almansa (Université Paris V, andres.almansa@parisdescartes.fr) et Pascal Monasse (ENPC, monasse@imagine.enpc.fr)

Sieleters : estimation du relief



C. Barbanson et al., "Relief Computation from Images of a Fourier Transform Spectrometer for Interferogram Correction,"
Proc. Fourier Transform Spectroscopy, Optical Society of America (2016)

Sieleters : estimation du relief



C. Barbanson et al., "Relief Computation from Images of a Fourier Transform Spectrometer for Interferogram Correction,"
Proc. Fourier Transform Spectroscopy, Optical Society of America (2016)

1. Filtres multivoies
2. Sielelers
- 3. Sibi**
4. Microspoc imageur

Sibi : interféromètre biréfringent

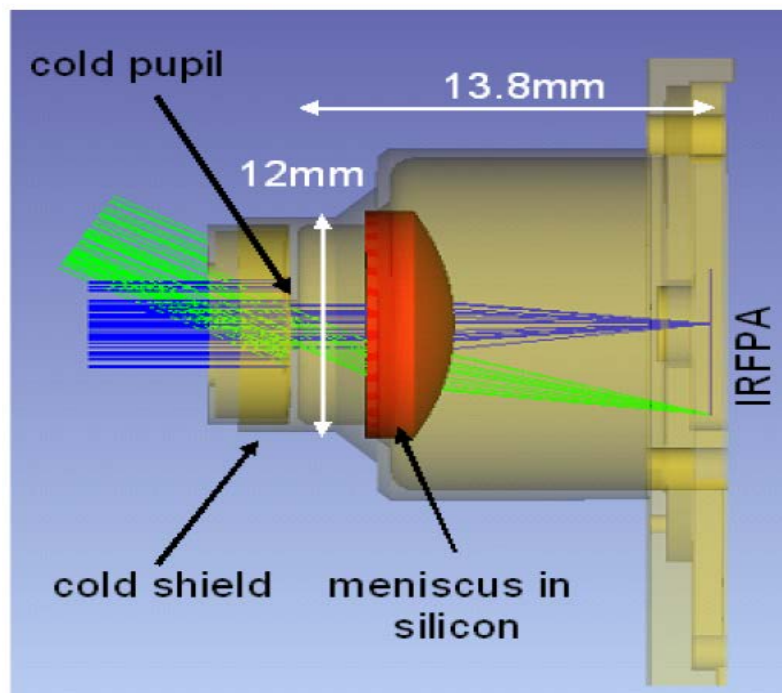
Objectif: intégrer un spectro-imageur MWIR sur drone léger

- ⇒ réduire l'encombrement / la masse
- ⇒ quitte à dégrader la résolution spatiale

Sibi : interféromètre biréfringent

Objectif: intégrer un spectro-imageur MWIR sur drone léger

- ⇒ réduire l'encombrement / la masse
- ⇒ quitte à dégrader la résolution spatiale



caméra Soie :

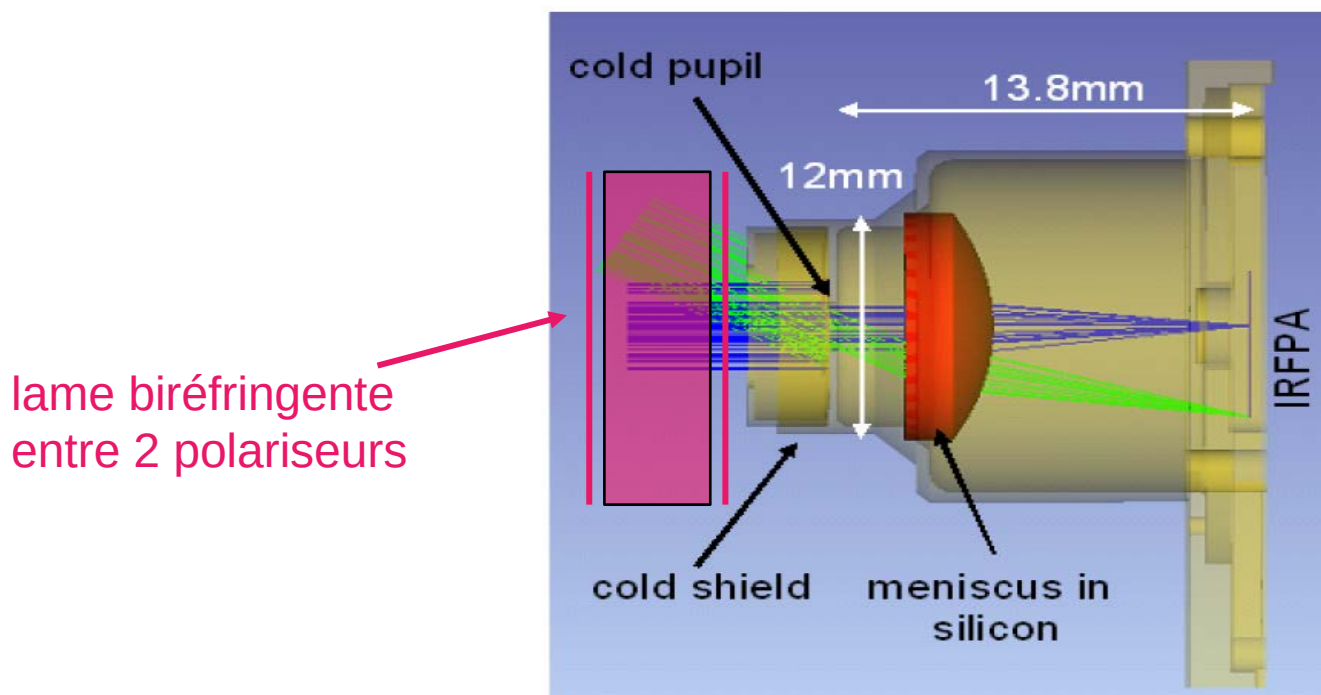
- intégrée dans le cryostat
- $f' = 9,6\text{mm}$
- $[3,7\mu\text{m} ; 4,8\mu\text{m}]$

G. Druart et al., "Towards infrared DDCA with an imaging function,"
Proc. SPIE 8012, 801228 (2011)

Sibi : interféromètre biréfringent

Objectif: intégrer un spectro-imageur MWIR sur drone léger

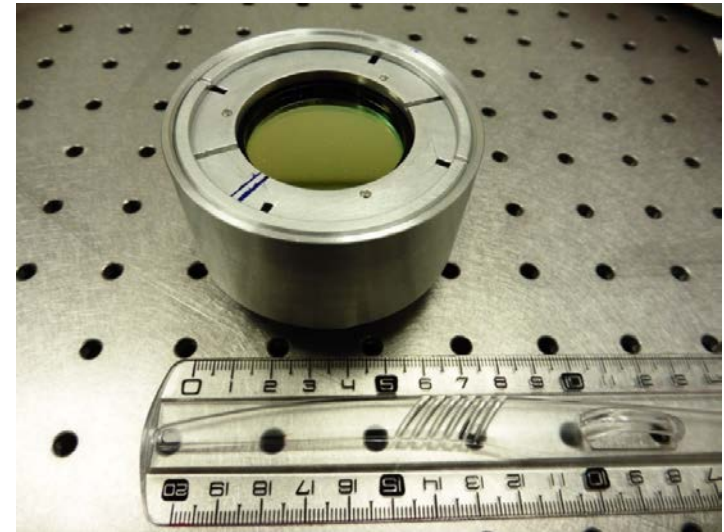
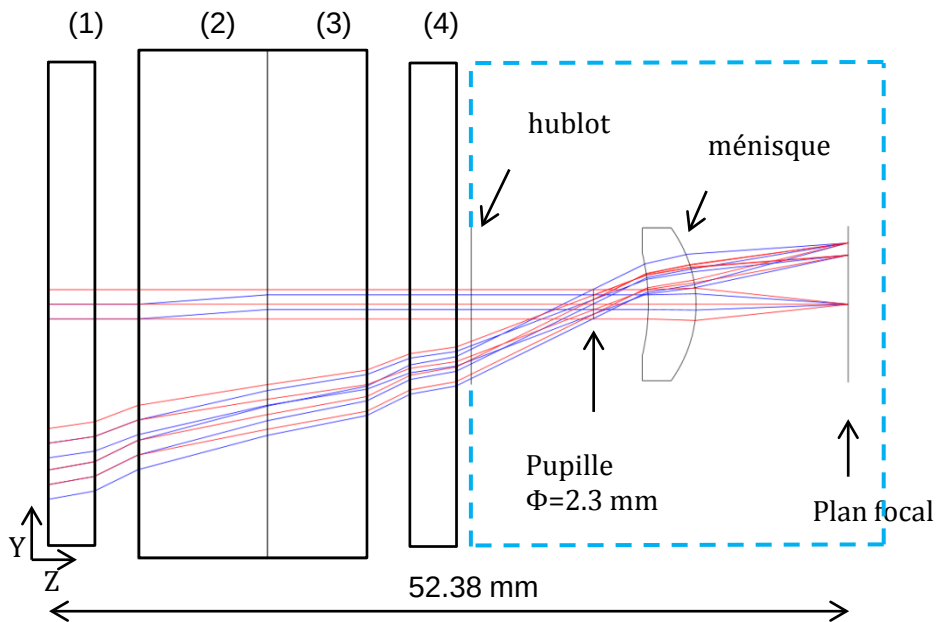
- ⇒ réduire l'encombrement / la masse
- ⇒ quitte à dégrader la résolution spatiale



- caméra Soie :
- intégrée dans le cryostat
 - $f' = 9,6\text{mm}$
 - $[3,7\mu\text{m} ; 4,8\mu\text{m}]$

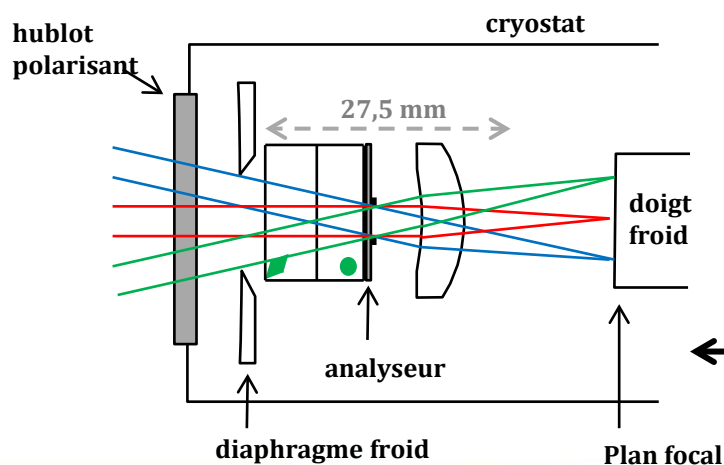
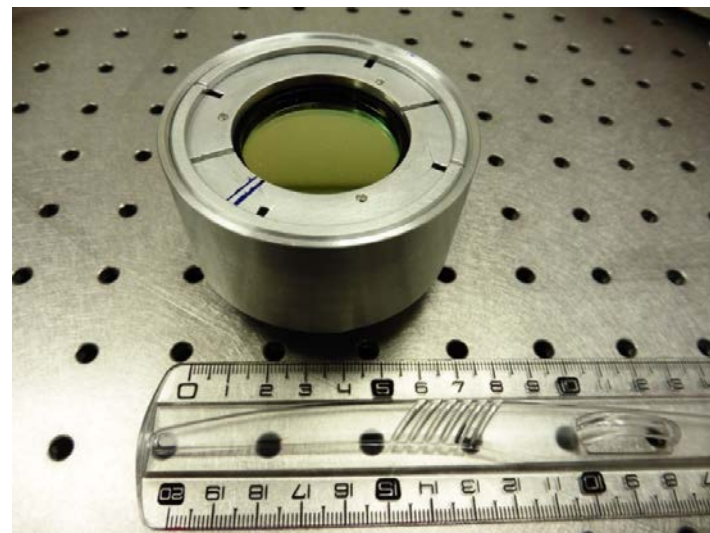
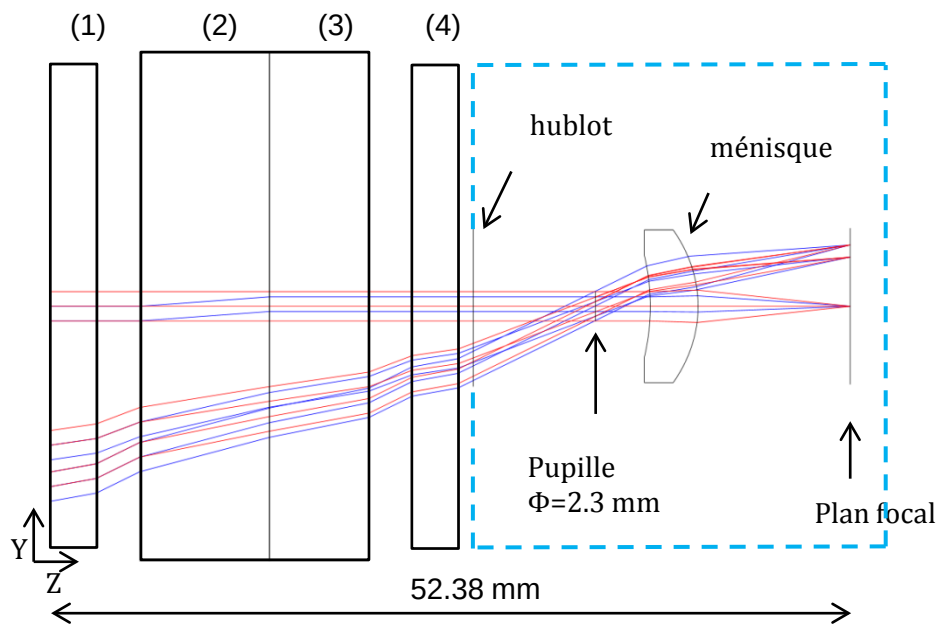
G. Druart et al., "Towards infrared DDCA with an imaging function,"
Proc. SPIE 8012, 801228 (2011)

Sibi : interféromètre biréfringent



- interféromètre en TeO_2
- pupille inaccessible $\Rightarrow$
 - $\varnothing$ 6 cm x 3 cm d'épaisseur
 - ~500 g

Sibi : interféromètre biréfringent



- interféromètre en TeO_2
- pupille inaccessible $\Rightarrow$
 $\varnothing$ 6 cm x 3 cm d'épaisseur
 ~500 g

ce qu'on aurait aimé faire...

Sibi : caractéristiques

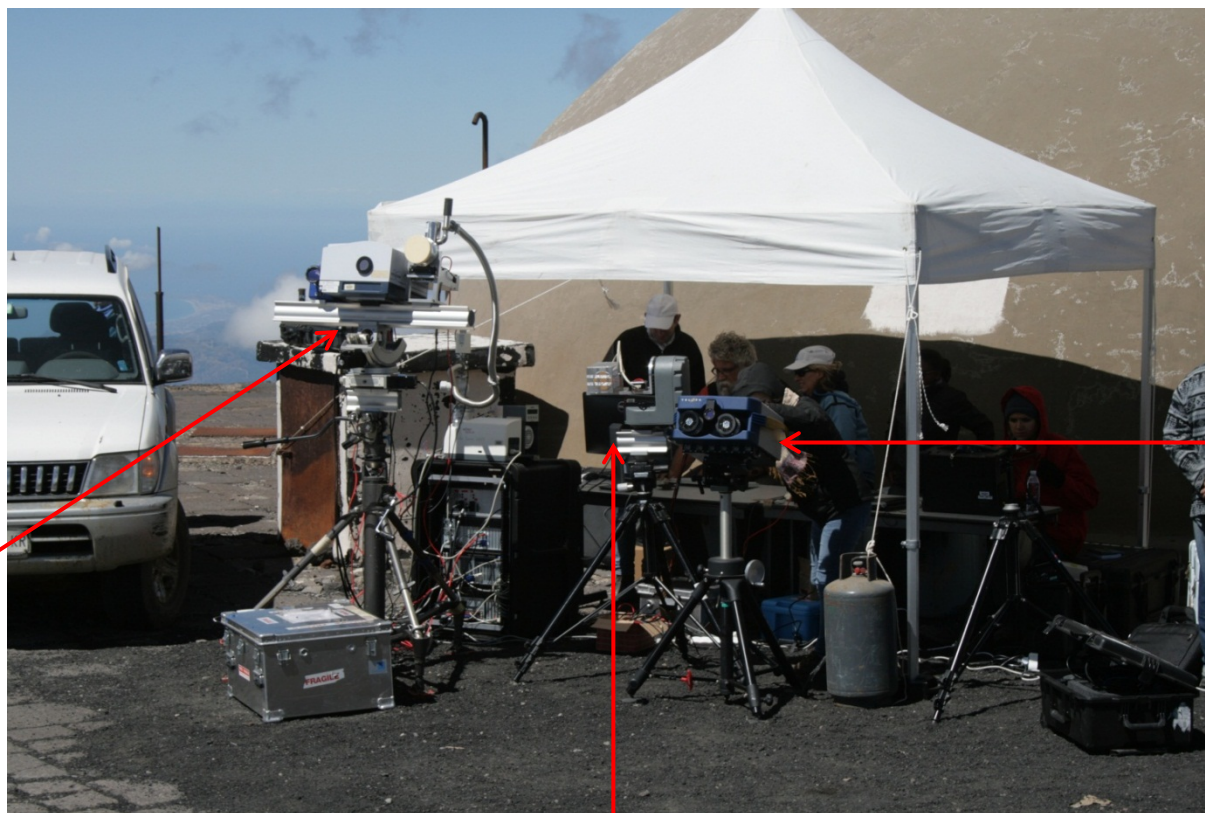
- interféromètre de Savart
- $[3,7\mu\text{m} - 4,9\mu\text{m}]$, 13cm^{-1}
- sur tourelle ou sur drone
- $<3\text{kg}$, $12 \times 12 \times 20\text{ cm}^3$
- thèse d'Armande Pola Fossi, cofinancée par Sagem (nicolas.roux3@safrangroup.com), en partenariat avec l'Institut d'Optique (herve.sauer@institutoptique.fr)



A. Pola Fossi et al., "Miniature and cooled hyperspectral camera for outdoor surveillance applications in the mid-infrared"
Opt. Lett. 41, 1901-1904 (2016)

Sibi : exemples de résultats

Campagne ImagEtna (évaluer l'apport de l'imagerie spectrale infrarouge pour la quantification des gaz émis dans le panache du volcan)



Caméra Flir
(LWIR)

OPAG 33
(Bruker)

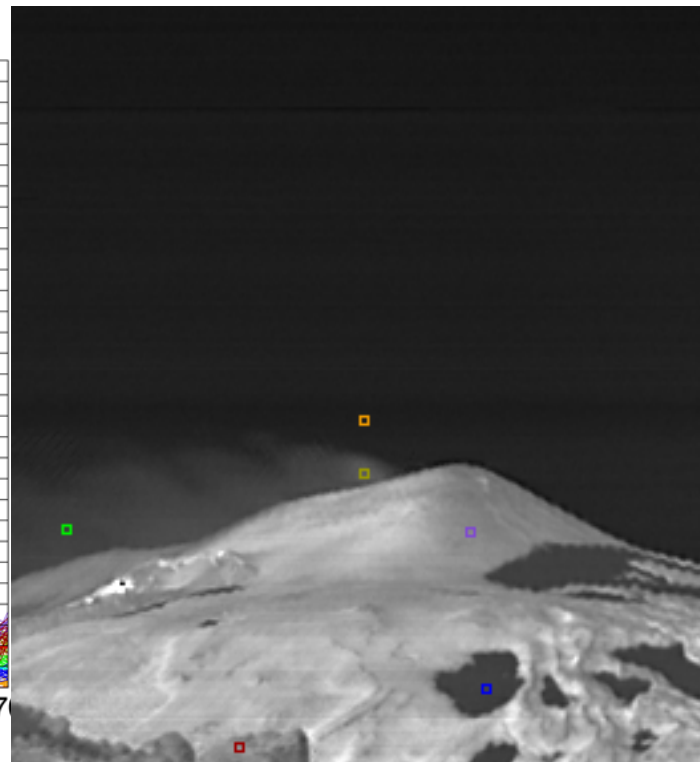
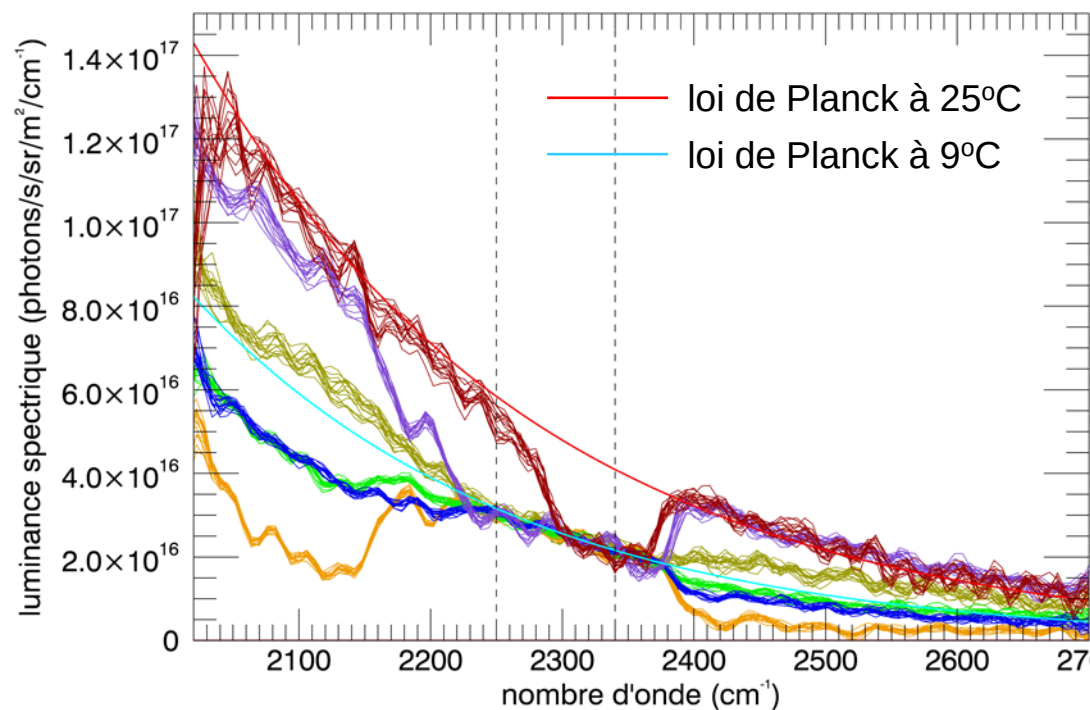
VITRIL
(Onera)

HyperCam LW
(Telops)

SIBI (Onera)



Sibi : exemples de résultats



bruit estimé dans la bande d'absorption du CO₂:

NESR: 11 nW/sr/cm²/cm⁻¹

NETD: 880 mK @ 2100cm⁻¹, T_{CN}=20°C



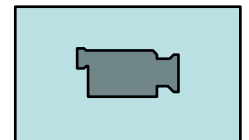
Sibi : vers une intégration sur drone

partenariat *Drosofile* (Onera/SNCF) :

- drone Helipse
- thème 4 = développement d'une boule stabilisée et intégration de capteurs

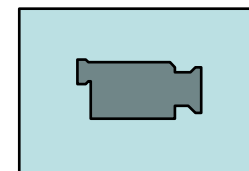
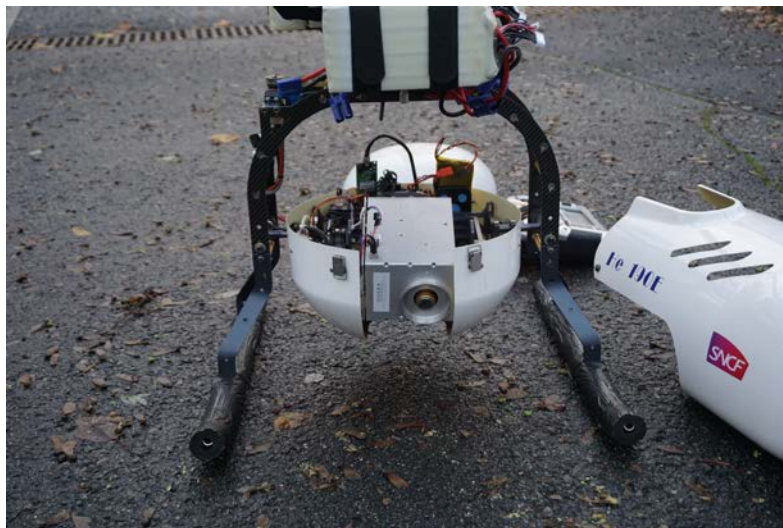


christophe.coudrain@onera.fr



Sibi : vers une intégration sur drone

- intégration de la caméra sans l'interféromètre
- à court terme, intégration de Sibi



1. Filtres multivoies
2. Sielelers
3. Sibi
- 4. Microspoc imageur**

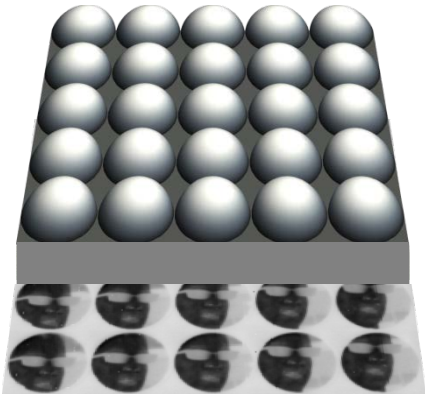
Microspoc imageur : principe d'acquisition

Objectif : réaliser un spectro-imageur, *snapshot*, compact, à haute résolution spectrale

Microspoc imageur : principe d'acquisition

Objectif : réaliser un spectro-imageur, *snapshot*, compact, à haute résolution spectrale

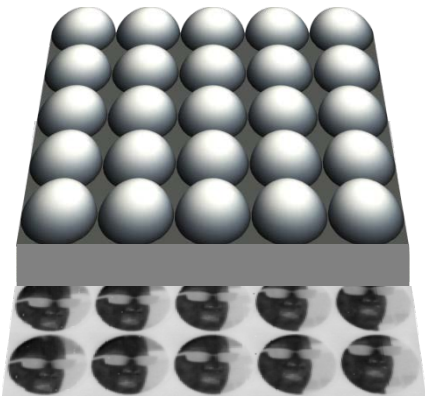
montage multivoies :



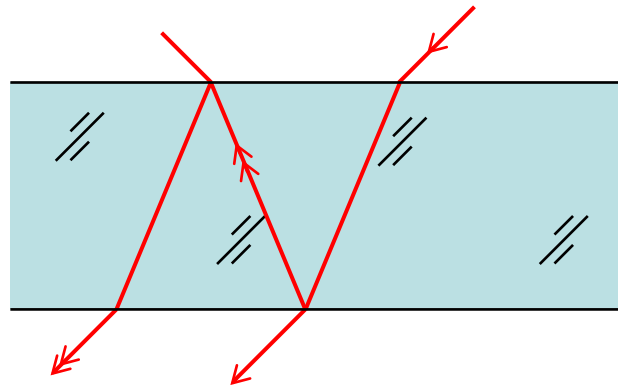
Microspoc imageur : principe d'acquisition

Objectif : réaliser un spectro-imageur, *snapshot*, compact, à haute résolution spectrale

montage multivoies :



interféromètre de Fizeau :

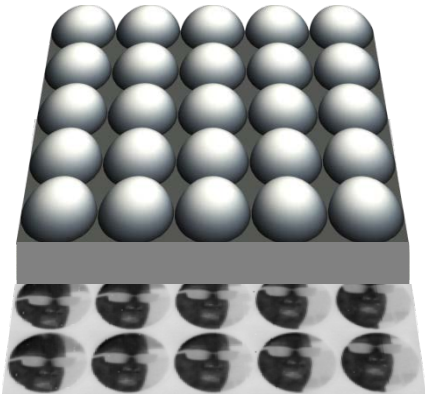


interférences à 2 ondes majoritairement

Microspoc imageur : principe d'acquisition

Objectif : réaliser un spectro-imageur, *snapshot*, compact, à haute résolution spectrale

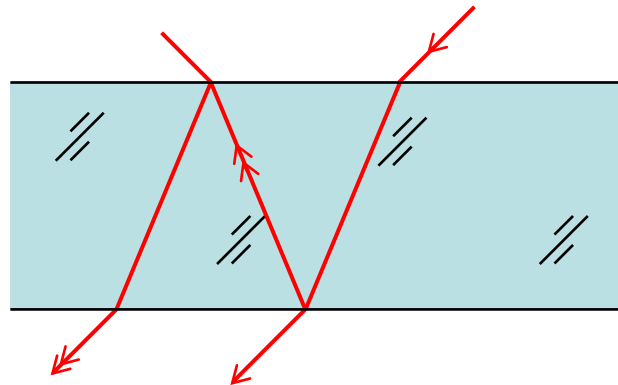
montage multivoies :



choix des différences de marche :

interférogrammes partiels
ou sous-échantillonné

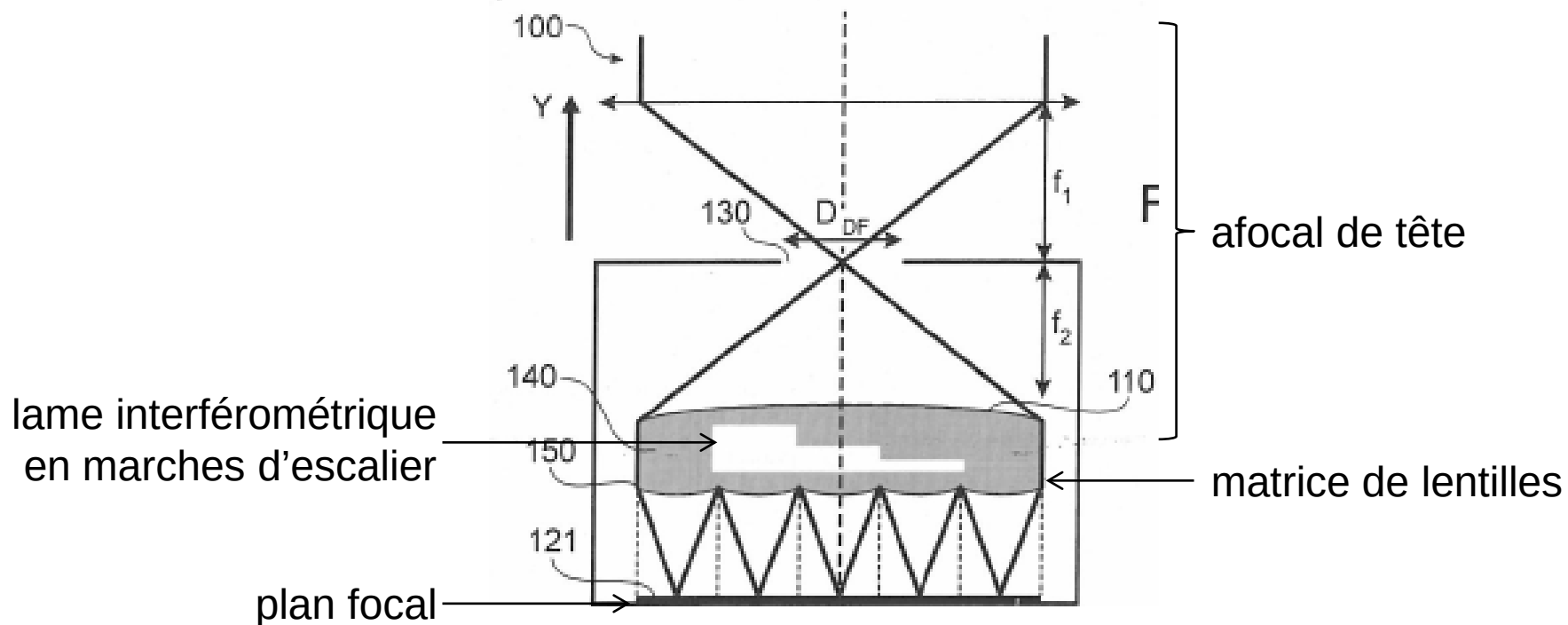
interféromètre de Fizeau :



interférences à 2 ondes majoritairement

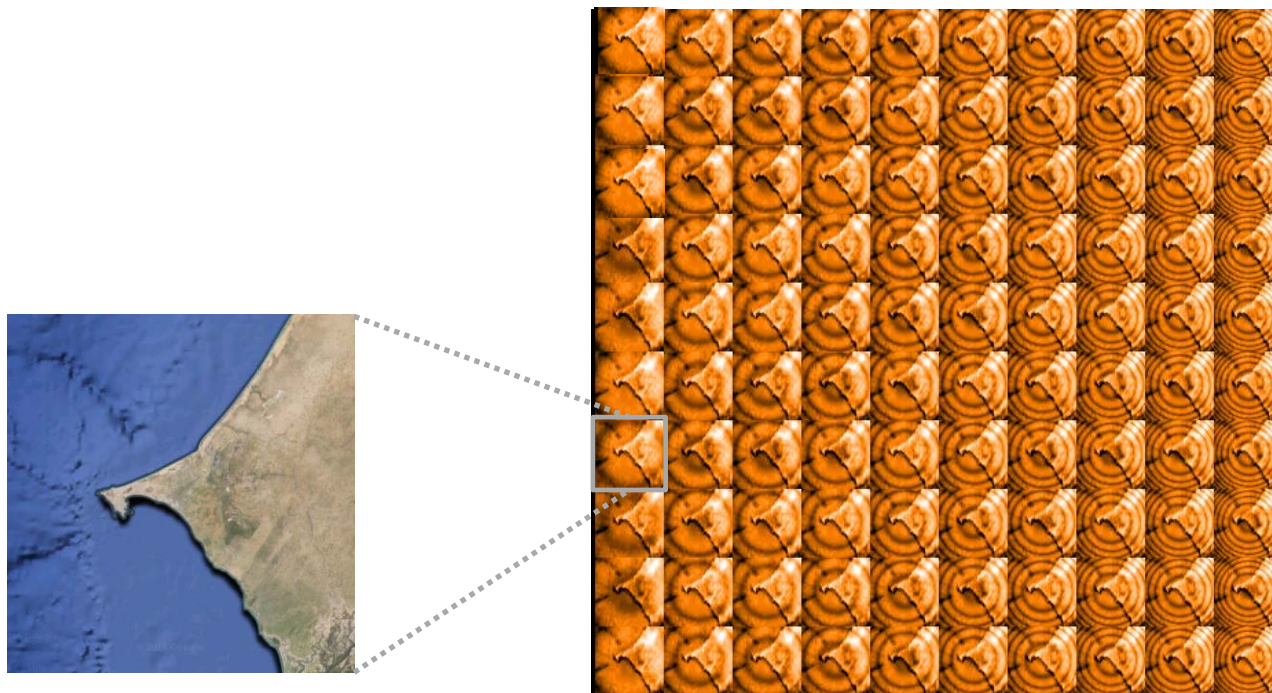
S. Rommeluère et al., "Infrared focal plane array with a built-in stationary Fourier-transform spectrometer: basic concepts," Opt. Letters 33, 1062-1064 (2008)

Microspoc imageur : principe d'acquisition



Microspoc imageur : principe d'acquisition

1 imagerie $\approx$ 1 différence de marche



S. Gousset et al., "Nanocarb-21: a miniature Fourier-Transform spectro-imaging concept for a daily monitoring of greenhouse gas concentration on the Earth surface," Proc. ICSO 2016 (2016)

Microspoc imageur : vers la haute résolution spectrale

Le nombre de différences de marche est limité par le nombre de pixels du détecteur
⇒ comment atteindre la haute résolution spectrale?

Microspoc imageur : vers la haute résolution spectrale

Le nombre de différences de marche est limité par le nombre de pixels du détecteur
⇒ comment atteindre la haute résolution spectrale?

1. Sous-échantillonner l'interférogramme

- le spectre va être replié
- si la bande spectrale est limitée et bien choisie, les repliements ne se chevauchent pas

Microspoc imageur : vers la haute résolution spectrale

Le nombre de différences de marche est limité par le nombre de pixels du détecteur
⇒ comment atteindre la haute résolution spectrale?

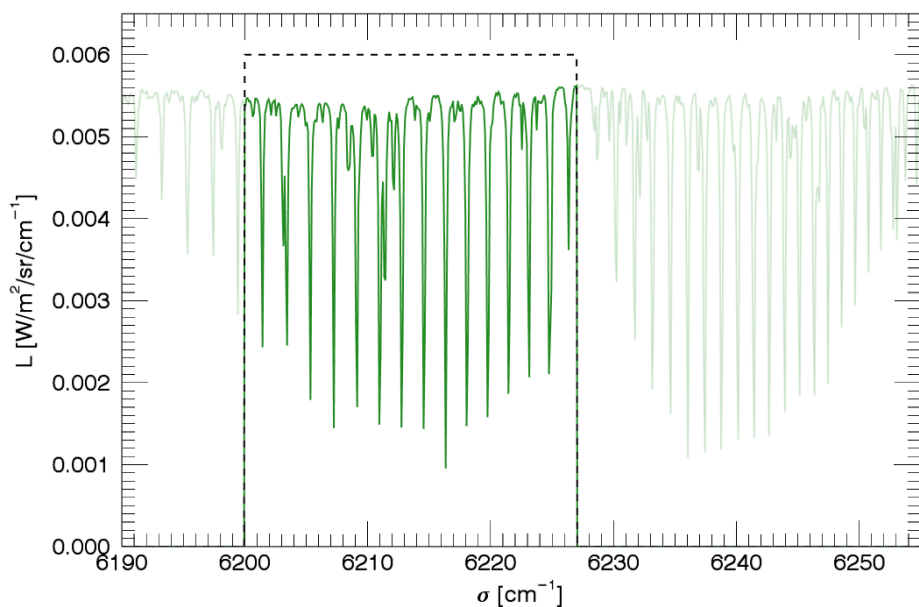
1. Sous-échantillonner l'interférogramme

- le spectre va être replié
- si la bande spectrale est limitée et bien choisie, les repliements ne se chevauchent pas

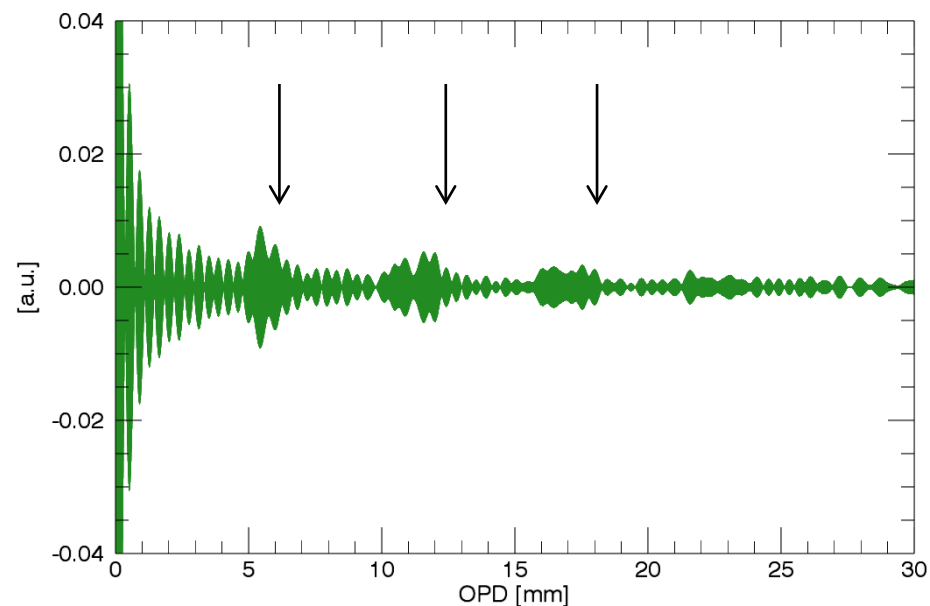
2. Ne mesurer qu'une partie de l'interférogramme

Microspoc imageur : vers la haute résolution spectrale

- si l'espèce d'intérêt présente un spectre périodique, l'interférogramme va être modulé autour de la différence de marche associée



exemple du CO₂ à 1,6 μm : peigne de période 1,6 cm^{-1}

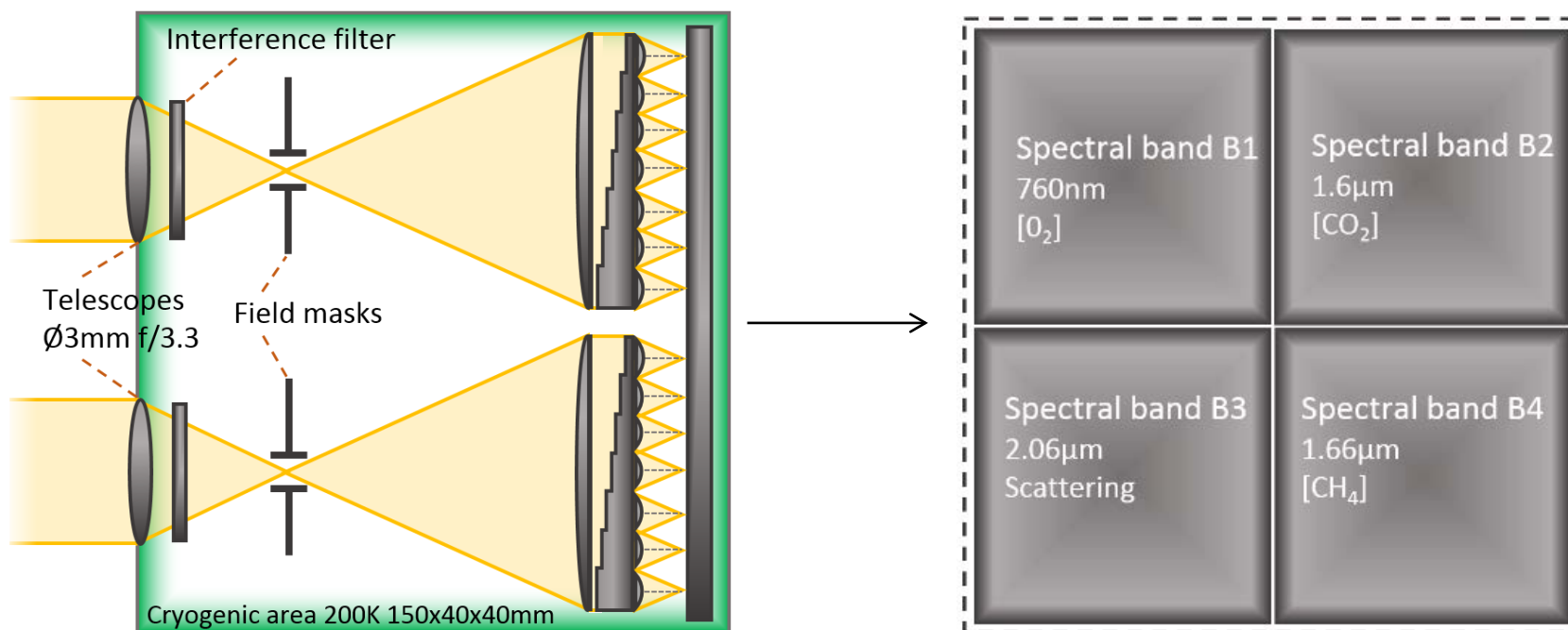


rebonds autour de 6 mm (et multiples)

C. T. Nguyen et al., "Pollution imagery by optical interferometry : application to SO₂ gas," Appl. Opt. 34, 5398-5405 (1995)

Microspoc imageur : vers la haute résolution spectrale

- pour limiter les corrélations avec les autres espèces, on peut utiliser plusieurs bandes spectrales



Microspoc imageur : projets en cours

- projet *Nanocarb* : étude de faisabilité pour une constellation de minisatellites dédiés à la mesure de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4)
- FUI *Imagaz* : détection de gaz pour des applications de surveillance industrielle
⇒ réalisation d'un premier prototype en 2018

partenariat avec l'Ipag : Étienne Le Coarer
(etienne.le-coarer@univ-grenoble-alpes.fr)



- projet *Halesis*: étude des TLE (Transient Luminous Events) dans la haute atmosphère depuis un ballon stratosphérique (laurence.croize@onera.fr)
⇒ réalisation d'un instrument de démonstration de principe pour la mesure de CO en occultation solaire en 2018 (financement IRS Saclay)

partenariat avec le Latmos:
Sébastien Payan (sebastien.payan@upmc.fr)



Bilan et perspectives

Bilan et perspectives

- **Filtres plasmoniques :**

nouvelles géométries en développement (amélioration de la résolution spectrale, de l'acceptance angulaire, etc.)

- **Interféromètres statiques :**

- plusieurs instruments de mesure développés :

- spectromètres à haute cadence (sylvain.rommeluere@onera.fr)

- SieleTERS (accessible aux utilisateurs extérieurs)

- vers des charges utiles compactes :

- Sibi : démonstration sur drone à court terme

- Microspoc imageur : démonstration du principe instrumental en 2018

- modèle de performance et règles de conception à développer

Merci pour votre attention !