

# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

*O. Gazzano, Y. Ferrec, A. Kattnig, C. Coudrain, L. Rousset-Rouvière*  
ONERA (France)



# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

**1**

**Le système spectro-imageur SIELETTERS**

**2**

**Simulateur d'images brutes aéroportées**

**3**

**Améliorations récentes des images hyperspectrales**

**a**

**Recalage en deux étapes**

**b**

**Suppression des franges dans la correction des non-uniformités**



# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

## 1 Le système spectro-imageur SIELETTERS

## 2 Simulateur d'images brutes aéroportées

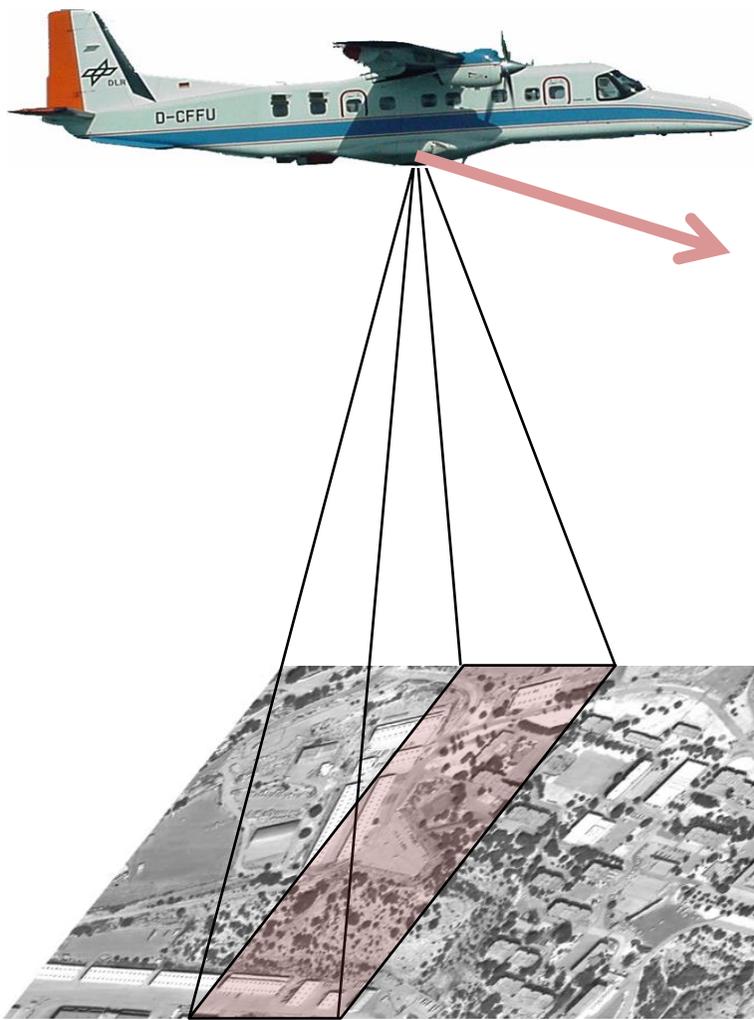
## 3 Améliorations récentes des images hyperspectrales

a Recalage en deux étapes

b Suppression des franges dans la correction des non-uniformités



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral aéroporté

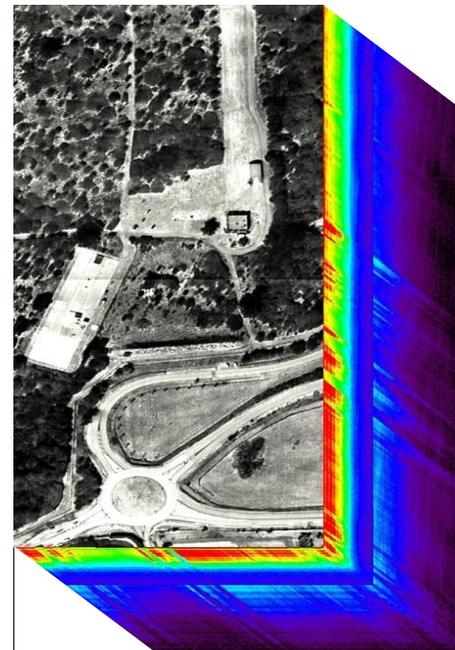


**SIELETTERS**

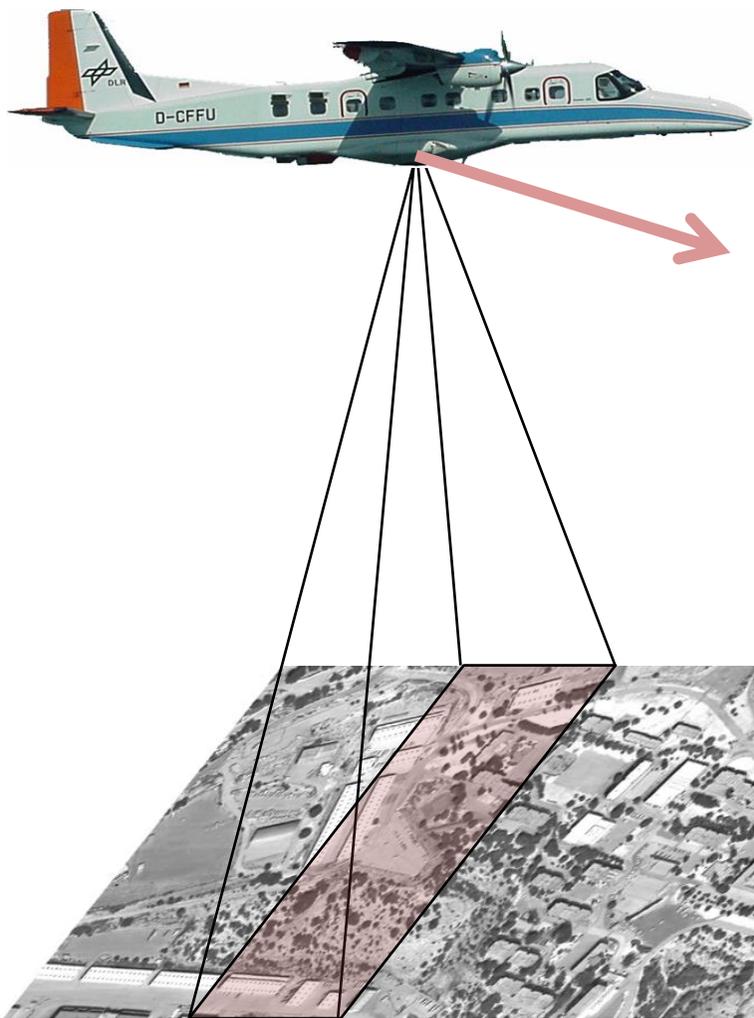


**Bandes MWIR et LWIR**

→ Imageur hyperspectral



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral aéroporté



## SYSIPHE

### SIELETTERS



Bandes MWIR et LWIR

### ODIN



Bandes VIS à SWIR

# SIELETTERS : un imageur hyperspectral aéroporté



## SYSIPHE

### SIELETTERS



Bandes MWIR et LWIR

### ODIN



Bandes VIS à SWIR

✓ **Grandes résolutions spectrale et spatiale**  
Résolution : **0.5 m** ; Fauchée : **500 m** ; **600 bandes spectrales**

Une collaboration entre la France et la Norvège :  
➤ ONERA, DGA  
➤ Norsk Elektro Optikk (NEO), Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral aéroporté



## Objectifs:

- Développer des **savoir-faire, outils et technologies** pour le design et la fabrication de systèmes d'imagerie hyperspectrale aéroportés
- Améliorer les **connaissances** sur les phénomènes infrarouges
- Etre capable de **spécifier** un système opérationnel

## SYSIPHE

### SIELETTERS



Bandes MWIR et LWIR

### ODIN

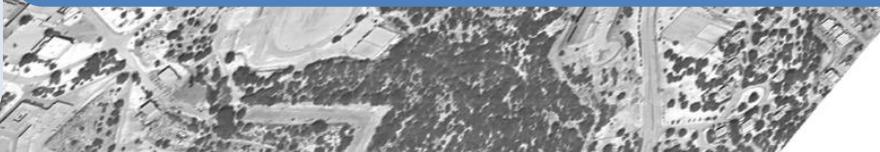


Bandes VIS à SWIR

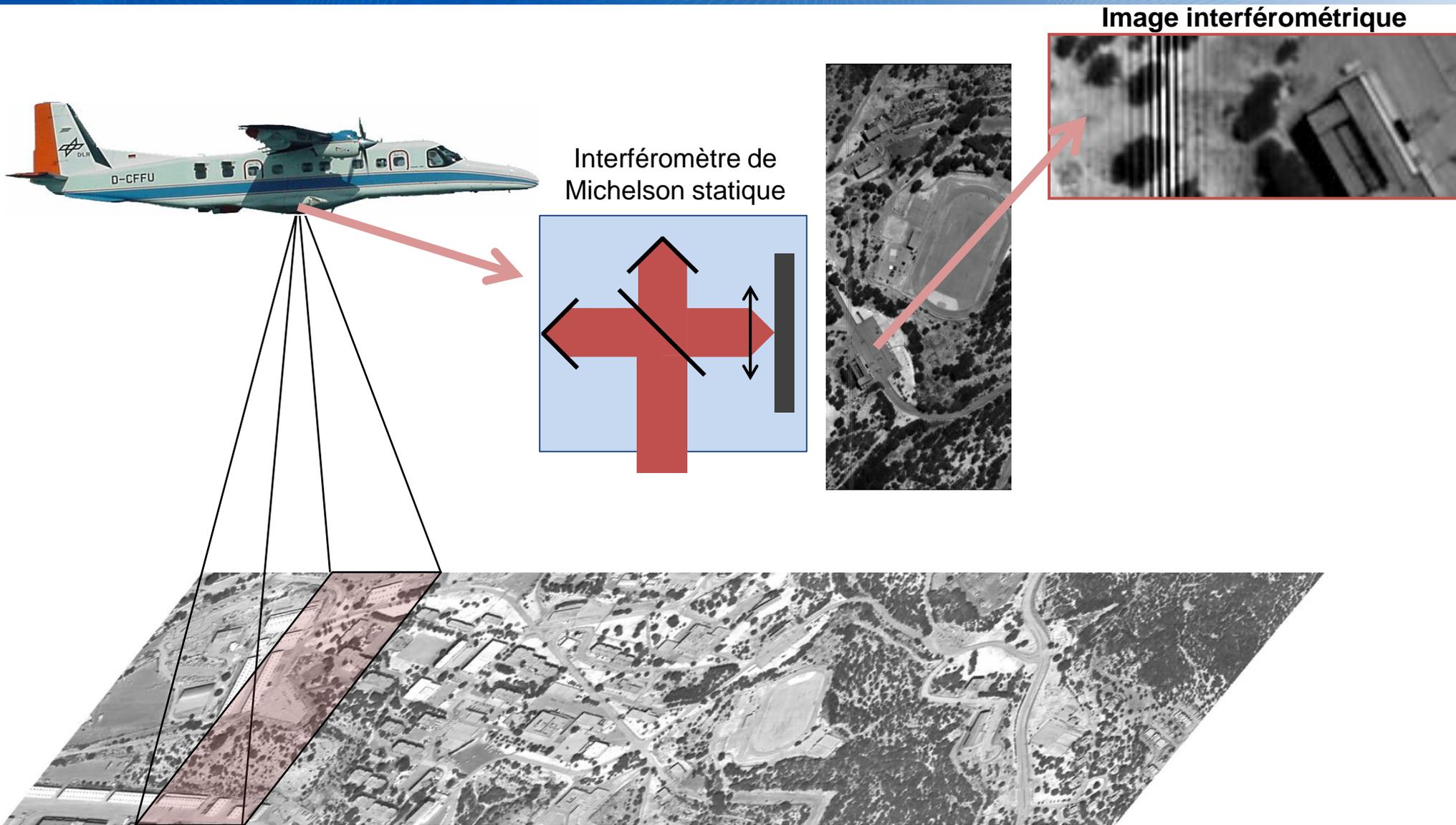
✓ **Grandes résolutions spectrale et spatiale**  
Résolution : **0.5 m** ; Fauchée : **500 m** ; **600 bandes spectrales**

Une collaboration entre la France et la Norvège :

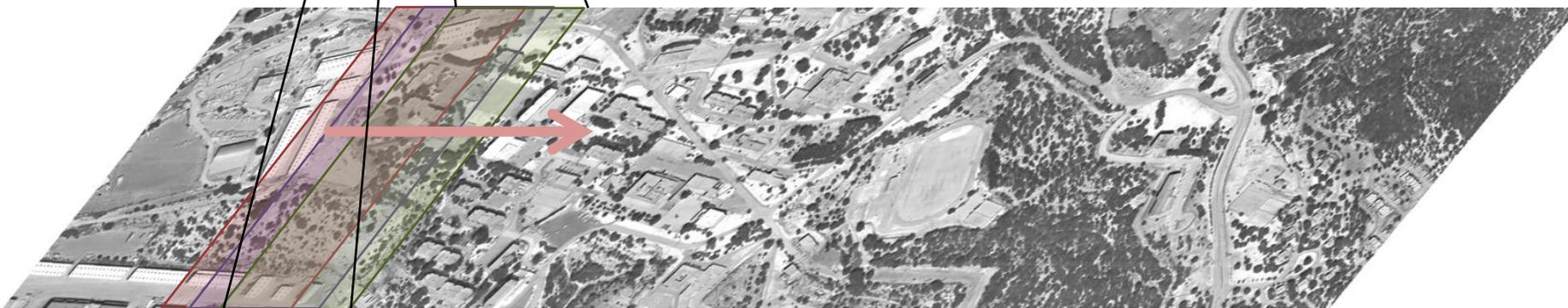
- ONERA, DGA
- Norsk Elektro Optikk (NEO), Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)



# SIELETERS : un imageur hyperspectral à transformée de Fourier statique



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral à transformée de Fourier statique



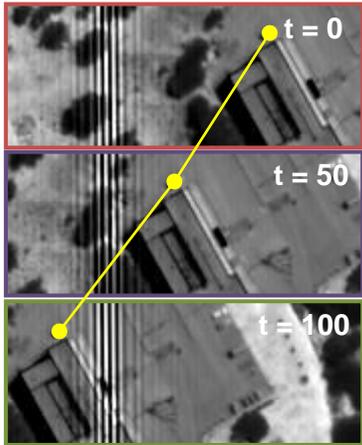
150 Hz image acquisition

Quelques images interférométriques



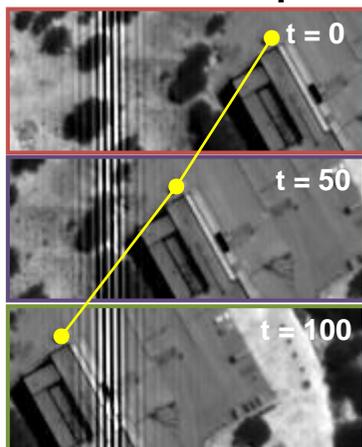
# SIELETTERS : un imageur hyperspectrale à transformée de Fourier statique

Quelques image  
interférométriques



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral à transformée de Fourier statique

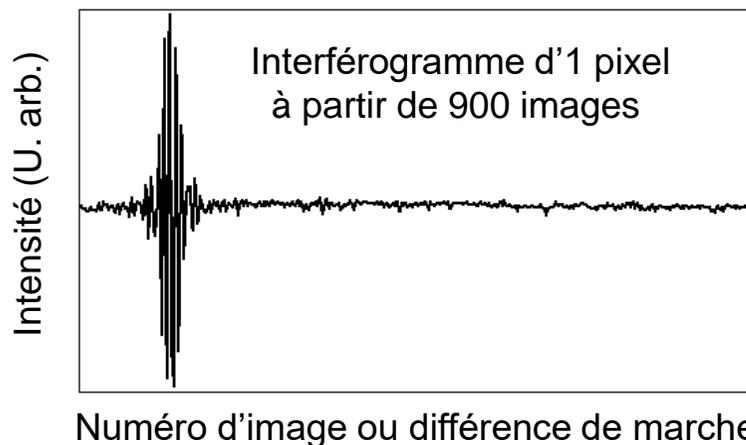
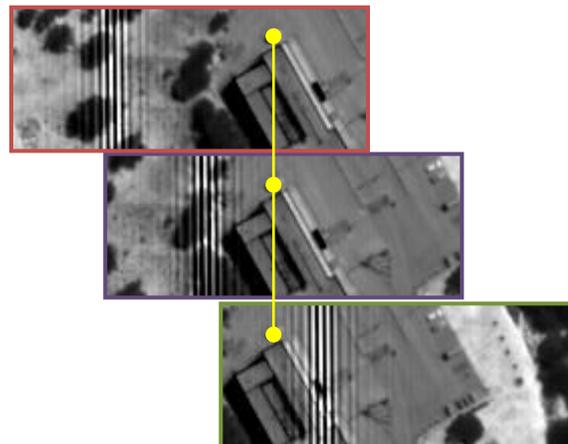
Quelques image interférométriques



Recalage

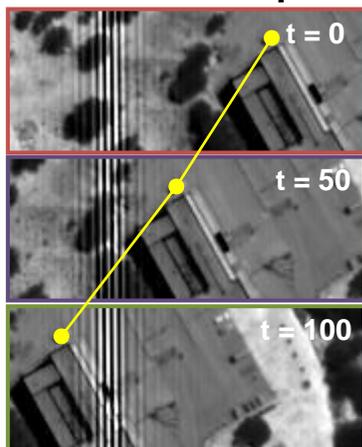


Images interférométriques recalés



# SIELETTERS : un imageur hyperspectral à transformée de Fourier statique

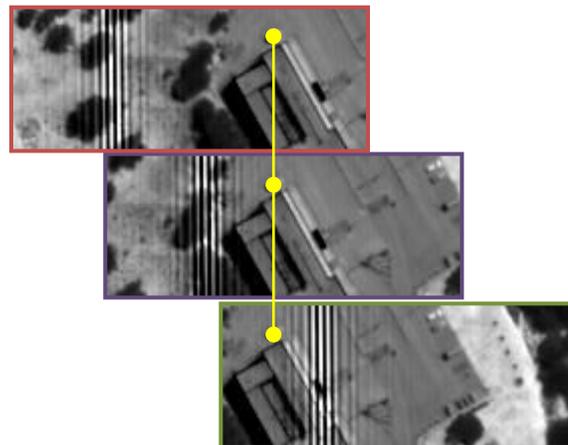
Quelques image interférométriques



Recalage



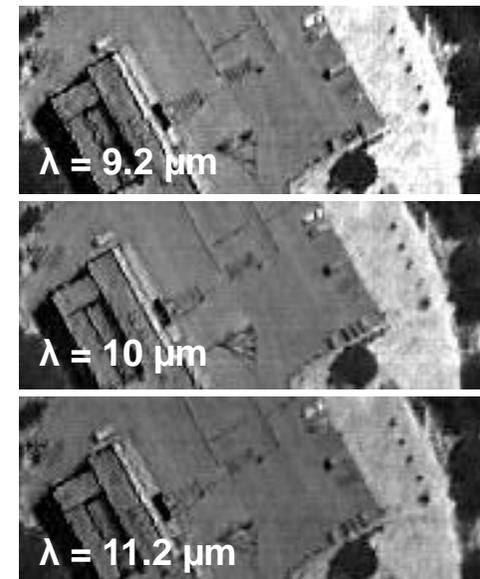
Images interférométriques recalés



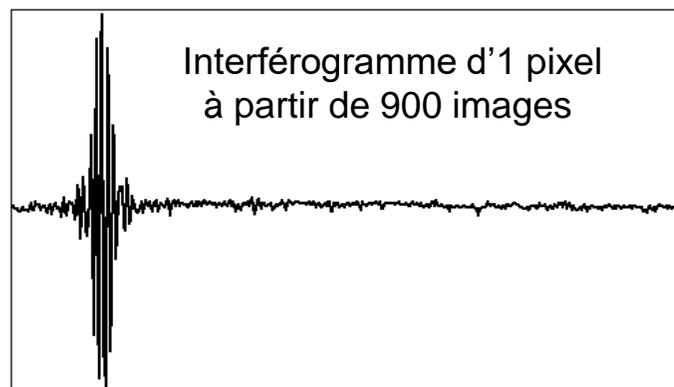
Transformée de Fourier



Quelques images spectrales



Intensité (U. arb.)



Interférogramme d'1 pixel à partir de 900 images

Numéro d'image ou différence de marche

# Sieleters main characteristics

Parameter	MWIR	LWIR
Spectral range	3.0 - 5.2 $\mu\text{m}$	8.1 – 11.5 $\mu\text{m}$
Spectral resolution	11 $\text{cm}^{-1}$	5 $\text{cm}^{-1}$
Pixel FOV	0.25 mrad	0.25 mrad
Total across track FOV	15°	15°
Spatial resolution	1016 px	1016 px
F-number	F4.0	F3.0

- Deux imageurs à transformée de Fourier statique
- MCT IR-FPAs de Sofradir, 1016 x 440 pixels
- Entièrement cryogénique (77 K)
- Stabilisés



# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

**1** Le système spectro-imageur SIELETTERS

**2** Simulateur d'images brutes aéroportées

**3** Améliorations récentes des images hyperspectrales

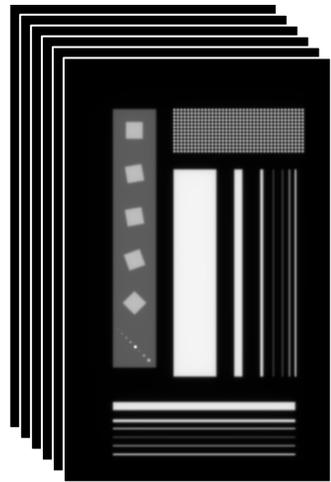
**a** Recalage en deux étapes

**b** Suppression des franges dans la correction des non-uniformités



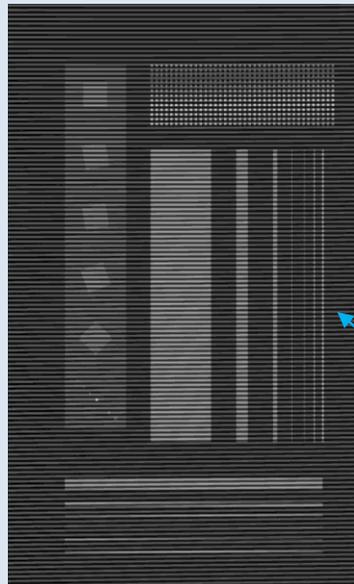
# Simulateur d'images brutes aéroportées

1- Cube d'images sur-échantillonnées à plusieurs nombres d'ondes  $\sigma$



2 – Appliquer les franges d'interférences sur les images à chaque nombre d'onde  $\sigma$

$$A \cdot \frac{1 + C(x, \sigma) \cdot \cos(2\pi\delta(x, y)\sigma - \phi(x, \sigma))}{2}$$

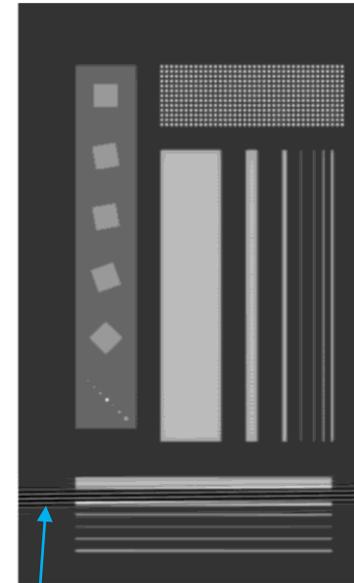


3 – Convolution par :

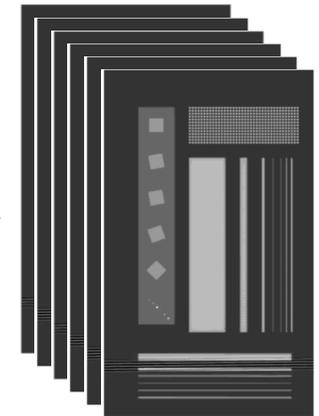
- La réponse spatial des pixels
- La fonction de transfert optique du système

4 – Somme sur les nombres d'ondes  $\sigma$

$$\sum_{\sigma_0 \dots \sigma_{N-1}}$$



5- Décalage des images initiales pour générer toute la séquence

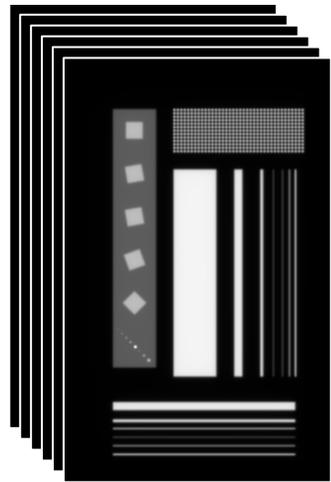


Images brutes simulées (en courant)



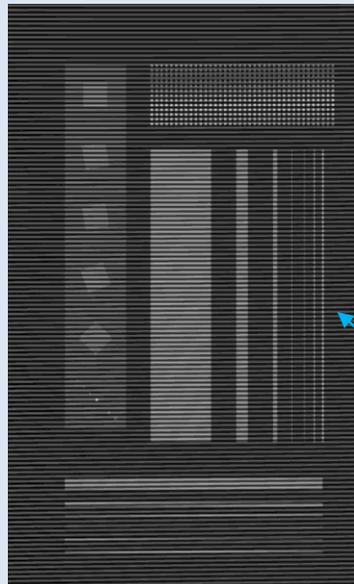
# Simulateur d'images brutes aéroportées

1- Cube d'images sur-échantillonnées à plusieurs nombres d'ondes  $\sigma$



2 – Appliquer les franges d'interférences sur les images à chaque nombre d'onde  $\sigma$

$$A \cdot \frac{1 + C(x, \sigma) \cdot \cos(2\pi\delta(x, y)\sigma - \phi(x, \sigma))}{2}$$

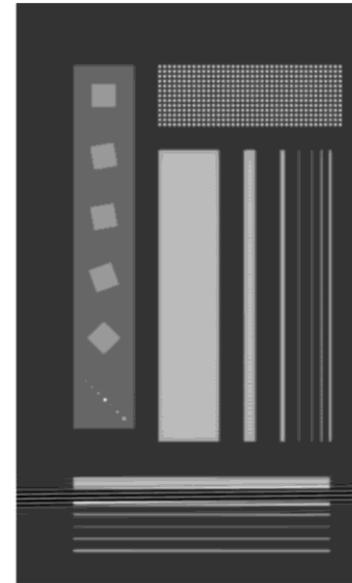


3 – Convolution par :

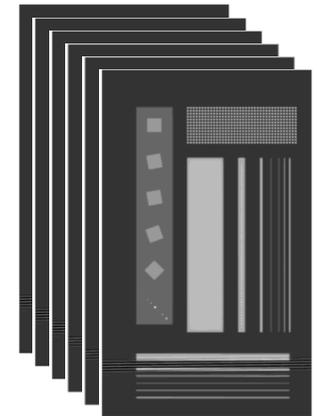
- La réponse spatial des pixels
- La fonction de transfert optique du système

4 – Somme sur les nombres d'ondes  $\sigma$

$$\sum_{\sigma_0 \dots \sigma_{N-1}}$$



5- Décalage des images initiales pour générer toute la séquence



Outils utile pour :

- ✓ Comprendre la physique associée
- ✓ Améliorer la qualité des images



# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

**1** Le système spectro-imageur SIELETTERS

**2** Simulateur d'images brutes aéroportées

**3** Améliorations récentes des images hyperspectrales

**a** Recalage en deux étapes

**b** Suppression des franges dans la correction des non-uniformités



# Recalage des images de SIELETTERS

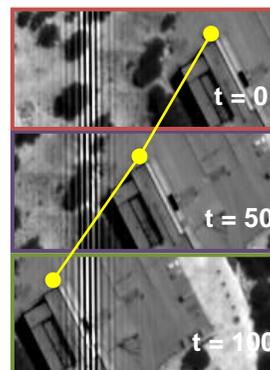
## Méthode 1

### Corrélation des images (campagne 2013)

✓ Recalage  $\ll 0.1$  pixels possible

Conditions:  Sol plat  
 Pas d'objets brillants ou qui bougent

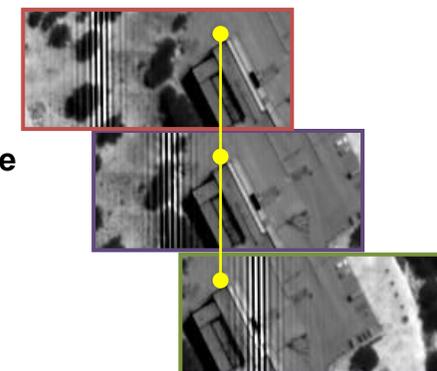
Images brutes



Recalage



Images recalées



# Recalage des images de SIELETTERS

## Méthode 1

### Corrélation des images (campagne 2013)

✓ Recalage  $\ll 0.1$  pixels possible

Conditions :  Sol plat  
 Pas d'objets brillants ou qui bougent

## Méthode 2

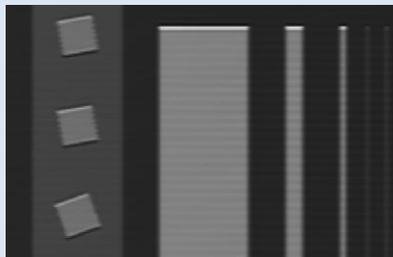
### Ligne de visée (campagne 2015)

Avec : • Métadonnées enregistrées en vol  
• Modèle numérique du terrain

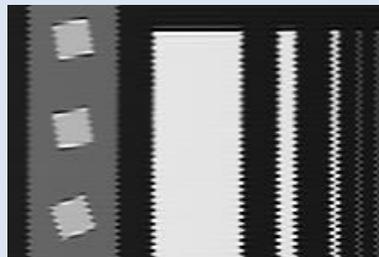
✓ Génère des images géo-référencées

✓ Indépendant du relief

Résolution :  $\sim 0.1$  pixel (*ie* 5 cm au sol ; avion à 2000 m)

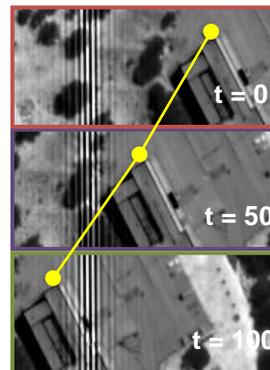


Recalage parfait (simulation)



Recalage bruité (simulation)

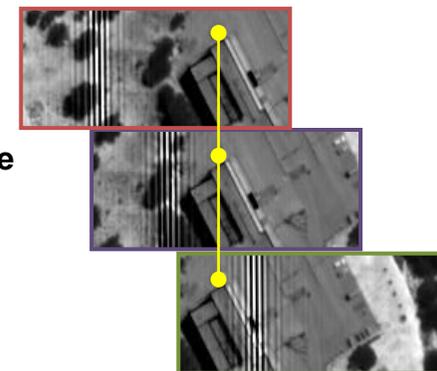
## Images brutes



Recalage



## Images recalées



# Recalage des images de SIELETTERS

## Méthode 1

### Corrélation des images (campagne 2013)

✓ Recalage  $\ll 0.1$  pixels possible

Conditions :  Sol plat

Pas d'objets brillants ou qui bougent

## Méthode 2

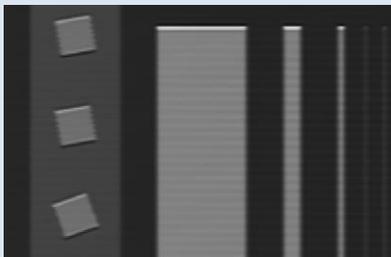
### Ligne de visée (campagne 2015)

Avec : • Métadonnées enregistrées en vol  
• Modèle numérique du terrain

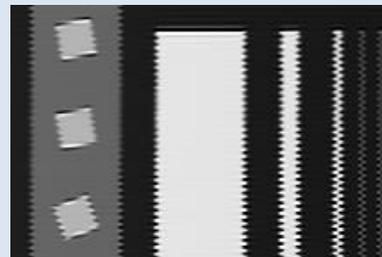
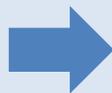
✓ Génère des images géo-référencées

✓ Indépendant du relief

Résolution :  $\sim 0.1$  pixel (*ie* 5 cm au sol ; avion à 2000 m)

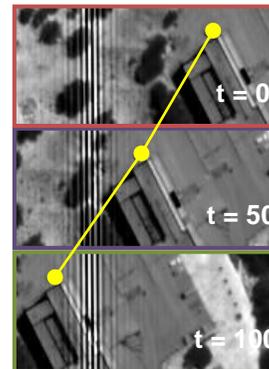


Recalage parfait (simulation)



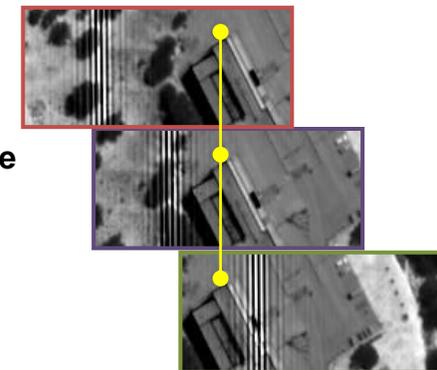
Recalage bruité (simulation)

## Images brutes



Recalage

## Images recalées



## Nouvelle méthode

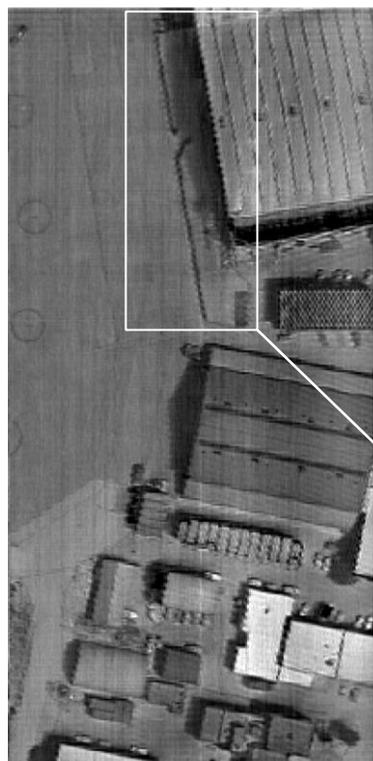
Ligne de visée

+

Corrélation d'images sur les images  
pré-recalées par la ligne de visée



# Recalage des images de SIELETERS : résultats

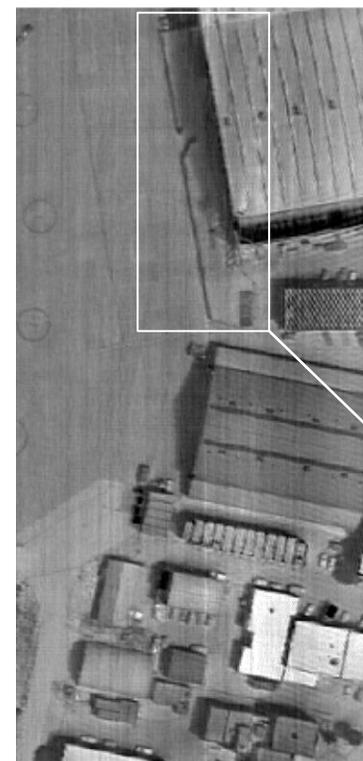


Uniquement avec  
la ligne de visée  
(méthode 2)



Image spectrale  
dans le LWIR

Nouvelle méthode



Recalage avec  
ligne de visée  
+  
Corrélation des  
images

Amélioration géométrique  
des images spectrales



# Simulation et améliorations des images hyperspectrales du système aéroporté SIELETTERS

**1** Le système spectro-imageur SIELETTERS

**2** Simulateur d'images brutes aéroportées

**3** Améliorations récentes des images hyperspectrales

**a** Recalage en deux étapes

**b** Suppression des franges dans la correction des non-uniformités



# Vertical oscillations on the spectral images

## Oscillations dans les images spectrales

- Verticales
- Période dépend de :
  - La longueur d'onde
  - De la méthode utilisée pour corriger les non-uniformités du détecteur infrarouge



# Oscillations verticales dans les images spectrales

Instabilité du fond  
et du gain du  
détecteur IR

Estimation du  
fond et du gain  
« en vol »

Nécessaire  
de filtrer les  
franges

# Oscillations verticales dans les images spectrales

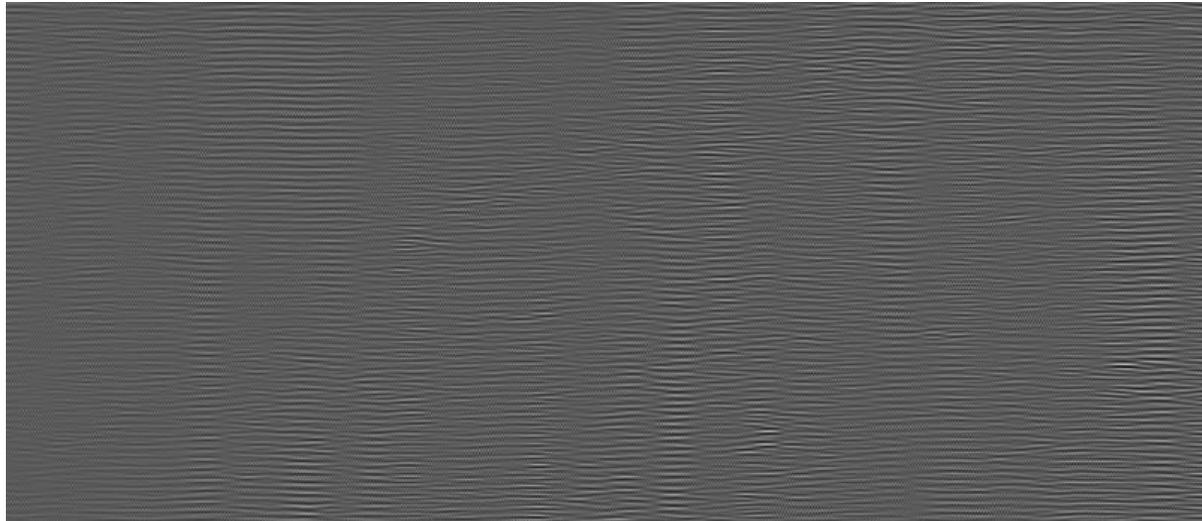
Instabilité du fond  
et du gain du  
détecteur IR

Estimation du  
fond et du gain  
« en vol »

Nécessaire  
de filtrer les  
franges

Engendre résidus de  
franges dans les images  
interférométriques

Filtrage franges → résidus franges sans cohérence de phase



# Oscillations verticales dans les images spectrales

Instabilité du fond et du gain du détecteur IR

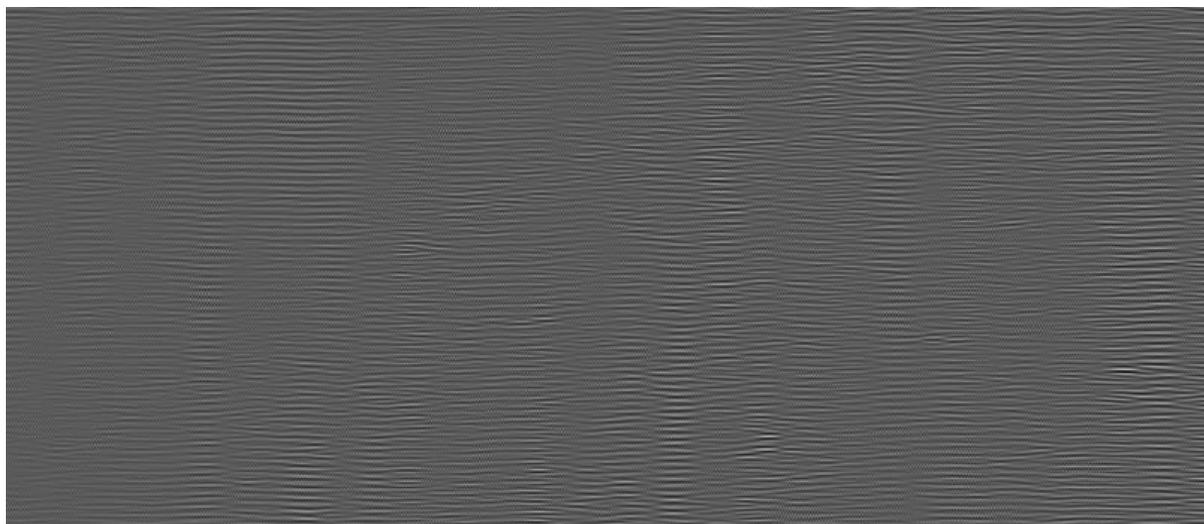
Estimation du fond et du gain « en vol »

Nécessaire de filtrer les franges

Engendre résidus de franges dans les images interférométriques

Oscillations verticales dans images spectrales

Filtrage franges → résidus franges sans cohérence de phase



Filtre étroit



Filtre large



# Oscillations verticales dans les images spectrales

Instabilité du fond  
et du gain du  
détecteur IR

Estimation du  
fond et du gain  
« en vol »

Nécessaire  
de filtrer les  
franges

Engendre résidus de  
franges dans les images  
interférométriques

Oscillations  
verticales dans  
images spectrales

*Piste 1*

Améliorer la  
qualité du  
filtrage ?

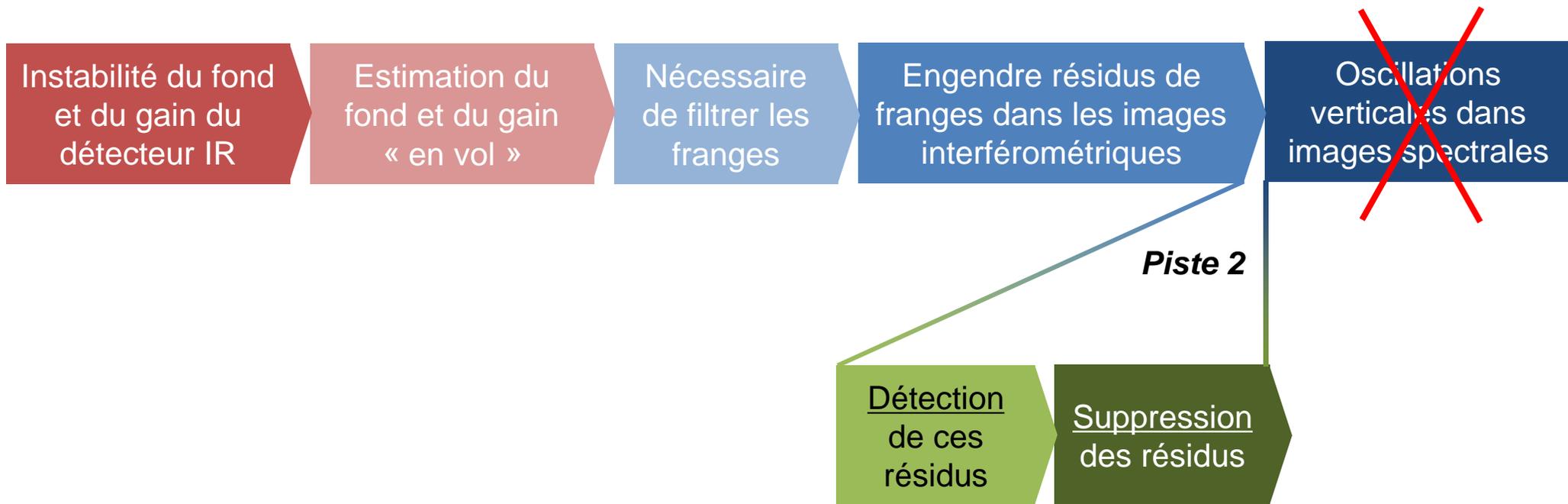
Filtrage plus  
étroit ?

**Il reste des  
résidus de  
franges**

**donc des  
oscillations**

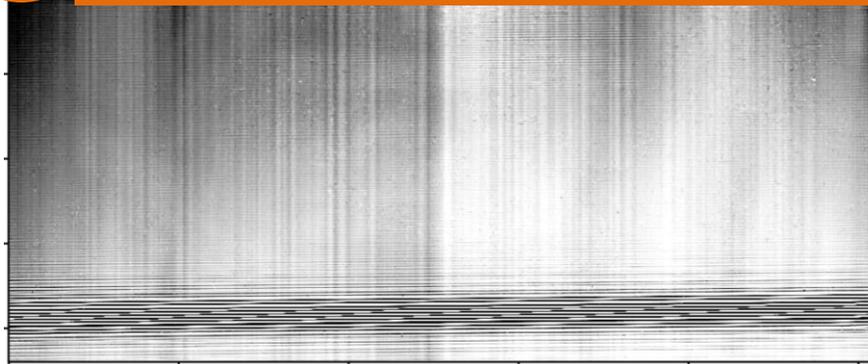


# Oscillations verticales dans les images spectrales

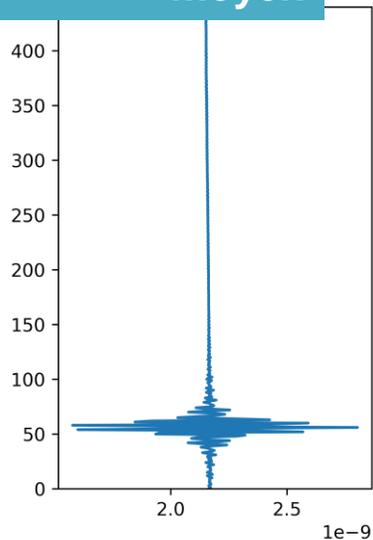


# Suppression des franges dans la correction des non-uniformités

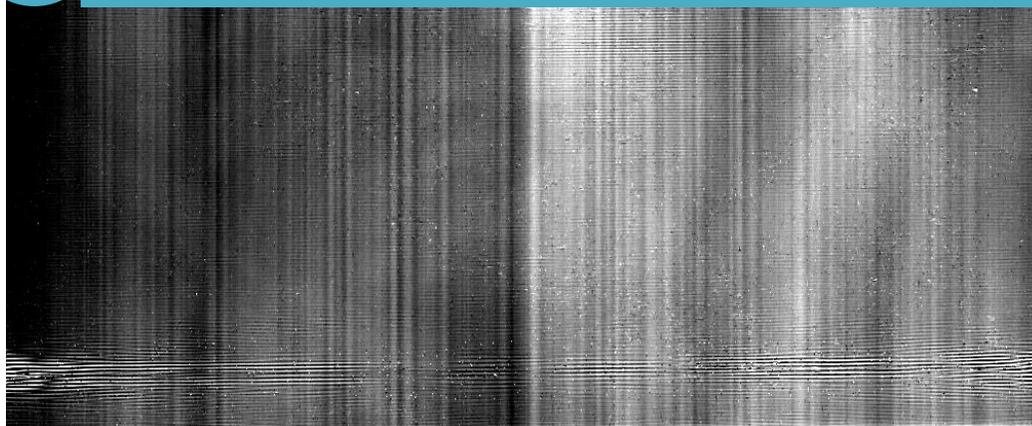
1 Image uniforme d'entrée : moyenne des images sur la mer



Interférogramme moyen

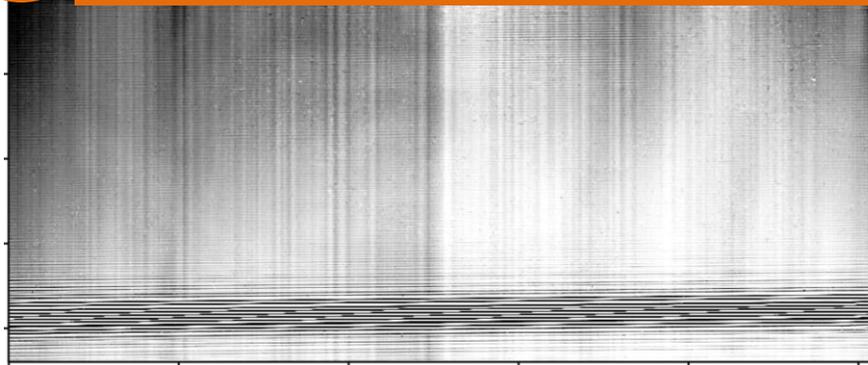


2 Écart à l'interférogramme moyenne → Carte du résidu des franges

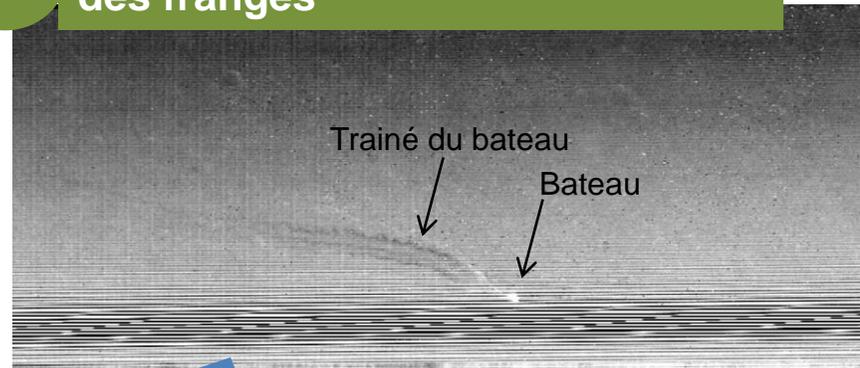


# Suppression des franges dans la correction des non-uniformités

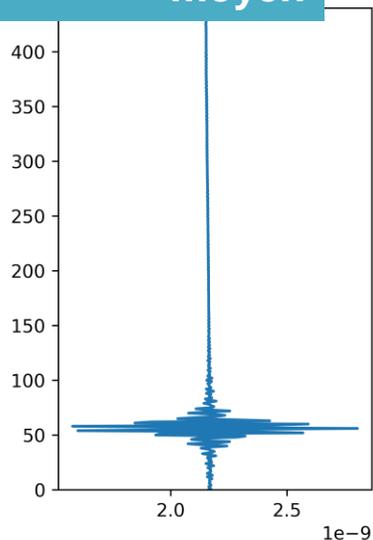
1 Image uniforme d'entrée : moyenne des images sur la mer



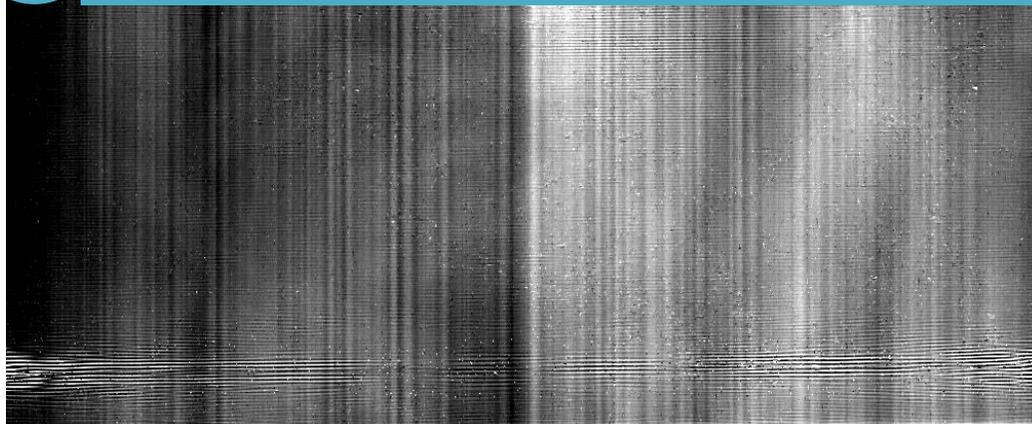
3 Image corrigée sans le résidu des franges



Interférogramme moyen



2 Écart à l'interférogramme moyenne → Carte du résidu des franges



# Suppression des franges dans la correction des non-uniformités

Image spectrale à 9.2  $\mu\text{m}$

Sans la correction

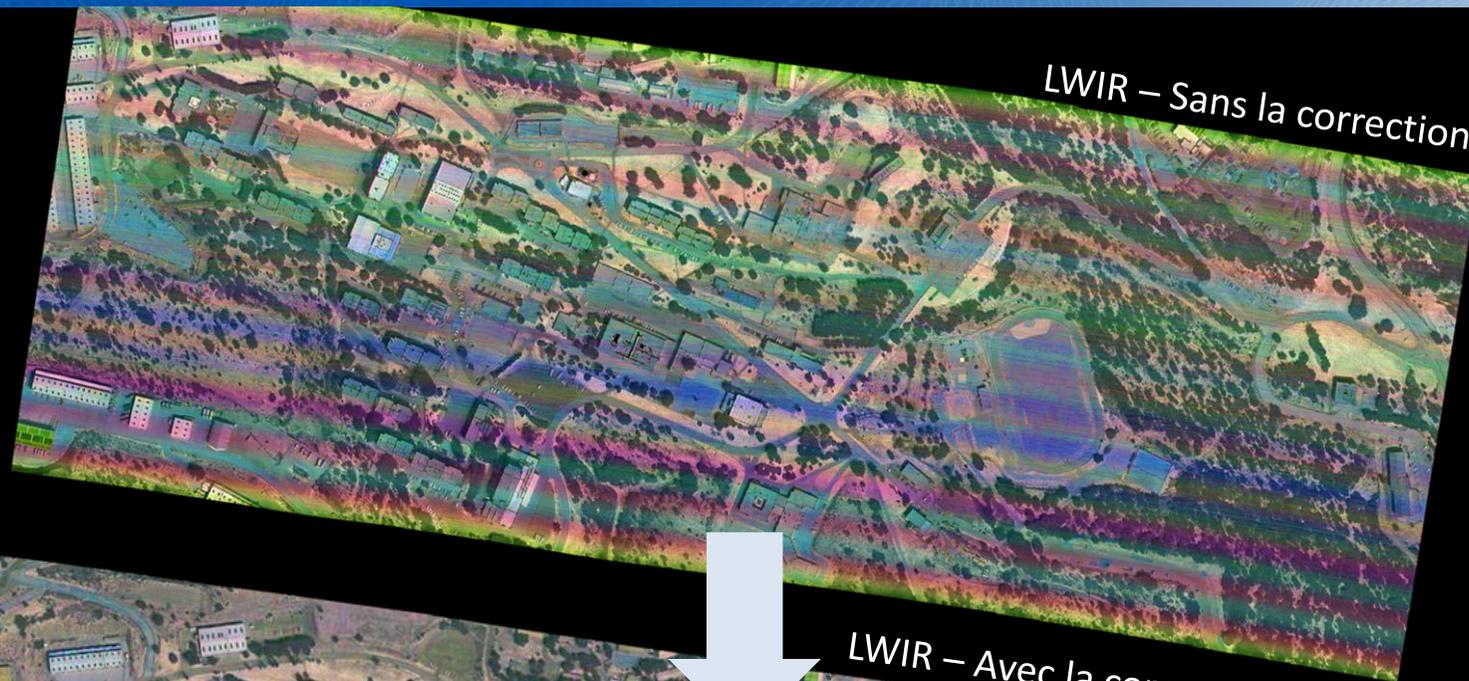
Image spectrale à 10.7  $\mu\text{m}$



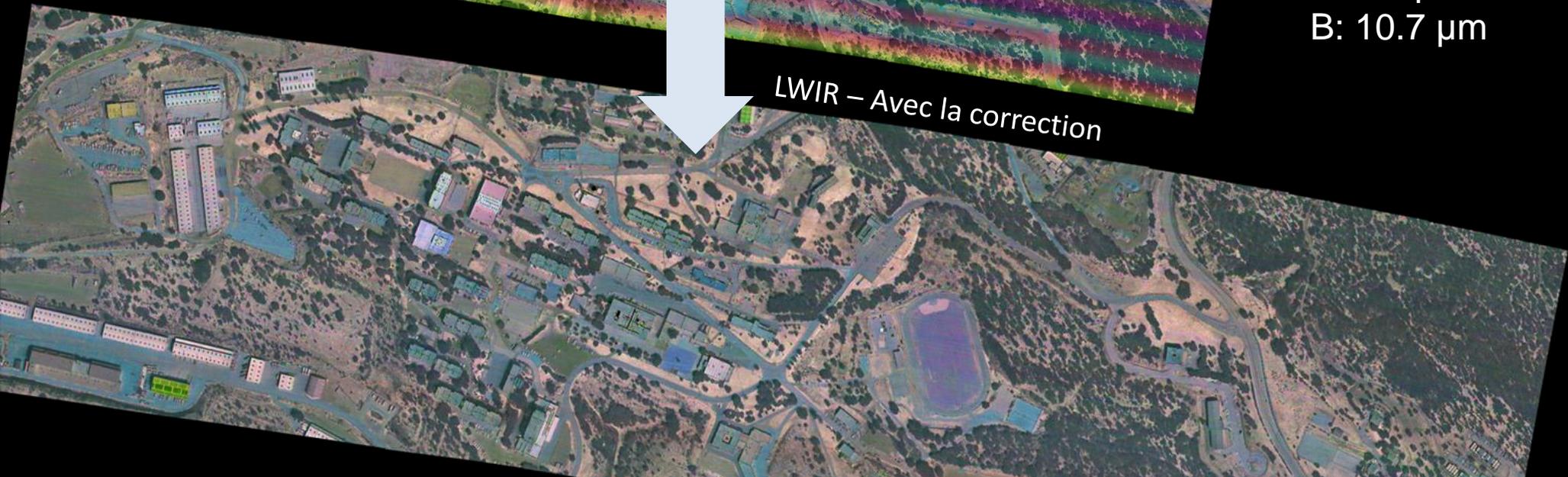
Avec la correction



# Quelques images en fausses couleurs RGB (LWIR)



R: 9.1  $\mu\text{m}$   
V: 9.5  $\mu\text{m}$   
B: 10.7  $\mu\text{m}$



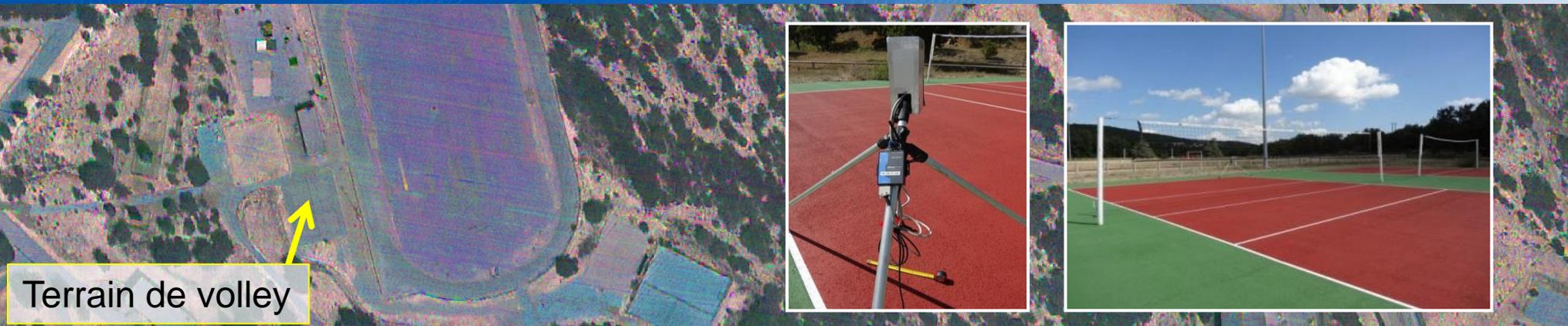
# Images RGB géoréférencées

↑ Nord

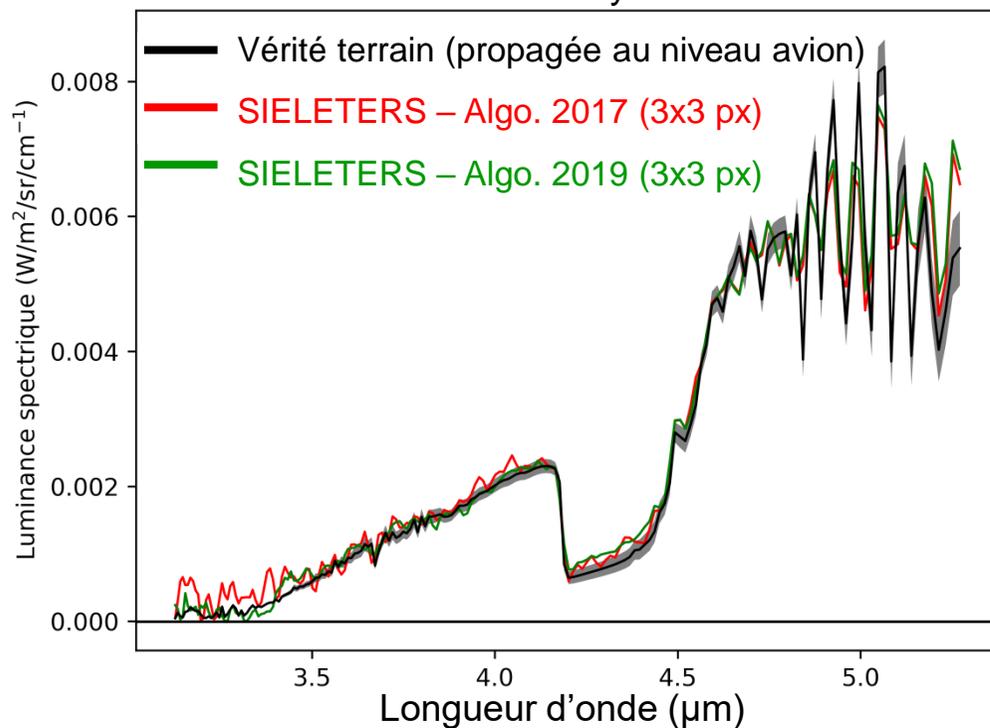
R: 4.1  $\mu\text{m}$   
V: 4.6  $\mu\text{m}$   
B: 5.0  $\mu\text{m}$

R: 9.1  $\mu\text{m}$   
V: 9.5  $\mu\text{m}$   
B: 10.7  $\mu\text{m}$

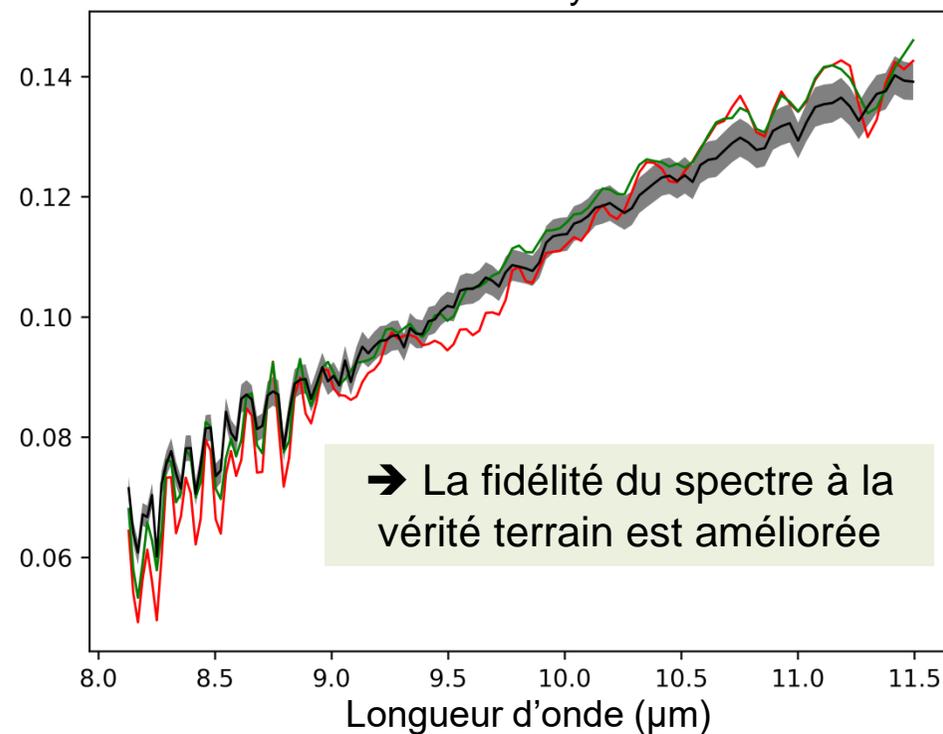
# Amélioration de la qualité des spectres



Terrain de volley – MWIR



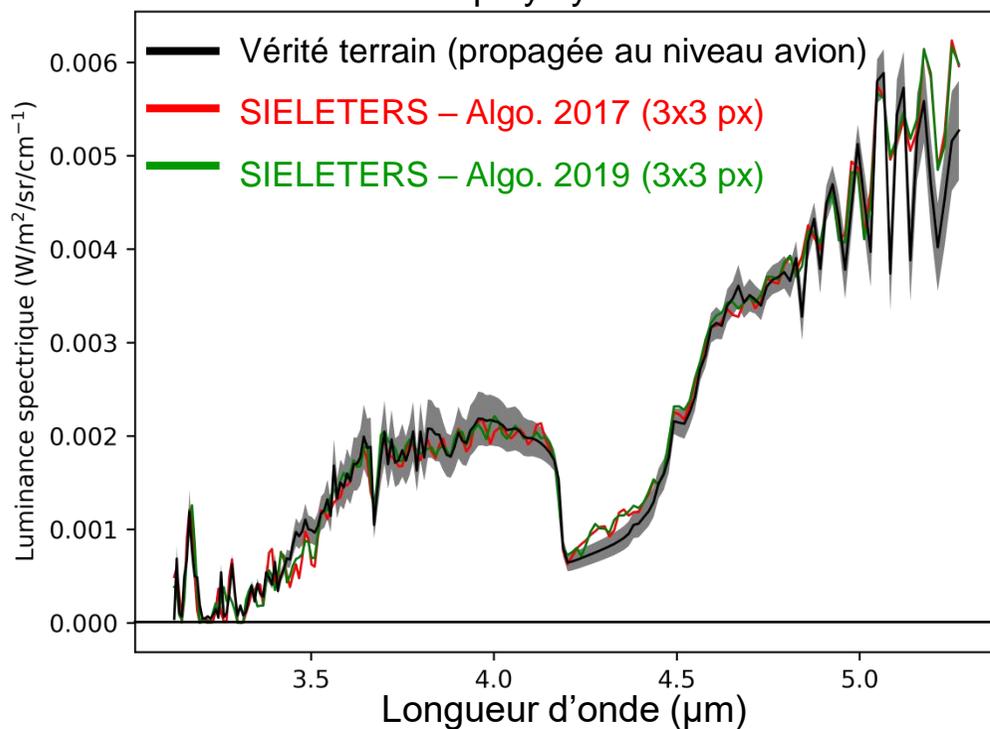
Terrain de volley – LWIR



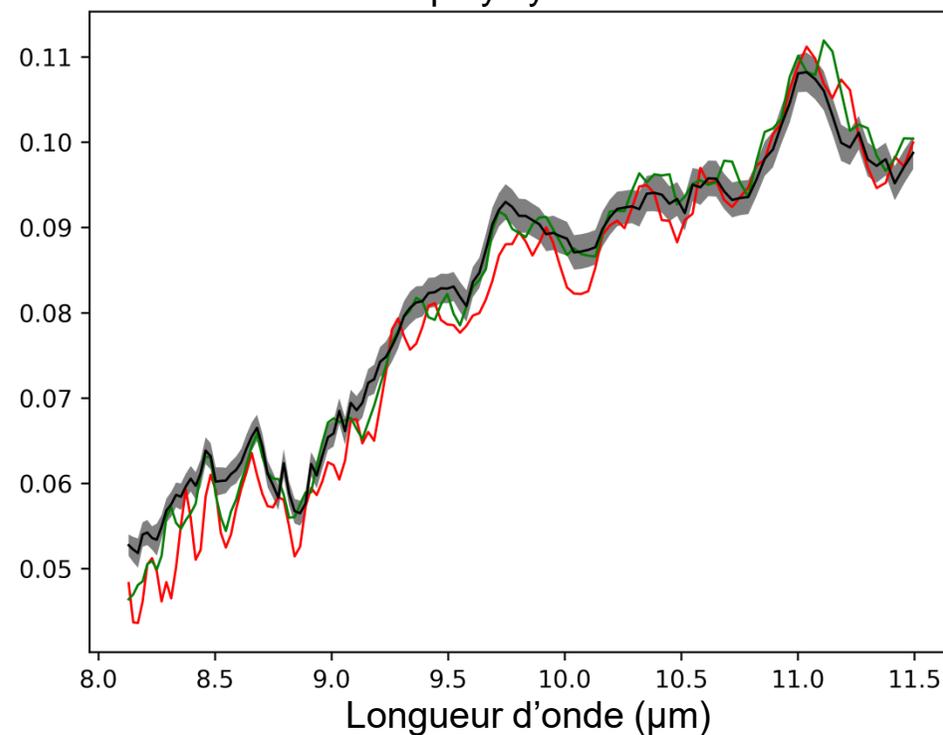
# Amélioration de la qualité des spectres



Cible en polystyrène – MWIR



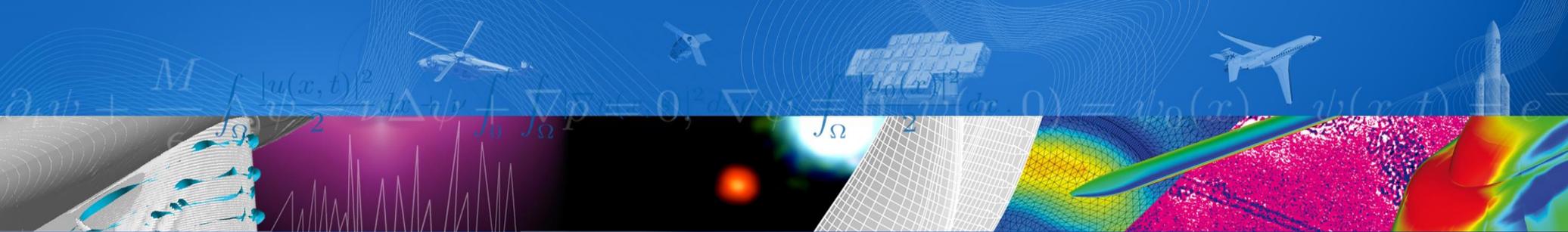
Cible en polystyrène – LWIR



# SIELETTERS conclusions

- ✓ Très bons résultats de la campagne 2015
- ✓ La dernière campagne a eu lieu en janvier 2019
- ✓ Meilleure compréhension du système avec notamment le développement d'un simulateur
- ✓ Récentes améliorations de la qualité des images :
  - Recalage des images en deux étapes
  - Meilleure suppression des franges d'interférences
- ✓ SIELETTERS / SYSIPHE est ouvert aux utilisateurs extérieures :
  - OTAN, AED ou arrangements bilatéraux
  - EUFAR, European Facility for Airborne Research (SIELETTERS)
  - Communautés nationales et internationales : scientifiques, industrielles ou institutionnelles





Merci pour votre attention



**ONERA**  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

# HySpex ODIN-1024 main characteristics

Parameter	VNIR	SWIR
Spectral range	400 – 1000 nm	950 – 2500 nm
Spectral resolution	3.0 nm	6.1 nm
Pixel FOV	0.25 mrad / 0.125 mrad	0.25 mrad
Total across track FOV	15°	15°
Spatial resolution	1024 px / 2048 px	1024 px
F-number	F1.64	F2.0



- Common fore-optics design
- On-board calibration system

# Sieleters main characteristics

Parameter	MWIR	LWIR
Spectral range	3.0 - 5.2 $\mu\text{m}$	8.1 – 11.5 $\mu\text{m}$
Spectral resolution	11 $\text{cm}^{-1}$	5 $\text{cm}^{-1}$
Pixel FOV	0.25 mrad	0.25 mrad
Total across track FOV	15°	15°
Spatial resolution	1016 px	1016 px
F-number	F4.0	F3.0

- Two separate static Fourier transform spectral imagers
- MCT IR-FPAs from Sofradir, 1016x440 pixels
- Entirely cryogenic (liquid nitrogen, 77K)
- Stabilized

