

# IMAGERIE HYPERSPECTRALE DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE AVEC LE SYSTÈME AÉROPORTÉ SIELETTERS

Olivier Gazzano<sup>1</sup>, Yann Ferrec<sup>1</sup>, Christophe Coudrain<sup>1</sup>, Laurent Rousset-Rouvière<sup>1</sup>

1: ONERA – The French Aerospace Lab, BP 80100, F-91123 Palaiseau Cedex France (olivier.gazzano@onera.fr)

## Résumé

SIELETTERS est un système d'imagerie hyperspectrale aéroporté qui couvre les bandes de transmission atmosphérique de 3.0  $\mu\text{m}$  à 11.8  $\mu\text{m}$ . Ce système fait partie du projet SYSIPHE qui opère sur des longueurs d'onde comprises entre 0.4  $\mu\text{m}$  et 11.8  $\mu\text{m}$ . Le pas d'échantillonnage au sol de l'instrument SIELETTERS est de 0.5 m à 2000 m au-dessus du sol et la résolution spectrale est comprise entre 6.7  $\text{cm}^{-1}$  et 14.4  $\text{cm}^{-1}$ . Dans cet article, nous introduisons le projet SYSIPHE, incluant les campagnes de mesures aéroportées effectuées, et le système SIELETTERS. Nous présentons les résultats que nous avons obtenus avec le système. Les images hyperspectrales de ces campagnes de mesures sont compatibles avec les algorithmes de correction atmosphérique, de séparation émissivité/température, de classification des données spectrales et de détection d'anomalies. Le système SIELETTERS est ouvert aux communautés nationales et internationales (scientifiques, industrielles ou institutionnelles), à l'EUFRAR ou encore à des utilisateurs comme l'OTAN et l'AED.

**Mots clés :** Hyperspectral imaging, Thermal infrared, Optical interferometry, Remote sensing.

## Abstract

*SIELETTERS is an airborne hyperspectral imaging system that covers the mid- and long-wavelength infrared bands. It is part of the SYSIPHE system that covers bands from 0.4  $\mu\text{m}$  to 11.8  $\mu\text{m}$ . The ground sampling distance of the SIELETTERS instrument is 0.5 m when 2000 m above the ground and the spectral resolution is between 6.7  $\text{cm}^{-1}$  and 14.4  $\text{cm}^{-1}$ . In this article, we introduce the SYSIPHE project, the SIELETTERS system and we show the latest results that we have obtained with the system. Our recent studies led to significant improvements on the quality of the hyperspectral images and of the spectra. The hyperspectral images from the previous airborne campaigns are now compatible with atmospheric compensations, data classifications and anomaly detection. The system is opened to external users.*

**Keywords :** *Imagerie hyperspectrale, Infrarouge thermique, Interférométrie optique, Télédétection.*

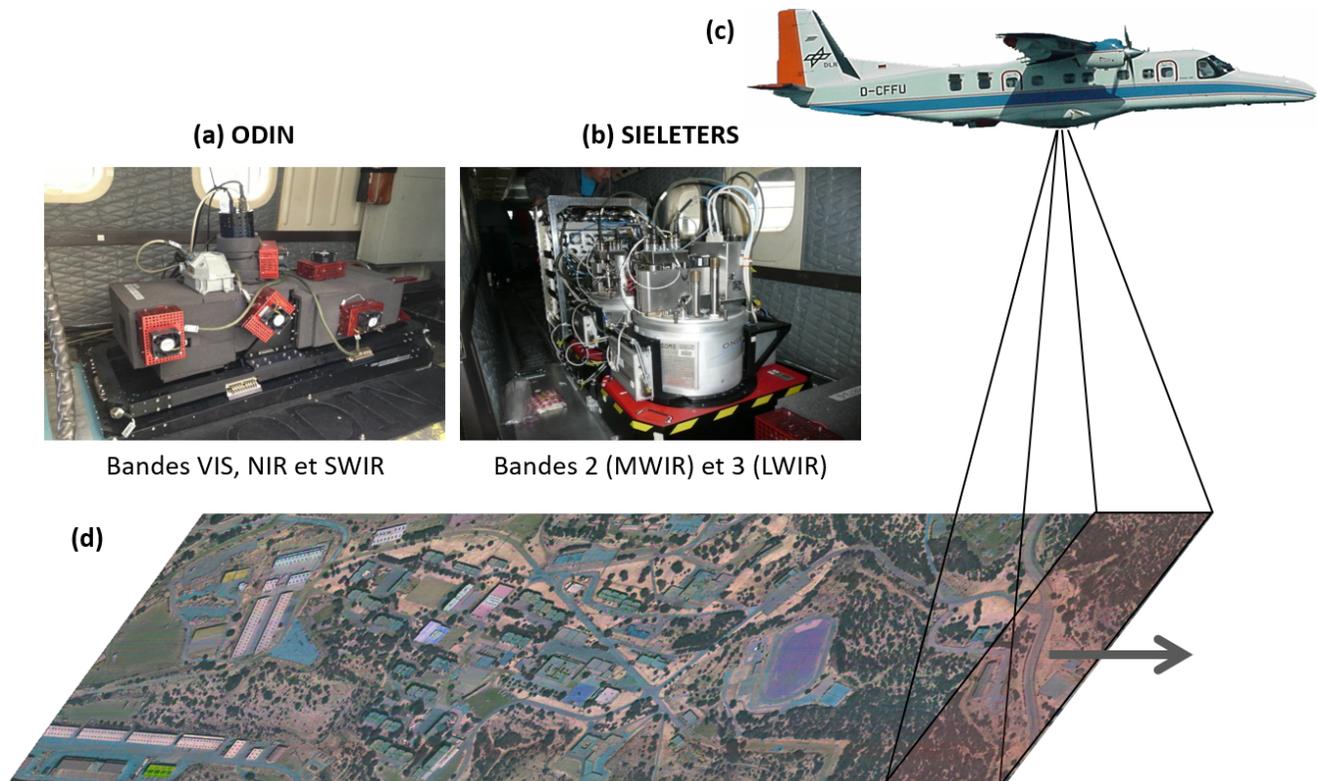
## Introduction

SYSIPHE est un système d'imagerie hyperspectrale qui couvre toutes les bandes de transmission atmosphérique entre 0.4  $\mu\text{m}$  et 11.8  $\mu\text{m}$ . Le pas d'échantillonnage est de 0.5 m pour une fauchée de 500 m à une altitude de 2000 m au-dessus du niveau du sol. Une meilleure résolution spatiale est accessible pour les longueurs d'onde inférieures à 2.5  $\mu\text{m}$ . SYSIPHE comporte deux sous systèmes d'imagerie, SIELETTERS développé par l'ONERA et HySpex ODIN-1024 conçu par Norsk Elektro Optikk (NEO). L'ensemble est installé dans un Dornier Do-228 opéré par le Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Le système SYSIPHE comprend aussi une chaîne de post-traitement, le STAD, développé par l'ONERA. Le système SYSIPHE permet de produire des images hyperspectrales géo-référencées et calibrées en luminance, émissivité ou en réflectance. Nous pouvons aussi générer des images en température de brillance.

SYSIPHE est un système à l'état de l'art en Europe et il est ouvert aux utilisateurs extérieurs. La première

campagne aéroportée avec le système complet s'est déroulée en 2013. Plusieurs autres campagnes ont eu lieu depuis 2013 pour des applications militaires ou civiles (section 1.4).

Dans la section 1, nous introduisons le système SYSIPHE, ses deux sous systèmes (HySpex ODIN-1024 pour les bandes de 0.4  $\mu\text{m}$  à 2.5  $\mu\text{m}$  et SIELETTERS pour les bandes de 3.0  $\mu\text{m}$  à 11.8  $\mu\text{m}$ ) et les quatre campagnes aéroportées que nous avons effectuées. L'instrument SIELETTERS, qui est un imageur à transformée de Fourier statique, et la chaîne de traitement associée seront décrits dans la section 2. Dans la section 3, nous présenterons quelques données hyperspectrales obtenues avec l'instrument SIELETTERS, comme des images en fausses couleurs géoréférencées, et des spectres calibrés en luminance. Nous comparerons ces résultats à des mesures de vérité terrain.



**FIGURE 1 : Le système SYSIPHE. (a,b,c)** Photographies des instruments HySpex ODIN-1024 (a) et SIELETTERS (b) installés dans un Dornier Do-228 opéré par le DLR (c). **(d)** Exemple d'une image en fausses couleurs RVB dans la bande 3 ( $R = 9.13 \mu\text{m}$ ,  $V = 9.52 \mu\text{m}$  et  $B = 10.75 \mu\text{m}$ ).

## 1. Le système SYSIPHE

### 1.1. Présentation du projet SYSIPHE

SYSIPHE (SYStème Spectro-Imageur de mesure des Propriétés Hyperspectrales Embarqué) est un système qui permet d'acquérir des images aéroportées hyperspectrales pour des longueurs d'onde couvrant des bandes allant du visible à l'infrarouge thermique. Le système est le fruit d'une collaboration entre la France et la Norvège. Les objectifs du projet SYSIPHE sont d'une part de développer des savoir-faire, outils et technologies pour la conception et la fabrication d'un système d'imagerie hyperspectrale aéroporté et d'autre part, d'approfondir les connaissances sur les phénomènes infrarouges et d'être capable de spécifier un système opérationnel.

SYSIPHE couvre une large gamme de longueurs d'onde (avec plus de 600 bandes spectrales, allant de  $0.4 \mu\text{m}$  à  $11.5 \mu\text{m}$ ), a une résolution spatiale importante de  $0.5 \text{ m}$  et a une fauchée de  $500 \text{ m}$  (à une hauteur au sol de  $2000 \text{ m}$ ). Pour atteindre ces performances uniques, SYSIPHE est composé de trois instruments. Le premier instrument, ODIN, est un spectro-imageur dispersif qui couvre les domaines visible (VIS,  $[0.4 - 0.8 \mu\text{m}]$ ), proche infrarouge (NIR,  $[0.8 - 1.4 \mu\text{m}]$ ) et la bande SWIR ( $[1.4 - 2.5 \mu\text{m}]$ ). Cet instrument a été développé par Norsk

Elektro Optikk (NEO) en Norvège (figure 1(a)). Les deux autres instruments, SIELETTERS, sont des spectro-imageurs statiques à transformée de Fourier qui couvrent la bande 2 (MWIR,  $[3 - 5.3 \mu\text{m}]$ ) et la bande 3 (LWIR,  $[8 - 11.5 \mu\text{m}]$ ). Ils ont été développés par l'ONERA en France (figure 1(b)). Le poids global du système SIELETTERS est inférieur à  $300 \text{ kg}$  pour les deux voies. Dans le cadre du projet SYSIPHE, ces trois instruments sont intégrés dans le même avion, un Dornier Do-228 opéré par le DLR (figure 1(c)).

Grâce à ces instruments réunis dans le même porteur, le système SYSIPHE fournit jusqu'à 600 images spectrales géoréférencées et calibrées, toutes les images étant acquises quasi-simultanément et dans le même environnement. Quelques caractéristiques du système sont écrites dans le tableau 1. En utilisant plusieurs lignes de vols, nous avons évalué la qualité du recalage des images entre les différents instruments et nous avons obtenu que la qualité du recalage est inférieure à 0.3 pixels (Rousset-Rouviere et al., 2017).

### 1.2. HySpex ODIN-1024 : $[0.4 - 2.5] \mu\text{m}$

HySpex ODIN-1024 (Blaaberg et al., 2014a) est la composante visible, proche infrarouge et SWIR du système SYSIPHE. Le système est constitué de deux

Système	HySpex Odin-1024		SIELETTERS	
	VIS-NIR	SWIR	Bande 2 (MWIR)	Bande 3 (LWIR)
Domaine spectral	0.4 – 1.0 $\mu\text{m}$	0.95 – 2.5 $\mu\text{m}$	3.0 – 5.4 $\mu\text{m}$	8.1 – 11.8 $\mu\text{m}$
Résolution spectrale	3.0 nm	6.1 nm	14.4 $\text{cm}^{-1}$ (23 nm à 4 $\mu\text{m}$ )	6.7 $\text{cm}^{-1}$ (67 nm à 10 $\mu\text{m}$ )
Nombre de bandes spectrales	$\approx 197$	$\approx 256$	$\approx 130$	$\approx 75$
Champ de vue par pixel	0.25/0.125 mrad	0.25 mrad	0.25 mrad	0.25 mrad
Champ de vue latéral	15°	15°	15°	15°
Résolution spatiale à 2000 m	0.25 m ou 0.5 m	0.25 m ou 0.5 m	0.5 m	0.5 m
Ouverture	$F1.64$	$F2.0$	$F4.0$	$F3.0$
FTM en vol à la fréquence de Nyquist	–	–	0.14	0.09

**TABLEAU 1:** Principales caractéristiques du système SYSIPHE.

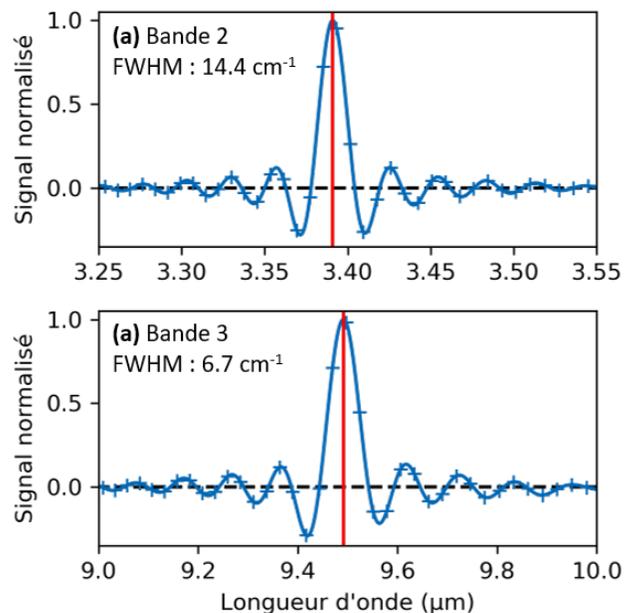
spectro-imageurs de type « pushbroom » basés sur des systèmes dispersifs (Figure 1(a)). Ces deux modules partagent la même optique de tête et la même fente d'entrée afin d'assurer le meilleur recalage possible entre les images des deux modules. La résolution spectrale est de 3.0 nm dans le visible et le proche infrarouge et de 6.1 nm dans la bande SWIR (Tableau 1). HySpex ODIN-1024 a un système de calibration spectrale et radiométrique embarqué. Davantage d'informations sur le système sont indiquées dans la références (Blaaberg et al., 2014a,b).

### 1.3. SIELETTERS : [3.0 – 5.4] $\mu\text{m}$ et [8.1 – 11.8] $\mu\text{m}$

SIELETTERS (Coudrain et al., 2015) est la composante dans l'infrarouge thermique du système SYSIPHE. Il est composé de deux spectromètres statiques à transformée de Fourier (Ferrec et al., 2011; Lucey et al., 2012). Un instrument est dédié à la bande 2 (MWIR) et un autre à la bande 3 (LWIR). La résolution spectrale, définie comme la largeur à mi-hauteur d'un spectre d'une source monochromatique et que nous avons mesurée en utilisant un laser, est de 14.4  $\text{cm}^{-1}$  dans la bande 2 et de 6.7  $\text{cm}^{-1}$  dans la bande 3 (tableau 1 et figure 2). Chaque instrument, incluant l'interféromètre et le système d'imagerie, est placé dans un cryostat et refroidi à des températures cryogéniques ( $\approx 90$  K) afin d'accroître la performance de l'instrument et d'obtenir des mesures absolues.

Chaque instrument SIELETTERS est installé sur une plateforme gyro-stabilisée dédiée (basée sur le système Leica Geosystems PAV80) pour contrôler la ligne de visée. La ligne de visée est stabilisée en temps réel afin d'être la plus proche possible du nadir pendant l'enregistrement. Le système enregistre le vol entier (incluant le décollage et l'atterrissage) et le couplage entre les deux plateformes. Un autre système, une unité de contrôle inertiel de haute précision (IMU, PosPac 610 de Applanix) est installée sur une des deux plateformes

gyro-stabilisée. Cette unité est configurée en mode boucle ouverte afin de mesurer l'écart de la ligne de visée au nadir à chaque instant de la séquence d'acquisition. Cela permet de pouvoir améliorer la qualité du recalage des images en post-traitement (section 2). La figure 1(b) montre une image de l'instrument SIELETTERS, où chaque instrument est installé sur son unité de stabilisation (en rouge) à l'intérieur d'un Dornier 228.



**FIGURE 2:** Fonctions d'appareil de SIELETTERS (a) en Bande 2 et (b) en Bande 3. Ces courbes sont obtenues à partir de l'inversion des interférogrammes obtenues par des mesures effectuées avec un laser et une sphères intégrante pour illuminer toute la pupille de l'instrument. Courbes bleues : résultats expérimentaux interpolés; Lignes rouges : longueur d'onde centrale du laser.



**FIGURE 3: Cibles utilisées lors des campagnes de mesures aéroportées. (a-f)** Surfaces de référence au sol pour des mesures de vérité terrain : (a) panneaux noirs et blancs, (b) panneaux de linoléum, (c) panneaux de polystyrène, (d) béton peint, (e) sable, (f) argile. **(g)** Exemples de cibles militaires utilisées durant une campagne.

#### 1.4. Campagnes de mesures aéroportées

La première campagne de mesures aéroportée a eu lieu en 2013 sur la base aérienne de Cazaux. Cet endroit a été choisi pour la présence d'une grande mire infrarouge active et appartenant à la DGA-EV. Cette mire permet de pouvoir mesurer en vol les performances radiométriques et d'imagerie du système infrarouge. La mire est composée de panneaux indépendants afin de pouvoir créer des motifs où la température est bien maîtrisée. Par exemple, nous avons mesuré la fonction de transfert de modulation en utilisant cette mire (Coudrain et al., 2015). Les caractéristiques principales des instruments HySpex ODIN-1024 et SIELETTERS ont été mesurées pendant cette campagne et confirmées lors de campagnes suivantes (tableau 1). Cette première campagne a permis de tester et de certifier l'instrument.

Une autre campagne de mesures aéroportée a eu lieu en août 2015 et nous a permis d'effectuer des mesures dans des conditions météorologiques de ciel dégagé ou partiellement nuageux. Cette campagne a eu lieu dans le sud de la France, au-dessus de la base militaire de

Canjuers. Un des objectifs de cette campagne était d'effectuer les vérifications supplémentaires afin de qualifier le système SYSIPHE. En particulier, cela comprend la vérification de la calibration spectrale et radiométrique des instruments et également de la correction atmosphérique.

Un ensemble de mires a été installé au sol afin de pouvoir effectuer de la vérité terrain et comparer ces résultats aux mesures des instruments SYSIPHE. Il s'agit, entre autres, de surfaces de linoléum, de mires noires et blanches, de polystyrène, de sable et de béton peint (figures 3(a-f)). Par ailleurs, des scénarios militaires ont été déployés sur la base de Canjuers afin d'acquérir des images hyperspectrales aéroportées de ces cibles dans toutes les bandes du système SYSIPHE. La figure 3(g) illustre quelques cibles militaires qui étaient présentes lors de l'acquisition des images hyperspectrales.

Cette campagne de 2015 a impliqué plus de 50 personnes et a été un succès. Plusieurs vols de jour et un vol de nuit ont été effectués. Différentes conditions météorologiques ont été rencontrées, comme un ciel dégagé, un ciel nuageux et du vent, permettant de

conduire de nouvelles études qui évaluent la performance des produits hyperspectraux par rapport aux conditions météorologiques.

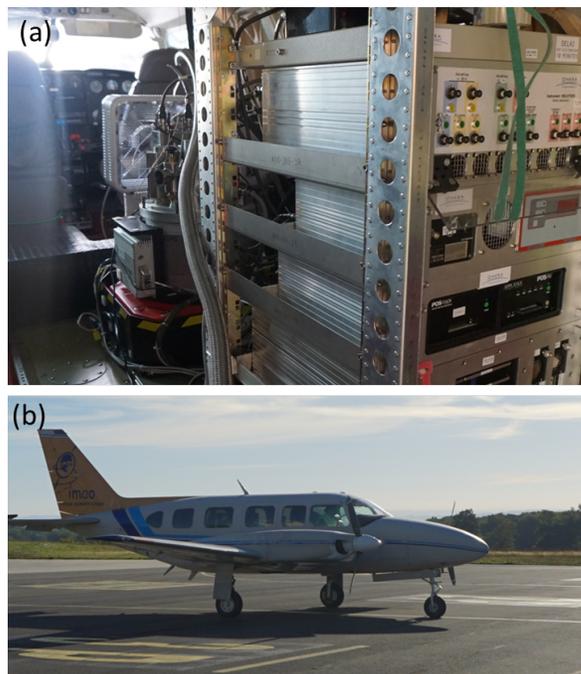
En 2016, nous avons testé avec succès l'instrument bande 3 (LWIR) de SIELETTERS dans un autre avion, un Piper PA31 opéré par l'entreprise française IMAO. L'instrument a été opéré sur 3 vols composés de 6 à 8 passes préalablement définis en scénarios. Des mesures ont également été faites par IMAO en parallèle d'une passe. Ces mesures ont consisté à réaliser des mosaïques d'une voie ferrée avec une caméra visible et un LIDAR et elles ont permis d'obtenir des images visibles à haute résolution spatiale et un modèle numérique de surfaces de la zone survolée. Cette campagne a prouvé la possibilité d'opérer un instrument SIELETTERS seul dans un avion plus léger et plus facile d'accès que le Dornier 228 (figure 4).

Une autre campagne aéroportée SYSIPHE a eu lieu en janvier 2019, avec seulement les deux instruments SIELETTERS, au-dessus de Canjuers, Hyères et Salon-de-Provence, où les cibles étaient installées et caractérisées afin d'avoir une vérité terrain pour les mesures aéroportées. Un des objectifs de cette campagne était d'acquérir des données et des images spectrales avec des scénarios d'hiver. Plus de 80 lignes de vol ont été acquises, y compris de nuit. Plus de 50 personnes ont été impliquées dans cette campagne, principalement au sol pour préparer les cibles civiles et militaires et pour effectuer les mesures de vérité terrain.

## 2. L'instrument SIELETTERS : un spectro-imageur statique à transformée de Fourier

Cette section et les suivantes sont dédiées à l'instrument SIELETTERS. Nous décrivons plus en détails l'instrument dans cette section. Dans la section 3, nous montrerons quelques résultats obtenus lors des campagnes aéroportées.

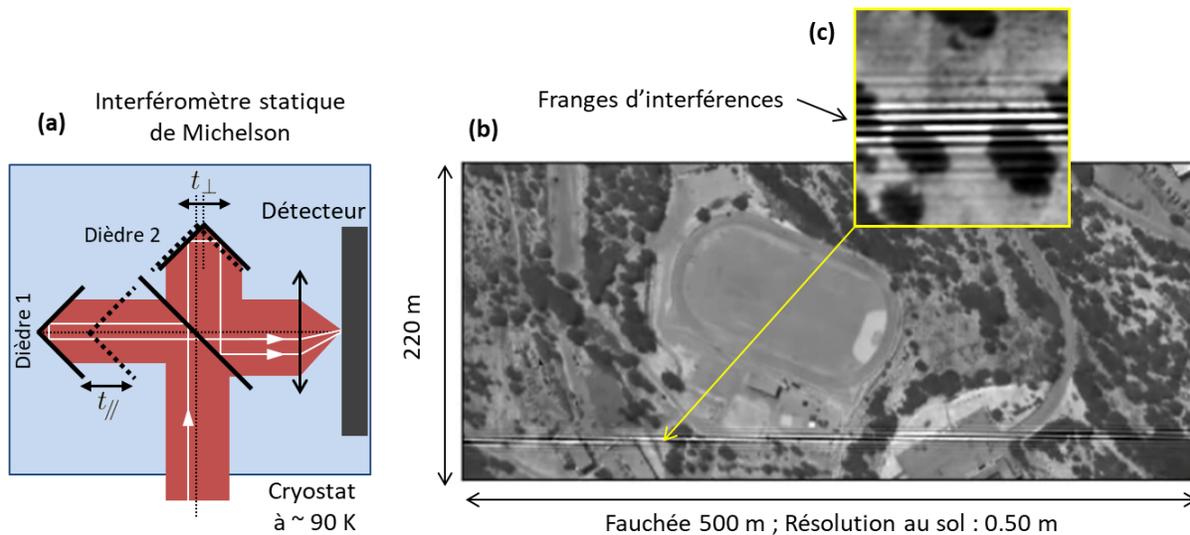
L'instrument SIELETTERS est constitué de deux spectro-imageurs statiques à transformée de Fourier. L'utilisation d'un interféromètre statique pour la spectro-imagerie à transformée de Fourier et à grande étendue a été proposée en 1987 (Vermande et al., 1987) et, selon nos connaissances, démontrée expérimentalement pour la première fois en 1996 (Cabib et al., 1996). Depuis, plusieurs systèmes ont été développés pour des démonstrations en laboratoire (Horton et al., 1997; Zhang et al., 2002; Yang et al., 2003; Ferrec et al., 2007), au sol (Cabib, 2008; Barducci et al., 2009; Fossi et al., 2016) ou aéroportées (Puckrin et al., 2009; Ferrec et al., 2011; Lucey et al., 2012; Wang et al., 2015; Phua, 2016).



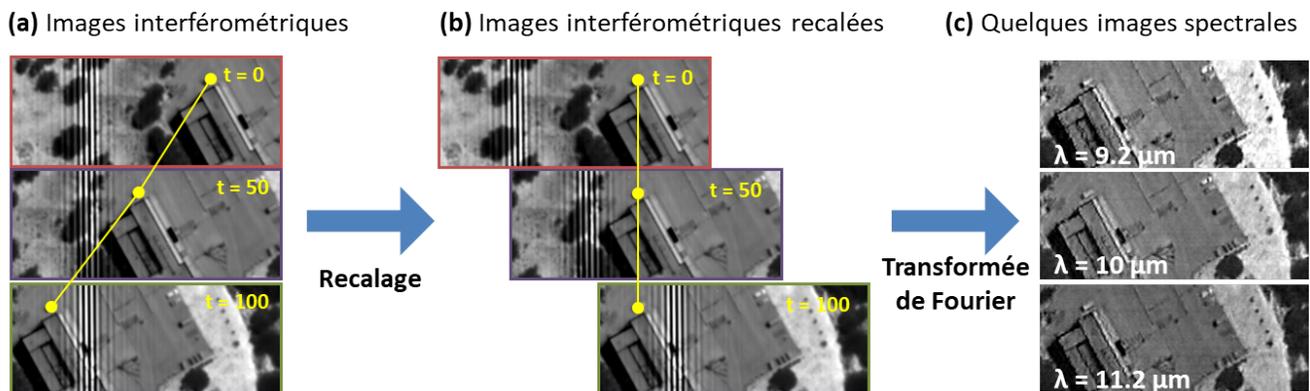
**FIGURE 4:** L'instrument SIELETTERS bande 3 (a) installé dans un Piper PA31 (b) opéré par l'entreprise IMAO lors de la campagne 2016. L'instrument a été opéré sur 3 vols composés de 6 à 8 passes préalablement définis en scénarios. Des mesures ont également été faites par IMAO en parallèle d'une passe.

La particularité de l'instrument SIELETTERS est qu'il opère dans l'infrarouge thermique, jusqu'à  $11.8 \mu\text{m}$ . De plus, l'interféromètre et le système d'imagerie sont refroidis à des températures cryogéniques ( $\approx 90 \text{ K}$ ) afin de réduire le bruit introduit par le fond instrumental sur le signal. Les instruments SIELETTERS sont installés sur une plateforme de stabilisation afin de réduire l'impact du roulis, du tangage et du lacet de l'avion sur les images (figure 1(b)).

L'interféromètre est un interféromètre de Michelson constitué de deux dièdres, d'une lame séparatrice et d'une lame compensatrice. Ces éléments optiques et leurs supports sont tous en ZnSe afin de limiter les contraintes mécaniques lors du refroidissement de l'instrument (Figure 5(a)) (Coudrain et al., 2015). Les dièdres ont été translattés longitudinalement ( $t_{//}$  dans la figure 5(a)) afin d'ajuster la position centrale des franges d'interférence, position qui correspond à la différence de marche nulle, dans le champ. Une translation transverse d'un dièdre par rapport à l'autre ( $t_{\perp}$ ) a été effectuée pour ajuster la période spatiale des franges d'interférences (Ferrec et al., 2011). Quand  $t_{\perp}$  est assez grand, les franges d'interférences apparaissent principalement rectilignes sur le détecteur placé au plan focal du système d'imagerie. La figure 5(b) montre l'exemple d'une image brute de l'instrument SIELETTERS en bande 3 une fois que la



**FIGURE 5: SIELETTERS : un spectro-imageur statique à transformée de Fourier.** (a) Schéma simplifié du système SIELETTERS. Il est composé d'un interféromètre de Michelson constitué de deux dièdres (Ferrec et al., 2011). Aucune pièce n'est mobile dans l'instrument lors d'une acquisition. Toutes les optiques sont refroidies à environ 90 K. (b) Exemple d'une image interférométrique prise par l'instrument SIELETTERS bande 3 (LWIR). Les franges d'interférences sont principalement visibles autour de la différence de marche nulle, au niveau de la partie basse de l'image. (c) Gros plan sur les franges d'interférences.



**FIGURE 6: Conversion d'images brutes vers des images spectrales.** (a) Quelques images brutes rognées prises par l'instrument SIELETTERS bande 3. Cette figure illustre la manière dont l'acquisition est effectuée. (b) Une étape de recalage des images est effectuée afin de pouvoir extraire des interférogrammes à partir des images. (c) Une dernière étape, qui comprend une transformation de Fourier, consiste à convertir les interférogrammes en spectres. En répétant cette étape pour tous les points de la scène, nous obtenons des images spectrales. Trois images spectrales parmi les  $\approx 75$  que nous calculons avec l'instrument Bande 3 sont représentées ici.

correction des non-uniformités et des pixels défectueux a été appliquée. La correction des non-uniformités permet de prendre en compte les inhomogénéités de sensibilité et de réponse des différents photo-sites du détecteur infrarouge. Les franges d'interférences sont approximativement le long du grand côté du détecteur et elles sont localisées sur toute l'image. L'effet des franges sur l'image est plus important autour de la différence de marche nulle, c'est-à-dire dans la partie basse de l'image de la figure 5(c).

Pour notre système, l'interféromètre de Michelson est

statique. Cela signifie qu'aucune pièce mécanique ne bouge durant une acquisition. Les différences de marche ne sont donc pas dépendantes du temps. Cependant, la différence de marche pour un flux lumineux provenant d'un point au sol et vu par la caméra au travers de l'interféromètre change au cours d'une acquisition grâce au déplacement de l'avion. Par exemple, comme il est montré dans la figure 6(a), le coin du bâtiment mis en évidence par le point jaune se déplace dans le champ de la caméra vers la gauche quand le temps  $t$  augmente. Ainsi, lorsque ce point aura traversé tout le champ de la

caméra, toutes les différences de marches accessibles par le système auront été vues pour ce point (ce qui correspond à 440 différences de marches différentes dans le cas de SIELETTERS).

Après la prise de mesures, nous procédons au recalage des images afin qu'à chaque point du sol soit associé un même pixel sur l'image recalée. Ainsi, la scène apparaît statique sur la caméra (aux défauts de recalage et de stéréoscopie près) tandis que les franges d'interférences vont défiler sur la scène. Cela est montré schématiquement sur la figure 6(b). Avec la dernière version de notre chaîne de traitements des images, le recalage est effectué par une méthode en deux étapes. En première étape, nous pré-recalons les images en utilisant les données de la ligne de visée enregistrée durant le vol (roulis, tangage et lacet), de la position de l'instrument par rapport à la plateforme de stabilisation et d'un modèle numérique de terrain. Nous trouvons que l'erreur de recalage a un écart-type de l'ordre de 0.1 pixel. Cette imprécision de recalage est faible, correspondant à seulement 5 cm au sol quand l'avion est situé à 2000 m au-dessus du sol, mais génère pourtant des artéfacts sur les images spectrales. Un défaut de recalage impacte principalement les interfaces entre des zones de luminances différentes. C'est pourquoi en seconde étape nous faisons un calage en effectuant une corrélation d'images sur les images pré-recalées à l'étape précédente. Au final, l'erreur sur la corrélation des images est bien plus faible que 0.1 pixel, mais elle est difficilement estimable sur l'image entière. L'ajout de cette seconde étape dans la chaîne de traitement a permis d'accroître la qualité géométrique des images spectrales, notamment aux interfaces entre des zones de luminances différentes.

Une fois que l'étape de recalage est effectuée, nous pouvons extraire les interférogammes de chaque pixel à partir des images recalées. Ensuite, connaissant la carte des différences de marche (que nous mesurons au laboratoire en utilisant un laser) et d'autres paramètres estimés en laboratoire, nous pouvons effectuer une transformation de Fourier sur chaque interférogramme. Le résultat de cette étape permet d'obtenir un tableau en trois dimensions où deux dimensions correspondent à la position au sol et où la troisième dimension correspond à l'information spectrale. Trois images spectrales sont affichées dans la figure 6(c). Comme indiqué dans le tableau 1, nous avons  $\approx 130$  images spectrales dans la bande 2 et  $\approx 75$  images spectrales dans la bande 3.

L'étalonnage spectral de l'instrument est effectué en laboratoire grâce à des lasers dont la longueur d'onde est vérifiée par un spectromètre de référence. L'étalonnage radiométrique absolu est réalisé en laboratoire grâce à des mesures avec des corps noirs dont la température de brillance a été étalonnée.

### 3. Résultats

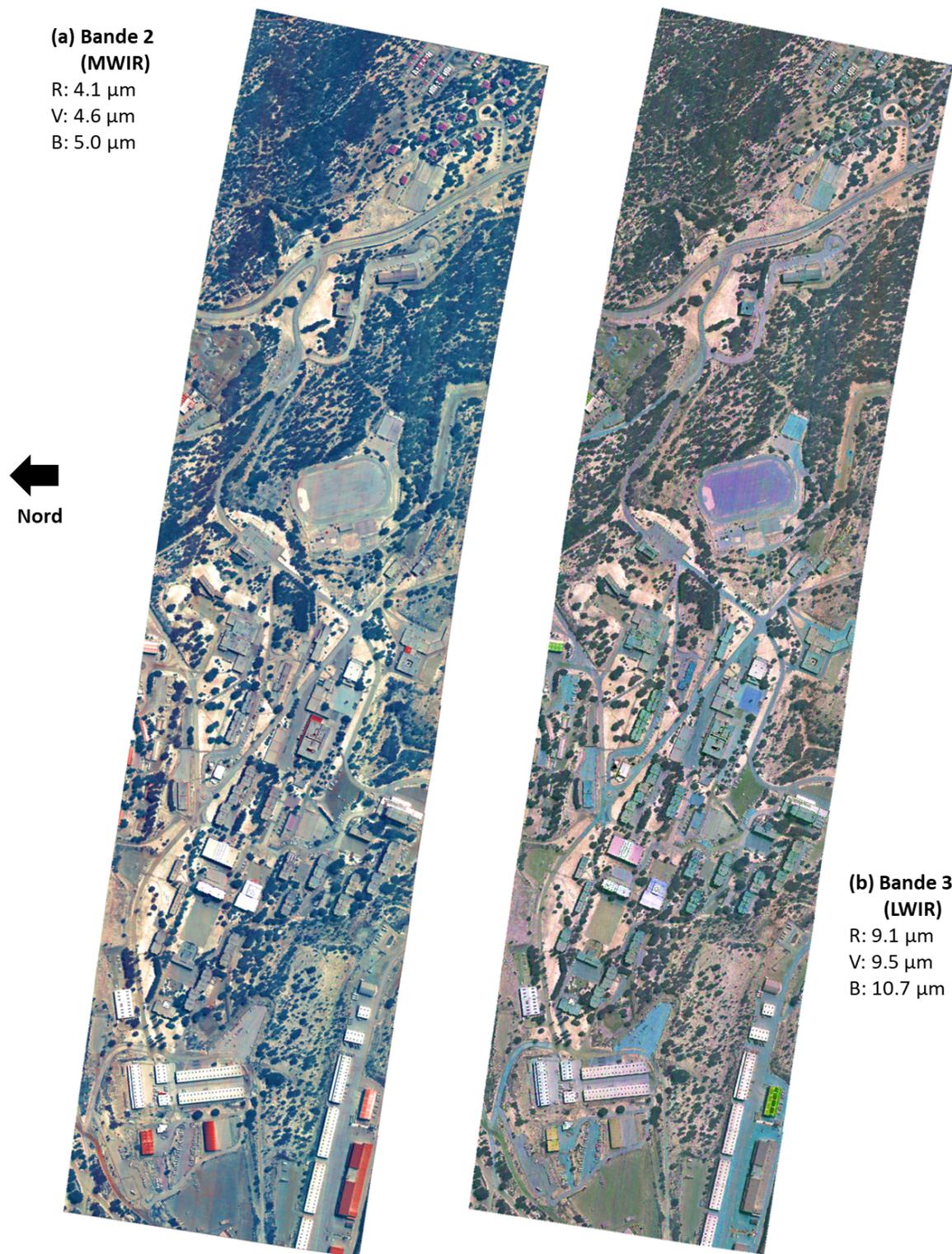
À partir des données hyperspectrales, nous pouvons tracer des images en fausses couleurs RVB, c'est-à-dire que le rouge, le vert et le bleu correspondent à des longueurs d'onde différentes des longueurs d'onde usuelles. Les figures 7(a) et (b) montrent des images géoréférencées RVB où  $R = 4.1 \mu\text{m}$ ,  $V = 4.6 \mu\text{m}$  et  $B = 5.0 \mu\text{m}$  (figure 7(a)) et  $R = 9.1 \mu\text{m}$ ,  $V = 9.5 \mu\text{m}$  et  $B = 10.7 \mu\text{m}$  (figure 7(b)). La direction du vol est du bas vers le haut de l'image et le nord est vers la gauche.

Plusieurs couleurs sont visibles dans ces images en fausses couleurs dans l'infrarouge thermique (Figures 7(a,b)). Par exemple, les arbres apparaissent essentiellement verts, le toit des bâtiments peut être rouge, vert, rose, jaune, bleu, violet en fonction des matériaux qui les constituent. Davantage de couleurs sont présentes dans la bande 3, ce qui indique que plus de signatures spectrales sont présentes dans cette bande, au moins pour les longueurs d'onde que nous avons choisies pour la représentation RVB. Avec ces deux images, des données de seulement six bandes sont utilisées, ce qui suggère que plus d'informations devraient pouvoir être extraites de ces données hyperspectrales en faisant de la classification ou de la détection d'anomalies. Ces deux méthodes peuvent permettre d'utiliser les 600 bandes spectrales du système SYSIPE.

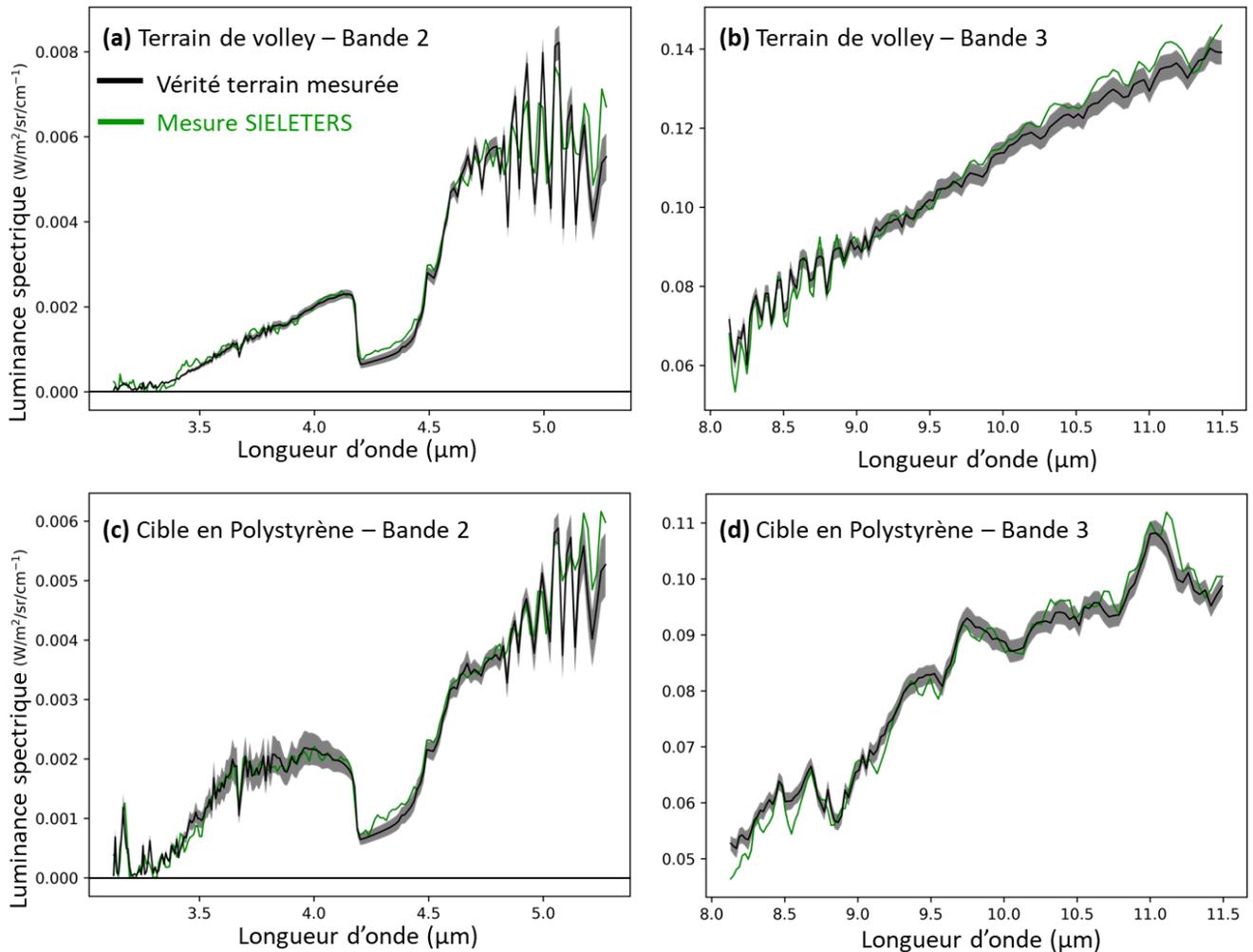
Au cours des campagnes de mesures aéroportées de l'été 2015 et de l'hiver 2019, nous avons installé des cibles au sol, comme mentionné dans la section 1.4 et montré dans la figure 3(a-f). La luminance spectrique des cibles était mesurée au moment du passage de l'avion. Les propriétés de l'atmosphère étaient aussi mesurées afin de pouvoir estimer la luminance spectrique des mires au niveau de pupille de l'instrument SIELETTERS. Des exemples de tels spectres sont tracés en noir sur la figure 8 (barres d'erreurs en gris). Nous précisons que la zone de plus faible luminance autour de  $4.3 \mu\text{m}$  est causée par l'absorption du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et que les oscillations qui apparaissent dans les spectres dans les domaines  $[5.0 \mu\text{m} - 5.5 \mu\text{m}]$  et  $[8 \mu\text{m} - 9 \mu\text{m}]$  sont causées par l'absorption des molécules d'eau de l'atmosphère.

Nous pouvons aussi extraire la luminance spectrique des cibles à partir des données hyperspectrales de l'instrument SIELETTERS. Des exemples de spectres issus des images de SIELETTERS sont tracés en vert sur la figure 8. Une moyenne spatiale sur une zone de  $3 \times 3$  pixels est effectuée, ce qui correspond à une surface au sol de  $2.25 \text{ m}^2$ . La grande fidélité des spectres de SIELETTERS par rapport aux mesures de vérités terrain montre la bonne qualité de l'ensemble du système SIELETTERS.

Dans le but d'estimer le bruit spatial sur les images spectrales en sortie de la chaîne de traitement, nous

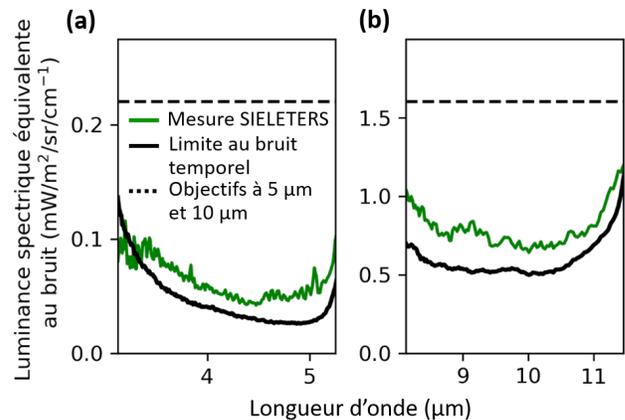


**FIGURE 7: Images en fausses couleurs en bande 2 (a) et en bande 3 (b).** Alors que les spectres sont plus uniformes dans l'infrarouge thermique que dans le visible, des couleurs apparaissent dans ces images, surtout en bande 3 (b). Ces images, pour lesquelles seulement trois bandes parmi 130 bandes en Bande 2 et 75 bandes en Bande 3 sont sélectionnées, montrent que de l'information spectrale peut être extraite. Davantage d'informations peuvent être exploitées en faisant de la classification des spectres par exemple.



**FIGURE 8: Spectres mesurés par SIELETTERS et par des mesures de vérité terrain.** (a-d) Luminance spectrique de cibles mesurées par l'instrument SIELETTERS (courbes vertes) et par des mesures de vérités terrains faites au sol et dont la luminance spectrique est estimée au niveau de la pupille de l'instrument SIELETTERS (courbes noires et barres d'erreurs en gris). Pour les spectres SIELETTERS, nous avons effectué une moyenne spatiale sur une zone de 3×3 pixels. Les mesures montrées ici sont effectuées sur un terrain de volley (a,b) et sur une cible en polystyrène (c,d).

analysons les images acquises lors de la campagne aéroportée de 2019. La luminance spectrique équivalente au bruit est obtenue en faisant pour chaque image spectrale un écart-type spatial sur une zone au sol qui est assez uniforme. Les résultats sont tracés dans les figures 9(a,b). Nous obtenons des résultats meilleurs que nos objectifs fixés à 5 μm et à 10 μm. Les résultats sont très proches de la limite liée au bruit temporel des détecteurs (courbes noires), ce qui confirme la bonne qualité des images spectrales vis-à-vis des contraintes techniques liées au détecteur.



**FIGURE 9: Bruit spatial sur une grande zone assez uniforme lors d'une mesure aéroportée.** Résultats en Bande 2 (a) et en Bande 3 (b).

## 4. Conclusion

Les développements récents sur la chaîne de traitements de SIELETTERS ont permis d'améliorer la qualité des images spectrales et des spectres associés. Comme montré dans cet article, nous avons des images de bonne qualité et des spectres proches des spectres attendus. La correction atmosphérique, la séparation émissivité/température, la classification des données sont en cours sur les images acquises lors des campagnes passées et les résultats préliminaires sont prometteurs. Pour aller plus loin dans la qualité des images spectrales, nous envisageons d'utiliser un modèle numérique de surface. Ce dernier peut être obtenu en utilisant directement les séquences images acquises par l'instrument SIELETTERS (Barbanson-Graziussi, 2018).

En complément de la version aéroportée, nous sommes en train de développer une version sol de l'instrument SIELETTERS. Nous prévoyons d'effectuer de l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale.

Le système SIELETTERS est intégrable sur de nombreux avions de mesures et il est ouvert aux communautés nationales et internationales (scientifiques, industrielles ou institutionnelles), à l'EUFAR (European Facility for Airborne Research) et aussi aux utilisateurs extérieurs comme l'OTAN, l'AED ou via d'autres accords bilatéraux.

## Remerciements

Le projet SYSIPHE est financé par les ministères de la défense Français et Norvégien au travers respectivement de la DGA (Direction Générale de l'Armement) et du FFI. Les auteurs remercient l'ensemble des membres de l'équipe SYSIPHE et de l'entreprise IMAO.

## Références

Barbanson-Graziussi, C., 2018. Corrections des effets de relief en spectro-imagerie aéroportée. Thèse de doctorat.

Barducci, A., Castagnoli, F., Castellini, G., Guzzi, D., Marconi, P., Pippi, I., 2009. ALISEO on MIOsat : An Aerospace imaging interferometer for Earth Observation. Dans : 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol. 2. IEEE, pp. II-464–II-467.

Blaaberg, S., Løke, T., Baarstad, I., Fridman, A., Koirala, P., 2014a. A next generation VNIR-SWIR hyperspectral camera system : HySpex ODIN-1024. *Electro-Optical and Infrared Systems : Technology and Applications XI* 9249 (October 2014), 92490Y.

Blaaberg, S., Løke, T., Baarstad, I., Fridman, A., Koirala, P., 2014b. HySpex ODIN-1024 : a new high-resolution airborne HSI system. *Infrared Technology and Applications XL* 9070 (June 2014), 90700L.

Cabib, D., 2008. Performance and examples of measurements of a mid infrared interferometric hyperspectral imager. *Electro-Optical and Infrared Systems : Technology and Applications V* 7113 (October 2008), 711310.

Cabib, D., Buckwald, R. A., Garini, Y., Soenksen, D. G., may 1996. Spatially resolved Fourier transform spectroscopy (spectral imaging) : a powerful tool for quantitative analytical microscopy. Dans : Farkas, D. L., Leif, R. C., Priezzhev, A. V., Asakura, T., Tromberg, B. J. (Eds.), *Proc. SPIE 2678, Optical Diagnostics of Living Cells and Biofluids*. No. May 1996. pp. 278–291.

Coudrain, C., Bernhardt, S., Caes, M., Domel, R., Ferrec, Y., Gouyon, R., Henry, D., Jacquart, M., Kattnig, A., Perrault, P., Poutier, L., Rousset-Rouvière, L., Tauvy, M., Théas, S., Primot, J., 2015. SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures. *Optics Express* 23 (12), 16164.

Ferrec, Y., Taboury, J., Fournet, P., Sauer, H., Goudail, F., Chavel, P., Guérineau, N., Coudrain, C., Théas, S., Cymbalista, P., Primot, J., Deschamps, J., 2007. Design of a Fourier-transform Spectral Imager for Airborne Measurements. Dans : *Fourier Transform Spectroscopy/ Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment*. OSA, Washington, D.C., p. FThB3.

Ferrec, Y., Taboury, J., Sauer, H., Chavel, P., Fournet, P., Coudrain, C., Deschamps, J., Primot, J., 2011. Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer. *Applied Optics* 50 (30), 5894–5904.

Fossi, A. P., Ferrec, Y., Roux, N., D'almeida, O., Guérineau, N., Sauer, H., may 2016. Miniature and cooled hyperspectral camera for outdoor surveillance applications in the mid-infrared. *Optics Letters* 41 (9), 1901.

Horton, R. F., Conger, C. A., Pelligrino, L. S., oct 1997. High Etendue Imaging Fourier Transform Spectrometer : initial results. Dans : Descour, M. R., Shen, S. S. (Eds.), *Proc. SPIE, Imaging Spectrometry III*. Vol. 3118. SPIE, pp. 380–390.

Lucey, P. G., Wood, M., Crites, S. T., Akagi, J., may 2012. A LWIR hyperspectral imager using a Sagnac interferometer and cooled HgCdTe detector array. Dans : Shen, S. S., Lewis, P. E. (Eds.), *Proc. SPIE 8390, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII*. Vol. 8390. p. 83900Q.

Phua, P. B., 2016. Compact spectrometer (Lighthouse Photonics Pte. Ltd.).

Puckrin, E., Turcotte, C., Lahaie, P., Dube, D., Lagueux, P., Farley, V., Rolland, M., Chamberland, M., aug 2009. Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors. Dans : *Proc. SPIE 7482, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications III*. No. September 2009. IEEE, pp. 1–4.

Rousset-Rouvière, L., Coudrain, C., Fabre, S., Ferrec, Y., Poutier, L., Viallefont, F., Rivière, T., Ceamanos, X., Løke, T., Fridman, A., Baarstad, I., Skauli, T., Sisakoun, I., 2017. SYSIPHE, an airborne hyperspectral imaging system from visible to thermal infrared. Results from the 2015 airborne campaign. *EARSel eProceedings* 162, 1–15.

Vermande, P., Buil, C., Delbru, F., 1987. Interferometric Spectro-Imager System (ISIS). *Optical Systems for Space Applications* 0810 (September 1987), 117.

Wang, F., Zhou, J., Jing, J., Wu, Q., Cheng, W., dec 2015. Research on LASIS interferogram processing.

Yang, J., Ruan, P., Bin, X., Zhao, B., jun 2003. Large-aperture static imaging spectroscopy (LASIS). Dans : Larar, A. M., Tong, Q., Suzuki, M. (Eds.), *Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications*. Vol. 4897. p. 318.

Zhang, C., Xiangli, B., Zhao, B., Yuan, X., mar 2002. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope. *Optics Communications* 203 (1-2), 21–26.