HAL
open science

Description de la campagne aéroportée UMBRA : étude de l'impact anthropique sur les écosystèmes urbains et naturels avec des images THR multispectrales et hyperspectrales

Karine Adeline, Arnaud Le Bris, Fabien Coubard, Xavier Briottet, Nicolas Paparoditis, Françoise Viallefont, Nicolas Riviere, Jean-Pierre Papelard, Nicolas David, Philippe Déliot, et al.

To cite this version:

Karine Adeline, Arnaud Le Bris, Fabien Coubard, Xavier Briottet, Nicolas Paparoditis, et al.. Description de la campagne aéroportée UMBRA : étude de l'impact anthropique sur les écosystèmes urbains et naturels avec des images THR multispectrales et hyperspectrales. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2013, 202, pp.79-92. 10.52638/rfpt.2013.53 . hal-02370225

HAL Id: hal-02370225

https://hal.science/hal-02370225

Submitted on 19 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE AÉROPORTÉE UMBRA : ÉTUDE DE L'IMPACT ANTHROPIQUE SUR LES ÉCOSYSTÈMES URBAINS ET NATURELS AVEC DES IMAGES THR MULTISPECTRALES ET HYPERSPECTRALES :

Urban Material characterization in the sun and shade of Built-up structures and trees and their Retrieval from Airborne image acquisitions over two French cities (UMBRA)

Karine R.M. Adeline[1], Arnaud Le Bris[2], Fabien Coubard[2], Xavier Briottet[1], Nicolas Paparoditis[2], Françoise Viallefont[1], Nicolas Rivière[1], Jean-Pierre Papelard[2], Nicolas David[2], Philippe Déliot[1], Joël Duffaut[1], Laurent Poutier[1], Pierre-Yves Foucher[1], Véronique Achard[1], Jean-Philippe Souchon[2], Christian Thom[2], Sylvain Airault[2], Grégoire Maillet[2]

1 : ONERA, The French Aerospace Lab, 2 avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse cedex 4, France, prénom.nom@onera.fr

2 : IGN, 73 avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé, France, prénom.nom@ign.fr

Résumé

Durant ces dernières décennies, l'imagerie par télédétection aéroportée des milieux urbains reste un enjeu scientifique majeur. L'arrivée d'une nouvelle génération de caméras aéroportées permettant d'effectuer des acquisitions à très haute résolution spatiale et possédant un meilleur rapport signal sur bruit ouvre de nouvelles perspectives pour extraire l'information de ces environnements. En effet, la principale limitation de la plupart des méthodes de traitement des images dans ces milieux est due à la grande variété des matériaux qui les compose et à la géométrie dense et complexe qui les caractérise et peut induire de larges zones d'ombre. La campagne (UMBRA) a pour but d'acquérir un nouveau jeu de données de référence représentatif de deux villes françaises distinctes en vue de développer de nouvelles méthodes de correction atmosphérique au soleil et à l'ombre, de concevoir de futures caméras superspectrales dédiées à des applications de télédétection urbaine, et d'étudier des applications pour "ré-éclairer" des scènes à partir d'images urbaines terrestres. Ce papier détaille cette campagne ainsi que les prétraitements qui ont été effectués sur les différentes données acquises. De premiers résultats sont également présentés.

Mots clés : campagne expérimentale, imagerie aéroportée, haute résolution spatiale et spectrale, milieux urbains, propriétés optiques des matériaux.

Abstract

Remote sensing imagery of urban environments from airborne acquisitions still remains a major scientific issue over the last decades. As urban areas are characterized by a high variety of materials and many shadowed areas, most of the processing methods are limited. Moreover, due to the high spatial resolution and better signal-to-noise ratio of the new generation of airborne sensors, this opens the way to new developments to improve the extraction of information from such environments. This campaign (UMBRA) aims at acquiring a new reference dataset representative of two different French cities to develop a new atmospheric correction method in sunlit and shaded urban areas, to design a future generation of superspectral cameras system dedicated to geomatic applications, and to study relighting applications from terrestrial urban image data. This paper details this experiment and the preprocessing done on the different acquired data. Some first results are presented.

Keywords : *field campaign, airborne imagery, high spatial and spectral resolution, urban areas, material optical properties.*

1. Introduction

A l'échelle du sol, les interactions globales Homme-Milieux sont plus complexes à expliquer dans les environnements urbains qu'en milieux naturels. Cela peut s'expliquer d'une part à cause de la grande variabilité et hétérogénéité des matériaux qui les composent (Herold et al., 2004 ; Lachérade et al., 2005 ; Heiden et al., 2007 ; Le Bris et al., 2008), et d'autre part à cause du relief très accidenté qui les caractérise (structures 3D et ef-

fets de pente (Heiden et al., 2012), effets d'ombre (Adeline et al., 2013a), etc.). Depuis ces dernières décennies et grâce à l'avancée de nouveaux capteurs imageurs à haute résolution spatiale, la télédétection aéroportée a démontré sa capacité à expliquer et identifier certains phénomènes difficiles à observer à partir du sol (Heldens et al., 2011 ; Schafri et al., 2012), parmi lesquels : îlots de chaleur urbain (Sobrino et al., 2009), suivi météorologique (Heldens et al., 2010), pollution urbaine (Mestayer et al., 2005 ; Mestayer et al., 2011), bilans énergétiques et perméabilité des sols (Pauwels et al., 2008 ; Demarchi et al., 2012 ; Weng, 2012). Avec cette perspective, plusieurs campagnes de mesures ont exploité différents moyens d'acquisition, qu'ils soient satellitaires, aéroportés ou terrestres, afin de mieux appréhender ces phénomènes anthropiques et atmosphériques, ainsi que leurs échanges. On en déduit par conséquent la nécessité de disposer d'un jeu de données de référence qui serait représentatif de l'application souhaitée. Dans le cas de l'étude des matériaux urbains dans le domaine réflectif 0,4-2,5 μm , plusieurs jeux de données existent (Roessner et al., 2001 ; Cavalli et al., 2008 ; Masson et al., 2008 ; Doz et al., 2010) mais n'exploitent pas totalement la complémentarité entre l'information à haute résolution spatiale et spectrale en prenant en compte notamment les différents couplages Terre-Atmosphère-Capteur grâce à l'acquisition de données atmosphériques simultanées.
Dans ce contexte, la campagne UMBRA a été motivée et réalisée dans le cadre d'une collaboration entre l'IGN et l'Onera. Cet article décrit la campagne et les mesures effectuées afin d'obtenir un jeu de données de qualité permettant de couvrir les trois principales applications visées :

- La validation de nouvelles méthodes de correction atmosphérique adaptées aux milieux urbains et à leur végétation spécifique ;
- La définition des futures caméras superspectrales optimisées pour l'identification des matériaux urbains ;
- L'identification des propriétés optiques des matériaux de façades de rue à partir d'acquisitions terrestres mobiles grâce au système Stereopolis.

La campagne UMBRA s'est déroulée sur trois jours du 23 au 25 octobre 2012. Elle comprend à la fois l'acquisition d'images aéroportées et un ensemble de mesures terrain principalement sur deux villes françaises : Toulouse et Amiens. Ces villes ont été choisies entre autres pour leurs caractéristiques urbanistiques et climatiques différentes (Sud-Ouest et Nord de la France), et aussi parce qu'elles peuvent être considérées comme représentatives du paysage urbain français et vraisemblablement européen. Par ailleurs, Toulouse et Amiens sont des lieux stratégiques respectivement pour l'Onera et l'IGN pour lesquels de nombreuses études ont déjà été menées.

Une importante spécificité du jeu de données UMBRA réside dans le fait que différents capteurs optiques étaient placés dans le même avion, rendant possible l'acquisition simultanée d'images présentant des caractéristiques complémentaires :

- Données multispectrales à très haute résolution spatiale (12 cm après fusion P+XS) ;
- Données hyperspectrales à haute résolution spectrale (VNIR : 4 nm, SWIR : 6 nm) et spatiale (VNIR : 80 cm, SWIR : 1,6 m) ;
- Clichés photogrammétriques en recouvrement multistéréoscopique permettant d'améliorer le processus de géoréférencement et de calculer un modèle numérique de surface des zones survolées ;
- Données panchromatiques stéréoscopiques à très haute résolution spatiale, qui couplées aux données multispectrales et hyperspectrales permettront de tester des outils de pan-sharpening a posteriori.

Une seconde particularité de ce jeu de données concerne le fait que de nombreuses mesures terrain ont été relevées durant l'acquisition aérienne, afin d'une part, de caractériser les scènes étudiées d'un point de vue optique et géométrique, et d'autre part, de caractériser l'état de l'atmosphère.

Le jeu acquis permettra également d'aborder d'autres thématiques supplémentaires relatives aux milieux urbains : suivi de la biodiversité, qualité des eaux (marécages, lacs, fleuves) et études hydrologiques (croissance des algues, etc.), qualité de l'air liée à la pollution urbaine et industrielle (autoroutes, incinérateur, etc.), contrôle du vieillissement des routes (pistes de vol aéroportuaires) (Herold et Roberts, 2005), détection d'anomalie (cibles camouflées). De plus, il servira de jeu de référence pour le dimensionnement de la future mission hyperspectrale HYPXIM (Lefèvre-Fonollosa et al., 2012). Outre les milieux urbains, la campagne UMBRA a permis des acquisitions sur différents sites ruraux : le site montagneux de Bernadouze (atelier du labex DRIIHM dont l'objectif est d'analyser les interactions Homme-Milieux) et le site du centre Onera-Fauga à Mauzac afin d'évaluer l'évolution de la végétation après un feu de biomasse.
La figure 1 donne la localisation géographique des différents lieux survolés ainsi que de possibles axes d'étude scientifique futurs.

2. Les sites d'étude

Pour chacun des quatre sites d'étude sont présentés leur description physique, les différents moyens et ateliers de mesures, et enfin les conditions atmosphériques au moment des acquisitions aériennes. Le tableau 1 résume et détaille pour chaque site d'étude ces informations.

2.1. Toulouse

Description. La zone d'étude de Toulouse couvre différents types de quartiers parmi lesquels on rencontre

Date et heure	Sites		Instruments	Nature des mesures	Fréquence des mesures	Cibles	Applications
23/10/2012 autour de 13h TU	Fauga-Mauzac		Spectroradiomètre (ASD)	Eclairement	Ponctuellement	Cible de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
				Luminance	Ponctuellement autour des passages avion	Mires de référence claire et le sol en « quick »	Etalonnage en vol
			Spectroradiomètre (GER)	Eclairement	En continu	Panneau de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
			Radiomètre micro-ondes	Température, pression, contenu en vapeur d'eau et en eau liquide dans les nuages	En continu	-	Caractérisation atmosphérique
24/10/2012 entre 9h30 et 12h40 TU	Toulouse	Site n°1	Spectroradiomètre (ASD)	Eclairement	Ponctuellement	Cible de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
				Luminance	Ponctuellement autour des passages avion	Mires de référence claire et sombre	Etalonnage en vol
			Spectroradiomètre (GER)	Eclairement	En continu	Cible de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
			Radiomètre micro-ondes	Température, pression, contenu en vapeur d'eau et en eau liquide dans les nuages	En continu	-	Caractérisation atmosphérique
			Appareil photo avec objectif fisheye	Photos hémisphériques de ciel	Ponctuellement	-	Caractérisation atmosphérique
		Site n°2 Site n°3	Deux spectroradiomètres (ASD)	Réflectance et/ou transmittance	Ponctuellement	Matériaux au sol et mires de référence, arbres : feuilles, tronc et branches	Construction d'une vérité terrain pour les matériaux
				Luminance et éclairement	Ponctuellement	Matériaux au sol et panneau de réflectance standard	Correction atmosphérique
				Eclairement	Ponctuellement	Panneau de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
			GPS	Coordonnées géographiques	-	Repères au sol	Recalage des images et atelier détection d'anomalies
			Laser scanner terrestre	Nuages de points 3D	-	4 arbres et un bâtiment	Reconstruction du modèle 3D
24/10/2012 autour de 13h TU	Bernadouze		-	-	-	-	-
25/10/2012 entre 11h30 et 13h30 TU	Amiens		Spectroradiomètre (ASD)	Réflectance	Ponctuellement	Matériaux au sol et une mire de référence	Construction d'une vérité terrain pour les matériaux
				Eclairement	Ponctuellement	Cible de réflectance standard	Caractérisation atmosphérique
			Caméras (Stereopolis)	Comptes numériques	En continu	Rues et la partie de ciel visible	Estimation de l'illumination et de la réflectance
			Lidar (Stereopolis)	Distance et intensité	En continu	Rues	Reconstruction 3D

TABLE 1 : Récapitulatif des mesures effectuées sur le terrain sur les différents sites d'étude.

un centre historique présentant un bâti dense, des zones résidentielles pavillonnaires et collectives, des infrastructures sportives, de grandes zones commerciales et industrielles, ainsi que des réseaux ferrés et autoroutiers, et un aéroport. Toulouse comprend également des surfaces végétalisées ainsi qu'un fleuve et un canal qui la traversent.

Ateliers et mesures terrain. On distingue trois sites de mesures : le centre Onera à Toulouse (site n˚1), le CREPS (site n˚2) et l'Université Paul Sabatier (site n˚3).
Les mesures effectuées sur le site n˚1 avaient pour but de contrôler l'évolution des conditions atmosphériques au cours de l'acquisition aérienne, et de valider l'étalonnage en vol des capteurs. Pour cette dernière application, une mire de référence claire (lino gris clair) et sombre (bâche noire) dont les dimensions leur permettent d'être visibles par les capteurs aéroportés, ont été disposées au sol et (Figure 2).
Sur les sites n˚2 et n˚3, des données de différentes natures ont été collectées visant à étudier la végétation urbaine (Figure 3) : mesures laser scanner terrestre pour remonter au modèle 3D des arbres, mesures des propriétés optiques des feuilles et éléments ligneux (réflectance et/ou transmittance), mesures radiométriques au sol au soleil et à l'ombre des arbres et d'un bâtiment pour constituer une vérité terrain à la validation de méthodes de correction atmosphérique.
Pour compléter cette vérité terrain, des mesures de spectres de réflectances de plusieurs matériaux ont été acquises sur le site n˚2. Enfin, sur le site n˚3, des cibles ont été installées pour un atelier de détection d'anomalie.

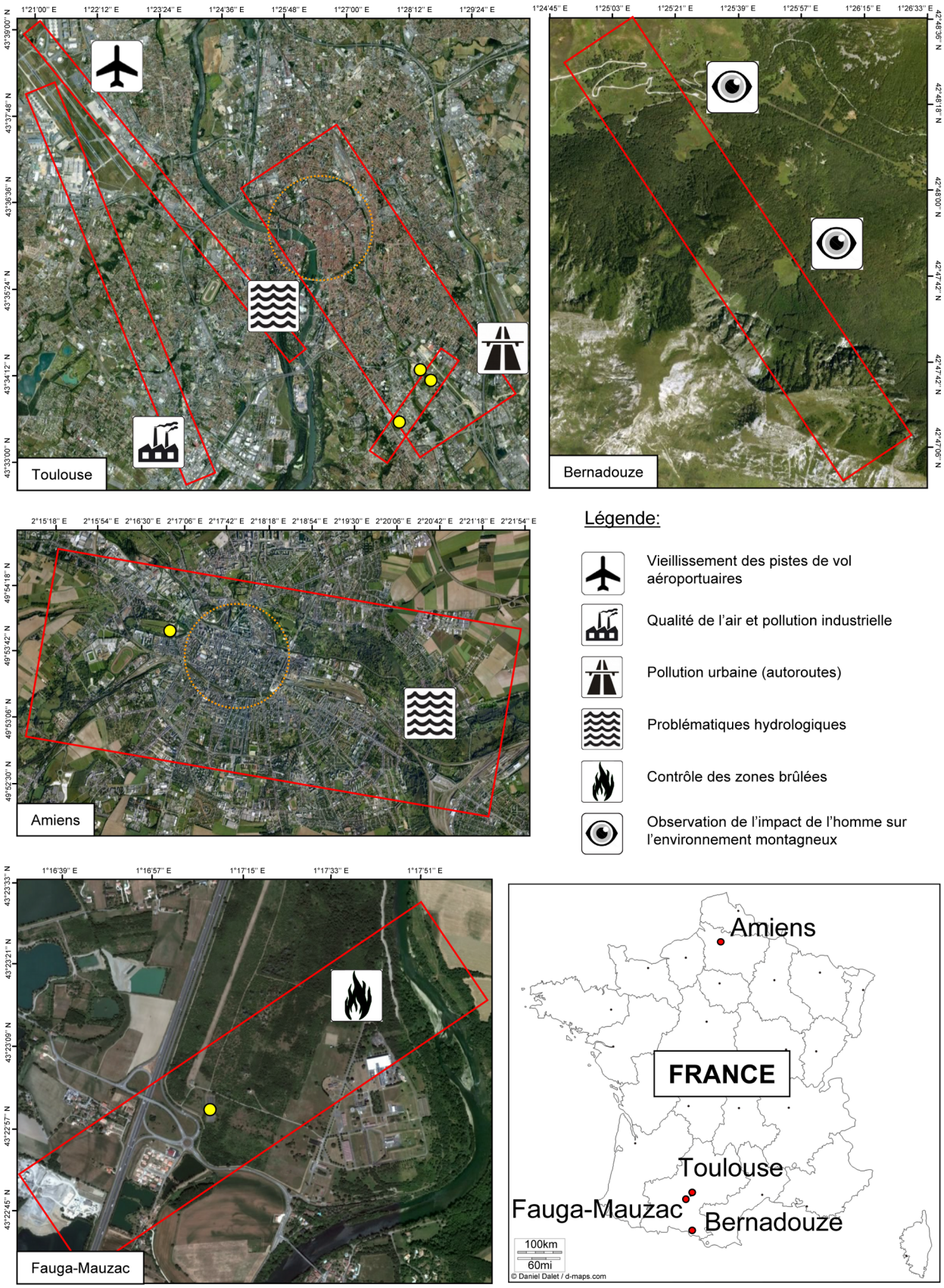

FIGURE 1 : Zones survolées au-dessus de Toulouse, Bernadouze, Amiens et Fauga-Mauzac (vues Google Earth) avec leurs délimitations (rectangles rouges), comprenant les centre-villes (cercles oranges), les sites de mesures terrain (points jaunes) et les zones à fort intérêt scientifique (panneaux de signalisation).

FIGURE 2 : Lieux des ateliers d'étalonnage en vol (mires signalées par des flèches rouges) et de détection d'anomalie (position des cibles dans les cercles magentas).

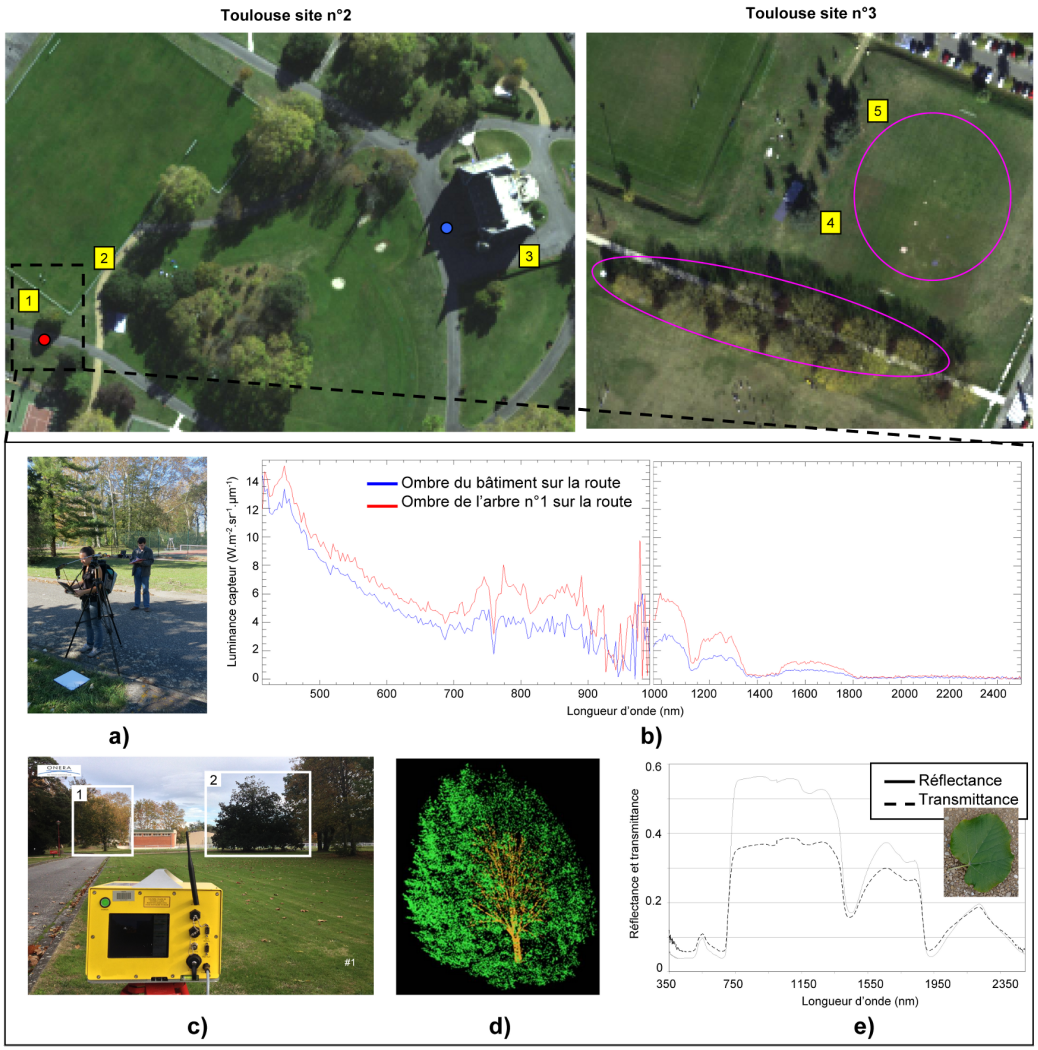

FIGURE 3 : Lieux de l'atelier de détection d'anomalie (position des cibles dans les cercles magentas) et des mesures terrain sur l'étude de la végétation urbaine (arbres : 1-2-4-5, bâtiment : 3). Exemples pour l'arbre n˚1 : a) mesures radiométriques dans l'ombre de l'arbre, b) comparaison de la luminance capteur au-dessus d'un même matériau à l'ombre (disques rouge et bleu dans l'image Toulouse site n˚2), c) prise de vue du laser scanner terrestre, d) reconstruction du modèle 3D de l'arbre et e) réflectance et transmittance des feuilles.

Conditions météorologiques. Le matin, le temps était un peu humide avec du brouillard qui s'est dissipé à partir du début des premiers passages avion. Puis la présence de cirrus épars dans le ciel a été notée. A partir de 11h-12h TU, le ciel s'est complètement dégagé, et ce, jusqu'à la fin des mesures.

2.2. Amiens

Description. Amiens présente des types de quartiers similaires à Toulouse mais s'en distingue par un emploi de matériaux urbains différents et généralement plus variés. La ville d'Amiens est traversée par un fleuve et comporte une importante zone d'étangs et de canaux. Les zones imagées comprennent également un village en périphérie ainsi que quelques zones plus rurales.

Mesures terrain. Les mesures terrain effectuées concernaient la caractérisation de l'atmosphère et l'étalonnage en vol des capteurs. Ces mesures se sont concentrées sur un seul atelier de mesure où a été disposée une mire de référence claire (lino brun clair, cf. Figure 2). D'autre part, des spectres de réflectance de matériaux urbains ont été acquis sur le terrain. Des acquisitions de données terrestres avec le système Stereopolis ont aussi été effectuées dans les rues d'Amiens simultanément à l'acquisition aérienne.

Conditions météorologiques. Les conditions météorologiques se sont progressivement dégradées au cours de l'acquisition des données. Ainsi le couvert nuageux est devenu de plus en plus dense jusqu'à être complet à la fin des acquisitions aéroportées.

2.3. Fauga-Mauzac

Description. Au centre de l'Onera-Fauga à Mauzac, se situent une zone dédiée aux mesures d'étalonnage en vol et une zone herbeuse et boisée récemment brûlée par un feu accidentel en août 2012. Par ailleurs, des cibles ont été également disposées sur le terrain pour une application de détection d'anomalie.

Mesures terrain. Pour les mesures dédiées à l'étalonnage en vol, une mire de référence claire (lino gris clair) a été utilisée conjointement avec le revêtement au sol en "quick" de la zone d'étalonnage qui a servi de mire de référence sombre (Figure 2).

Conditions météorologiques. Le temps était relativement nuageux à cause du passage ponctuel de nuages.

2.4. Bernadouze

Description. Bernadouze est une zone protégée près de la commune de Suc-et-Sentenac dans la chaîne montagneuse des Pyrénées. Sur ce site se trouvent deux tourbières à côté d'une importante forêt gérée par l'ONF. Ce site est actuellement sous surveillance scientifique afin d'évaluer l'impact de l'Homme sur des écosystèmes fragiles en paysages montagneux suite dans ce cas à une déforestation sur plusieurs années (labex DRIIMH). Ce premier jeu permettra d'effectuer un bilan de la végétation présente avant l'exploitation de la forêt.

Mesures terrain. Aucune mesure.

Conditions météorologiques. Bonnes.

3. Caractérisation de l'atmosphère

Afin de caractériser les conditions atmosphériques, les instruments suivants ont été utilisés :

- Un radiomètre micro-ondes RPG-Haptro de RPG (Allemagne) et un second TP/WVP-300 de Radiometrics (USA) ont fait des acquisitions au nadir de profils altimétriques et temporels de plusieurs données météorologiques troposphériques jusqu'à 10 km d'altitude : contenu en vapeur d'eau, contenu en eau liquide dans les nuages et température. Associées à ces instruments, des mesures de température et de pression de surface ont également été effectuées ;
- Le photomètre du réseau AERONET sur le site de Seysses situé à 15 km environ de Toulouse a mesuré l'épaisseur optique des aérosols ;
- Une caméra avec objectif fisheye a pris des photos hémisphériques permettant d'analyser la distribution spatiale et la trajectoire locale des nuages sur le demi-hémisphère de ciel ;
- Trois spectroradiomètres passifs portables ASD FieldSpec de Analytical Spectral Devices Inc. (www.asdi.com) et un autre GER3700 de Geophysical and Environmental Research Corporation (http ://www.spectravista.com/3700.html) ont mesuré l'éclairement solaire durant les journées de la campagne au-dessus d'une cible de réflectance standard ou Spectralon, élaboré par Labsphere (http ://www.labsphere.com/products/reflectance-standards-and-targets/).

Un exemple du suivi des conditions atmosphériques est illustré sur le site n˚1 de Toulouse dans la figure 4. L'observation de la présence de cirrus le matin (Partie 2.1) est validée à la fois par les mesures d'un spectroradiomètre, l'analyse des photos de ciel et les données du radiomètre micro-ondes. Toutes ces informations sont des paramètres importants pour modéliser l'atmosphère et notamment quantifier la contribution de grandeurs physiques telles que la transmission atmosphérique due aux gaz et aux aérosols, la luminance atmosphérique et d'environnement. Elles seront utilisées a posteriori pour les traitements de l'étalonnage en vol et pour les méthodes de correction atmosphérique.

4. Moyens aéroportés

4.1. Instrumentation

Des instruments hyperspectraux et multispectraux ont été installés sur l'avion Beechcraft200 de l'IGN. Les

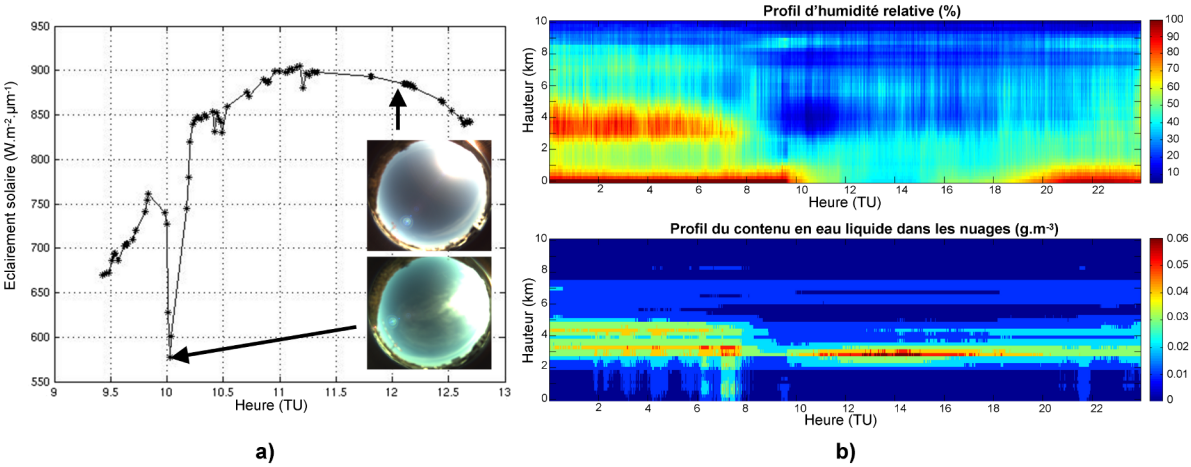

FIGURE 4 : Mesures des conditions atmosphériques sur le site n˚1 de Toulouse : a) évolution de l'éclairement solaire mesurée par le spectroradiomètre ASD et illustrée par deux photos hémisphériques de ciel (il a été mis en évidence le passage de cirrus devant le soleil vers 10h TU affectant drastiquement la quantité d'éclairement solaire reçu au sol), et b) profils altimétriques d'humidité relative et de contenu en eau liquide des nuages par le radiomètre micro-ondes.

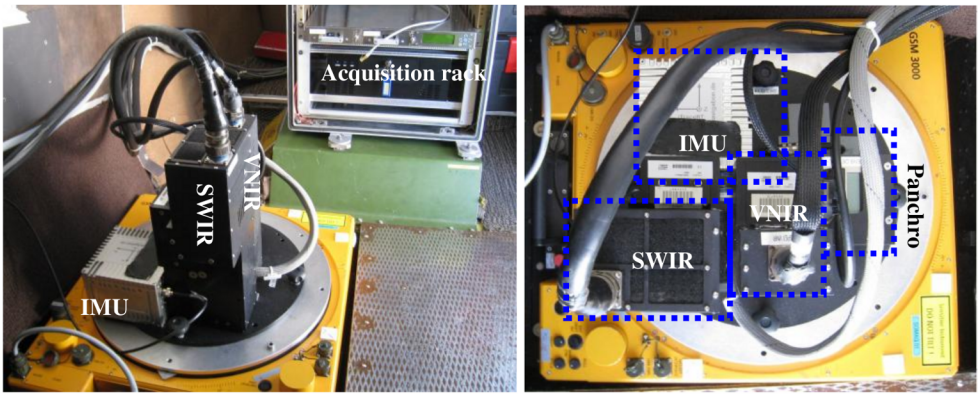

FIGURE 5 : Photo du montage du système PELICAN-HYPER de l'Onera.

Description	Système PELICAN-HYPER			Système IGN	
	HySpex VNIR	HySpex SWIR	CamV2 panchro	CamV2 multi	CamV2 panchro
Type d'acquisition	barrette	barrette	matrice	matrice	matrice
Nombre de pixels	1600	320	7256 x 5462	7256 x 5462	7256 x 5462
Intervalle spectral	0,4-1 µm	1-2,5 µm	0,4-0,8 µm	0,4-0,8 µm	0,35-0,75 µm
Nombre de bandes spectrales	160	256	panchro	4	panchro
Résolution spatiale	0,80m	1,6m	0,14m	0,24m	0,12m
Fauchée	645m	520m	1033m	1775m	1775m

TABLE 2 : Récapitulatif des caractéristiques des systèmes imageurs PELICAN-HYPER et IGN.

configurations de prise de vue des différentes caméras sont résumées dans le tableau 2.

La caméra numérique CamV2 de l'IGN (Souchon et al., 2010) est un système photogrammétrique modulaire composé de plusieurs caméras matricielles (capteurs CCD de taille 7216×5412). Elle est en effet constituée à la fois de quatre caméras multispectrales (bandes Bleu-Vert-Rouge-PIR) et de quatre caméras panchromatiques qui visent la scène en couvrant avec une meilleure résolution spatiale les quatre quadrants des images multispectrales. Ce système permet donc la production d'images fusionnées P+XS avec un rapport de pan-sharpening de 2×2. Ces images fusionnées ont une taille de 14600×10650 pixels. Ce système comporte un dispositif de compensation de filé électronique par TDI (Time delayed integration) avec précision d'un demi pixel. Enfin, le système IGN est placé sur une plateforme gyrostabilisée et inséré dans un ensemble fonctionnel avec FMS (Flight Management System : logiciel de gestion de vol exploitant un fichier dans lequel tous les sommets de prise de vue sont déterminés avant la mission), GPS et centrale inertielle (Figure 6).

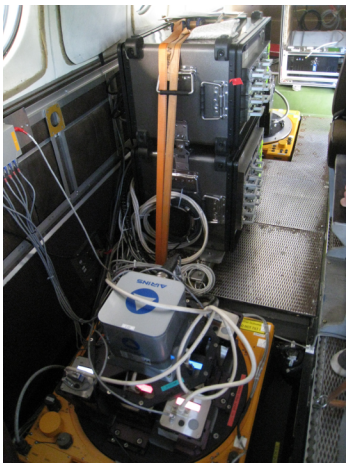

FIGURE 6 : Photo du montage du système IGN : 8 caméras multispectrales et panchromatiques avec la centrale inertielle et les deux racks d'acquisition.

Le système PELICAN-HYPER de l'Onera est dédié aux acquisitions hyperspectrales et est composé d'un assemblage de trois caméras : deux caméras hyperspectrales de type push-broom de Norsk Elektro Optikk, HySpex-VNIR1600 et HySpex-SWIR320m-e et une caméra à prise de vue instantanée CamV2 de l'IGN qui donne des images panchromatiques (Figure 5). Cette dernière est équipée de la même tête optique que les caméras du système de l'IGN. Elle produit des images qui ont la même ligne de visée que les images hyperspectrales mais avec une bien meilleure résolution spatiale. Au final, ce système permet d'obtenir des acquisitions à la fois à haute résolution spectrale et spatiale avec des images multispectrales, hyperspectrales et panchromatiques.

Comme l'une des principales applications visées porte sur la correction atmosphérique qui s'intéresse notamment au signal dans les ombres, il était nécessaire d'avoir un bon rapport signal sur bruit dans les images. Ceci a impliqué d'augmenter le temps d'intégration pour les caméras. Mais en parallèle, il est souhaitable d'étudier plusieurs pixels dans l'ombre et donc d'avoir la meilleure résolution spatiale possible, ce qui se traduit par une augmentation de la fréquence d'acquisition. En définitive, un compromis a été choisi qui limite la résolution spatiale à moins de 2m pour le capteur hyperspectral pour une vitesse avion d'environ 82 m.s^{-1} à une altitude de vol de 2160 m. Il en résulte une période d'acquisition de 10 ms, ce qui permet d'avoir une bonne dynamique dans l'image. En effet, vu les dates et les heures d'acquisition des différents sites survolés pendant la campagne UMBRA, les ombres peuvent représenter une part non négligeable dans l'image. Par exemple à Toulouse, l'angle solaire zénithal a varié entre 55° et 65° pendant la durée totale des mesures terrain. Des exemples d'applications utilisant des images multi-hyper-panchro provenant du jeu de données UMBRA sont illustrés dans la figure 7.

4.2. Etalonnage radiométrique des capteurs

Etalonnage en laboratoire. Le système PELICAN-HYPER est étalonné radiométriquement en laboratoire en plaçant les caméras devant une sphère intégrante. La sphère délivre un flux maîtrisé et mesuré par un spectroradiomètre ASD qui sert d'étalon secondaire. Cette procédure permet d'établir les coefficients de gain pour chaque détecteur et dans chaque bande spectrale. L'offset est déterminé sur la caméra panchromatique par des acquisitions avec l'obturateur fermé. Pour les caméras HySpex, le niveau d'obscurité fait automatiquement parti de la procédure d'acquisition et le niveau est donc déterminé pour chaque image et sauvegardé dans l'en-tête des images. Il est ensuite utilisé lors de la correction radiométrique qui fournit une image en luminance par l'application d'un modèle gain-offset. On peut noter également que par construction, les caméras HySpex ont des valeurs très faibles de "smile" (changement de la longueur d'onde centrale en fonction de la position du pixel) et de "keystone" (mauvais recalage entre bandes) de l'ordre inférieur au dixième de pixel ; ce qui ne nécessite donc pas de corrections supplémentaires. Les performances radiométriques attendues sont, en terme de bruit équivalent en luminance (NER en mW.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}) de 0,05-0,1 dans le visible, de 0,1-0,6 dans le NIR et de 0,01-0,02 dans le SWIR pour les caméras HySpex-VNIR et HySpex-SWIR (http ://www.opairs.aero/hyspex_ en.html). Le système IGN pourra par la suite être inter-étalonné radiométriquement à partir des images hyperspectrales étalonnées en luminance.

Etalonnage en vol et sa validation (pour la caméra HySpex). Elle s'appuie sur des mires de référence dont

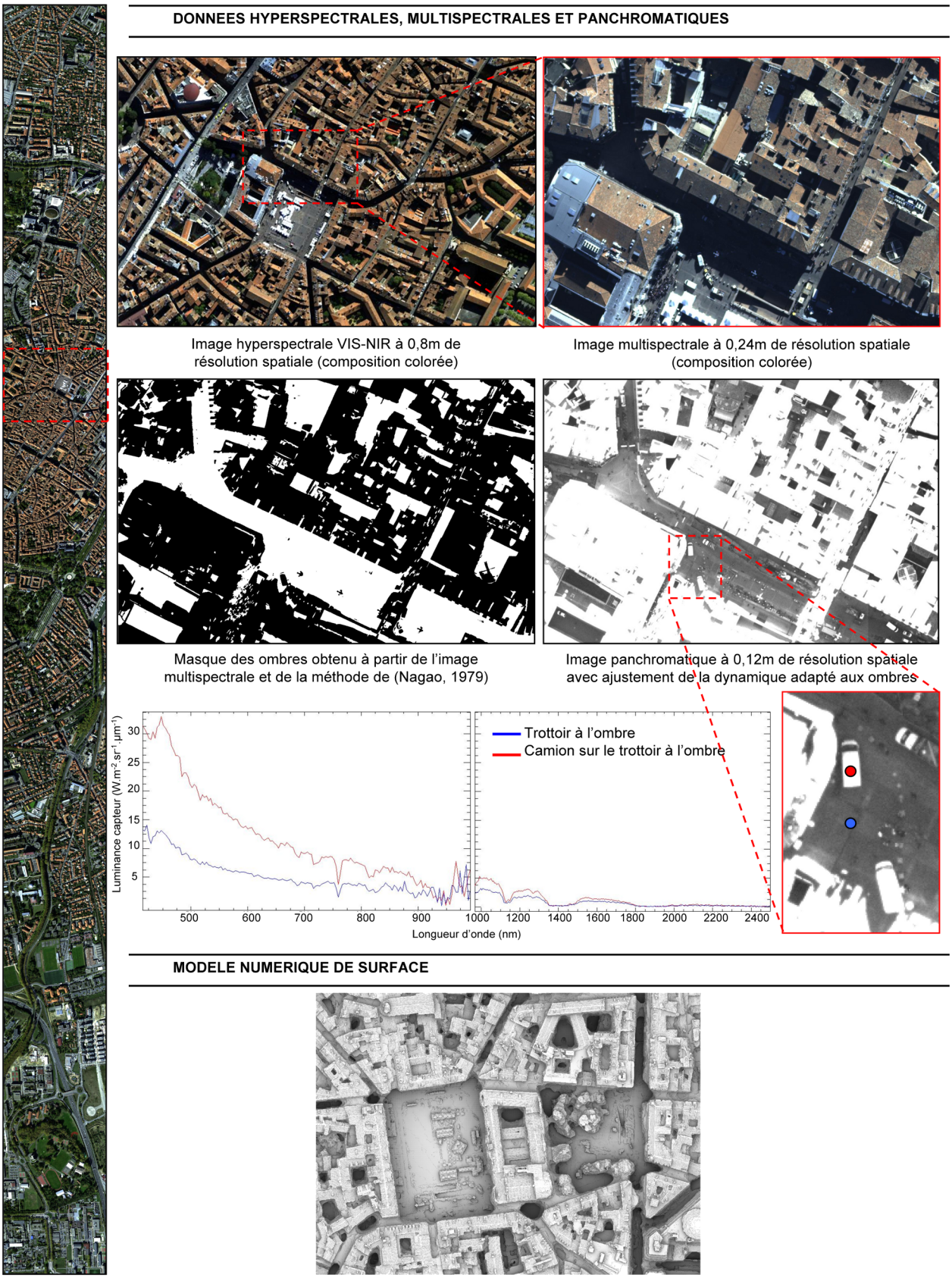

FIGURE 7 : Exemples d'applications utilisant les données multispectrales, hyperspectrales et panchromatiques de la campagne UMBRA : détection des ombres (Adeline et al., 2013a), identification de matériaux à l'ombre, construction du modèle surfacique 3D.

les propriétés optiques ont été mesurées en laboratoire et sur les connaissances des conditions atmosphériques (Partie 3). A partir de ces informations, il est possible d'estimer les luminances en entrée du capteur aéroporté avec des outils de transfert radiatif ; celui qui a été utilisé est COMANCHE (Poutier et al., 2002). La comparaison entre ces luminances estimées et les luminances réelles données par le capteur au-dessus de ces mires de référence permettent de valider l'étalonnage de l'instrument et aussi la modélisation choisie pour l'atmosphère. Le vol au-dessus de Fauga-Mauzac est dédié à cet étalonnage en vol ; les autres vols au-dessus de Toulouse et Amiens doivent permettre sa validation. La démarche et la méthodologie globale de ces étapes sont détaillées dans (Viallefont et al., 2013). La figure 8 montre les résultats pour la caméra hyperspectrale HySpex au-dessus de Toulouse en dehors des bandes d'absorption atmosphérique. On peut remarquer que les écarts les plus importants sont compris dans le bleu autour de 430 nm et entre 1000-1800nm dans le NIR. Des investigations en laboratoire vont être menées pour comprendre et améliorer ces écarts.

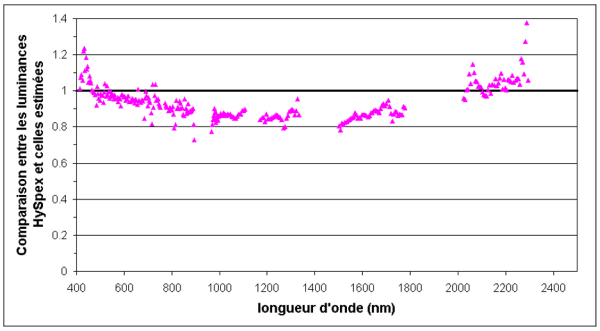

FIGURE 8 : Les résultats de l'étalonnage instrumental pour la caméra hyperspectrale.

4.3. Mise en géométrie des images

Géoréférencement des images acquises par le système PELICAN-HYPER. La correction géométrique est effectuée à l'issue des vols en utilisant les données d'une centrale inertielle fixée à proximité des caméras et d'un modèle géométrique donnant l'angle de visée de chaque pixel. Pour déterminer l'orientation précise de la ligne de visée, nous utilisons également des amers visibles sur une des images et dont les positions ont fait l'objet d'une mesure par GPS différentiel. L'incertitude résultante est estimée à une valeur de l'ordre de grandeur du pixel soit moins d'un mètre pour la caméra HySpex-VNIR.

Géoréférencement des images acquises par le système IGN. L'étalonnage de la caméra étant connu, les clichés fournis avaient déjà fait l'objet d'une correction de la distorsion. Un géoréférencement direct des clichés était donné par un système GPS+INS. Celui-ci est généralement d'excellente qualité en relatif. Néanmoins, il peut nécessiter d'être recalé en absolu. Aussi les orientations des clichés des chantiers d'Amiens et de Toulouse ont finalement été estimées lors d'un processus classique d'aérotriangulation, en prenant en compte quelques points de stéréo-préparation. Parmi ces points dont les coordonnées terrain sont connues, certains ont été utilisés comme points d'appui (i.e. intervenant dans le calcul) et d'autres comme points de contrôle (afin d'évaluer la qualité de mise en géométrie des clichés). Les autres mesures prises en compte dans le calcul sont des points de liaison (points homologues entre images extraits de manière automatique) ainsi que les coordonnées des sommets de prise de vue fournies par le géoréférencement direct. Les résidus image et terrain obtenus à l'issue du calcul d'aérotriangulation sont donnés dans le tableau 3.

Calcul d'un modèle numérique de surface par appariement dense multivue. Les clichés acquis par la caméra numérique de l'IGN ont été pris dans une configuration multistéréoscopique avec des recouvrements de l'ordre de 60% en intra-bande et de près de 80% en inter-bande. Leur pixel sol est de l'ordre de 12 cm. Une telle configuration permettait le calcul d'un modèle numérique de surface à très haute résolution par corrélation multistéréoscopique dense. Les algorithmes mis en œuvre sont présentés dans (Pierrot-Deseilligny and Paparoditis, 2006). Ce modèle numérique de surface permettra de calculer des ortho-images vraies, ainsi qu'un modèle 3D urbain. Il pourra être utilisé lors de calculs d'inversion d'image.

5. Mesures terrain

5.1. Caractérisation des propriétés optiques de matériaux urbains

Les spectres de réflectance d'un certain nombre de matériaux urbains ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un spectroradiomètre ASD de terrain. La plupart de ces spectres concernent des matériaux de couverture du sol (pavé, asphalte, gravier, terre...). Ces mesures répondent à un double objectif. D'une part, elles peuvent constituer une vérité terrain pour des expériences de correction atmosphérique des images (inversion des images et correction dans les ombres). D'autre part, elles pourront venir enrichir une base de données de spectres de matériaux. La méthode de mesure mise en œuvre pour calculer la réflectance ρ_{mat} d'un matériau est la suivante : chaque mesure de luminance d'un matériau L_{mat} était effectuée entre deux mesures de luminance $\{L^1_{spec}, L^2_{spec}\}$ d'un matériau de référence (spectralon) de réflectance ρ_{spec} connue (Equation 1).

$$\rho_{mat} = 2 \cdot \frac{L_{mat} \cdot \rho_{spec}}{(L^1_{spec} + L^2_{spec})}. \quad (1)$$

Les bandes spectrales les plus sensibles aux phénomènes d'absorption atmosphérique sont ensuite exclues des spectres mesurés.

	Toulouse			Amiens		
Résidus image						
	EMQ points liaison (pix)	EMQ points liaison interbande (pix)		EMQ points liaison (pix)	EMQ points liaison interbande (pix)	
x	0,17	0,18		0,2	0,2	
y	0,16	0,16		0,16	0,16	
xy	0,24	0,24		0,25	0,25	
Résidus terrain						
	EMQ Appui (m)	EMQ Contrôle (m)	EMQ GPS (m)	EMQ Appui (m)	EMQ Contrôle (m)	EMQ GPS (m)
X	0,09	0,13	0,08	0,04	0,1	0,06
Y	0,11	0,15	0,07	0,07	0,08	0,08
Z	0,26	0,36	0,06	0,22	0,29	0,07
XY	0,14	0,19	0,11	0,08	0,13	0,1
XYZ	0,29	0,41	0,12	0,23	0,32	0,13

TABLE 3 : Résidus image et terrain du calcul d'aérotriangulation (EMQ = Erreur Moyenne Quadratique).

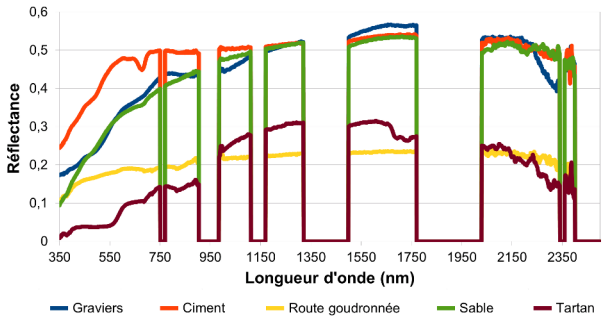

FIGURE 9 : Exemples de quelques spectres mesurés sur le terrain à Toulouse.

A Amiens, au cours des acquisitions terrain de spectres, les conditions météorologiques s'étaient dégradées et le couvert nuageux était devenu très dense. Du fait de ces conditions, l'éclairement a parfois varié au cours des acquisitions de mesures, perturbant donc les résultats obtenus. Afin de pouvoir prendre en compte ces problèmes, un indice de qualité I_Q est associé à chacun des spectres de réflectance calculés ; il s'agit simplement du ratio des deux mesures de luminance effectuées au-dessus du spectralon, avant et après la mesure sur le matériau (cf. Equation 2). Quelques exemples de spectres de matériaux mesurés sur le terrain sont présentés sur la figure 9.

$$I_Q = \frac{L^1_{spec}}{L^2_{spec}}. \quad (2)$$

5.2. Etude de la végétation arborée urbaine pour correction atmosphérique

Des mesures terrain ont été menées sur les sites n˚2 et n˚3 à Toulouse afin de construire un modèle de vérité terrain qui servira à la validation de nouvelles méthodes de correction atmosphérique prenant en compte la végétation arborée en milieux urbains (Adeline et al., 2012 ; Adeline et al., 2013b). Ces méthodes inverses ont pour but de remonter à la réflectance spectrale des matériaux à la fois au soleil et à l'ombre en prenant en compte les conditions atmosphériques (Partie 3), le relief 3D de la scène (Partie 4.3) et les flux de transfert radiatif existant entre l'atmosphère, la scène et le capteur aéroporté. Les arbres étudiés sont de type feuillu sur le site n˚2 : un tilleul Tilia Cordata (arbre n˚1) et un magnolia Magnolia Grandiflora (arbre n˚2). Tandis que sur le site n˚3, on a des arbres de type conifère de la même essence Cèdre bleu de l'atlas Cedrus Atlantica Glauca pour les arbres n˚4 et n˚5.

Mesures des propriétés optiques des feuilles et éléments ligneux (arbres n˚1 et n˚2). Des mesures de réflectance et transmittance de feuilles ont été effectuées grâce à l'accessoire Leaf-Clip du spectroradiomètre de la marque ASD comportant un étalon de référence blanc et noir (Figure 3.e). En parallèle, la réflectance du tronc et des branches a été mesurée avec l'accessoire Contact Probe de ASD.

Mesures au laser scanner terrestre et reconstruction de la géométrie 3D de l'arbre (arbres n˚1-2-4-5). Les lasers scanner 3D sont des systèmes dits à balayage qui reconstituent la surface géométrique des objets à partir d'un nuage de points 3D. Pour chaque point de la scène, ils fournissent l'information de distance et le flux rétrodiffusé par l'objet observé dans cette direction. Plusieurs points de vue sont nécessaires pour reconstituer l'intégralité de la forme 3D d'un objet. En effet, la directivité de l'éclairement et l'aspect monostatique du système introduisent des zones d'ombre si l'on considère un unique point de vue. L'ensemble des acquisitions est ensuite combiné dans un référentiel général. L'imageur laser scanner 3D de l'Onera qui a été utilisé est constitué par :

- Une source laser dont les caractéristiques en font un système facilement opérable sur le terrain (sécurité oculaire à 1,5 μm...) ;
- Un capteur permettant de collecter soit le premier soit le dernier écho reçu ;
- L'acquisition et les outils de post-traitement spécifiques ;
- Une caméra visible qui permet d'imager en temps réel la scène.

Lors des mesures terrain, nous avons acquis des nuages de points sur plusieurs arbres dans leur environ-

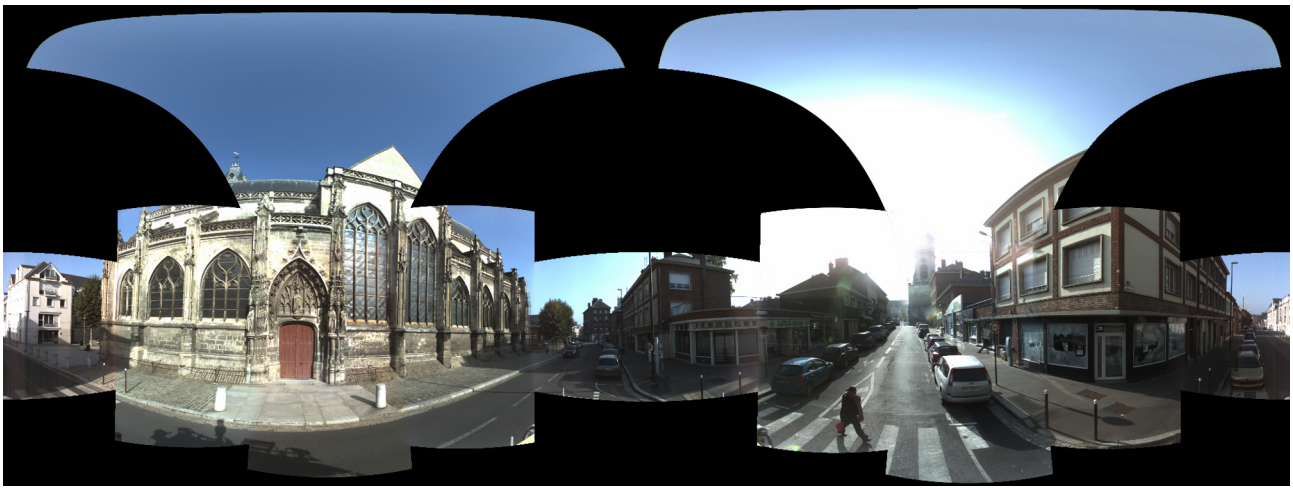

FIGURE 10 : Exemple d'image panoramique assemblée pour une position du véhicule Stereopolis.

nement en utilisant le mode "dernier écho" car il permet de traverser le feuillage externe d'un arbre pour imager sa structure interne. En pratique, deux points de vue ont été effectués pour reconstituer l'intégralité des arbres (Figure 3.c). Au final et après post-traitement, les branches et le tronc sont correctement maillés. Le feuillage des arbres représenté sous forme de facettes est partiellement retrouvé en considérant la variance moyenne de la taille des feuilles mesurée sur le terrain. Cette approche sous-estime le nombre de feuilles présentes dans l'arbre mais permet cependant de remonter à un modèle 3D précis de la couronne extérieure et des éléments ligneux composant les arbres (Figure 3.d).

Mesures radiométriques pour analyser le comportement spectral et la porosité de la couronne d'un arbre (arbres n˚1-2-4-5) comparativement à des structures opaques (bâtiment n˚3). Afin d'étudier l'impact radiatif des arbres notamment dans leur ombre, deux spectroradiomètres de terrain ont mesuré différentes composantes radiatives d'éclairement et de luminance reçues au niveau du sol (Figure 3.a) au-dessus à la fois de matériaux naturels (route, herbe, chemin non goudronné, etc.) et de mires de réflectance connue (lino gris clair et lino gris foncé pour les arbres n˚2 et n˚4). En effet, l'influence de cet impact radiatif est variable selon différents critères spécifiques à chaque espèce d'arbre : propriétés optiques des éléments de l'arbre, structure géométrique de la couronne de l'arbre et sa densité de feuille, etc. La figure 3.b illustre ces particularités propres aux arbres comparativement à des structures 3D opaques tels que des bâtiments, en montrant les écarts en luminance capteur à l'ombre qui peuvent atteindre jusqu'à peu près 50% dans le NIR et SWIR.

5.3. Cartographie mobile de canyons de rues urbaines et de façades

Système de numérisation mobile Stereopolis. Stereopolis est un système de cartographie mobile composé de 16 caméras Full HD (permettant l'acquisition d'images panoramiques quasi-complètes : Figure 10), d'instruments Lidar et d'un système de navigation (2 GPS, une centrale inertielle (IMU) et un odomètre), montés sur un véhicule (Paparoditis et al., 2012) (Figure 11). Le capteur de chaque caméra est constitué d'une matrice CCD de 2 Mpixels à grande dynamique (12 bits) et un rapport signal sur bruit d'environ 200. Le champ d'un pixel est d'environ 0,04^o, soit 0,7 cm à une distance de 10 m. Deux Lidar métrologiques à balayage Riegl LMS-Q120i ayant une précision centimétrique en distance et un champ de vue de 80° sont placés sur chaque côté du véhicule (observant principalement les façades des bâtiments). Un Lidar rotatif VELODYNE HDL-64E avec une fréquence d'acquisition de 1,3 millions de points par seconde et une fréquence de rotation de 10-15 Hz, est placé sur un mât sur le toit du véhicule (observant la rue et le premier étage des façades).

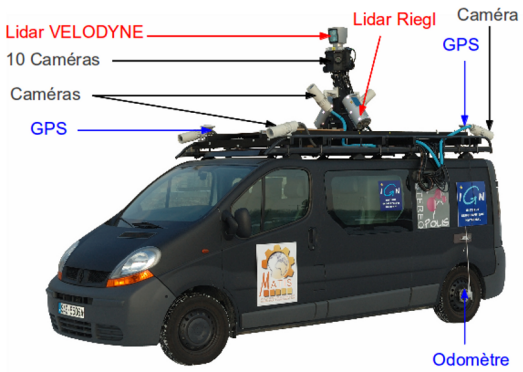

FIGURE 11 : Les différents instruments embarqués sur le système de cartographie mobile Stereopolis.

Description des données. Stereopolis peut donc produire des jeux d'images panoramiques prises à inter-

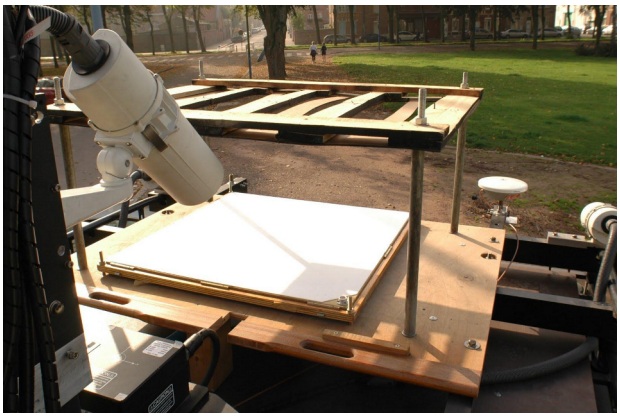

FIGURE 12 : Dispositif permettant de mesurer l'éclairement solaire avec un spectralon en utilisant le bord des ombres.

valle régulier le long du parcours du véhicule, ainsi qu'un nuage de points ne possédant que peu de "zones d'ombre". Ces données sont géoréférencées en utilisant les données de navigation (GPS + IMU + odomètre) et les paramètres d'étalonnage intrinsèques aux capteurs, ainsi que la géométrie relative entre les capteurs. Les images sont corrigées radiométriquement par le flat-field de chaque caméra. Une caméra spécifique a été ajoutée pour cette campagne sur le site d'Amiens : elle pointe vers une plaque blanche horizontale de référence placée sur le toit du véhicule. Un masque composé de plusieurs bandes opaques surplombe cette plaque, permettant d'obtenir une succession de zones ensoleillées et à l'ombre quand le véhicule est exposé à la lumière directe du soleil (Figure 12). Cela permet d'estimer l'éclairement direct solaire au niveau du sol, information qui n'est pas accessible directement dans les images pointant vers le soleil, du fait de la surexposition des pixels dans le halo solaire. Ces données permettent l'étude de l'illumination de la scène à partir des images (Coubard et al., 2012), et l'estimation de la réflectance des matériaux des façades, pour des applications de corrections des images et de réalité augmentée (par exemple le ré-éclairement de la scène) (Coubard et al., 2011).

6. Conclusion

La campagne UMBRA a permis d'acquérir un jeu de données de référence en milieux urbains et naturels pour les applications suivantes : la validation de méthodes de correction atmosphérique adaptées notamment à la végétation urbaine, l'étude de la faisabilité de futures caméras superspectrales IGN adaptées aux caractéristiques spectrales des matériaux urbains, et enfin l'estimation de la réflectance des matériaux de façades de rues et de l'illumination du ciel à partir d'images terrestres acquises par le système Stereopolis. Ce jeu de données sera disponible et sera constitué des images corrigées radiométriquement (en luminance) et géoréférencées. L'accès à l'ensemble des spectres de matériaux acquis se fera à partir de la base de données MEMOIRES de l'Onera (Martin et Bernard, 2012). En perspectives, l'analyse de résultats de la campagne UMBRA aidera au projet de dimensionnement du projet HYPXIM actuellement en phase A.

Remerciements

Les auteurs remercient l'équipe de l'unité POS ainsi que des représentants de l'équipe IODI au sein du département DOTA à l'Onera, plus particulièrement Bernard Tanguy, Olivier Vaudelin, Yannick Boucher, Christophe Leroy, Thierry Huet et l'ensemble des doctorants pour leur généreuse participation sur le terrain. Sont remerciés également ceux qui ont prêté les différents instruments de mesure nécessaires à la campagne, le CEA, le LISAH, Guillaume Carrié et Laurent Castanet (DEMR, Onera). Nous remercions également les PI pour leurs efforts à établir et maintenir le site AERONET de Seysses. Les différents agents de l'IGN ayant participé à la campagne ou aux pré-traitements des données sont également remerciés. Nous remercions chaleureusement l'Université Paul Sabatier (UPS) et le CREPS à Toulouse pour nous avoir autorisé à mener des mesures terrain sur leur site. Enfin, nous remercions également le projet ANR VegDUD qui a financé la partie étude de la végétation urbaine.

Références

Adeline, K., Briottet, X., Paparoditis, N., 2012. Material reflectance retrieval in shadow due to urban vegetation from 3d lidar data and hyperspectral airborne imagery. In : Journal of Advances in Geoscience, Proc. of the 32nd Earsel symposium. Mykonos, Greece.

Adeline, K., Briottet, X., Paparoditis, N., Gastellu-Etchegorry, J.-P., 2013a. Material reflectance retrieval in urban tree shadows with physics-based empirical atmospheric correction. In : Joint Urban Remote Sensing Event. São Paulo, Brazil.

Adeline, K., Chen, M., Briottet, X., Pang, S., Paparoditis, N., 2013b. Shadow detection in very high spatial resolution aerial images : a comparative study. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 80, 21–38.

Cavalli, R. M., Fusilli, L., Pascucci, S., Pignatti, S., Santini, F., 2008. Hyperspectral sensor data capability for retrieving complex urban land cover in comparison with multispectral data : Venice city case study (Italy). Sensors 8, 3299–3320.

Coubard, F., Brédif, M., Paparoditis, N., Briottet, X., 2011. Reflectance estimation from urban terrestrial images : Validation of a symbolic ray-tracing method on synthetic data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (3/W22), 71–76.

Coubard, F., Lelégard, L., Brédif, M., Paparoditis, N., Briottet, X., 2012. Reconstruction of sky illumination domes from ground-based panorama. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 39(B3), 269–274.

Demarchi, L., Cheung-Wai, C., Ma, J., Canters, F., 2012. Mapping impervious surfaces from superresolution enhanced CHRIS/Proba imagery using multiple endmember unmixing.

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 72 (8), 99–112.

Doz, S., Briottet, X., Porez-Nadal, F., Lachérade, S., 2010. Simulation of urban optical images from high spectral and spatial resolution multi-angular airborne acquisitions. In : Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Honolulu, Hawaii, USA, pp. 3572–3575.

Heiden, U., Heldens, W., Roessner, S., Segl, K., Esch, T., Mueller, A., 2012. Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information. Landscape and Urban Planning 105 (4), 361–375.

Heiden, U., Segl, K., Roessner, S., Kaufmann, H., 2007. Determination of robust spectral features for identification of urban surface materials in hyperspectral remote sensing data. Remote Sensing of Environment 111 (4), 537–552.

Heldens, W., Heiden, U., Esch, T., Dech, S., 2010. Potential of hyperspectral data for urban micro climate analysis. In : Proc. of the Hyperspectral 2010 Workshop. Frascati, Italy.

Heldens, W., Heiden, U., Esch, T., Stein, E., Müller, A., 2011. Can the future En MAP mission contribute to urban applications ? a literature survey. Remote Sensing 3, 1817–1846.

Herold, M., Roberts, D., 2005. Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration : implications for remote-sensing applications. Applied Optics 44 (20), 4327–4334.

Herold, M., Roberts, D., Gardner, M., Dennison, P., 2004. Spectrometry for urban area remote sensing : Development and analysis of a spectral library from 250 to 2400 nm. Remote Sensing of Environment 91, 304–319.

Idoughi, R., Foucher, P.-Y., Poutier, L., Achard, V., Briottet, X., 2012. Détection de polluants atmosphériques par imagerie hyperspectrale infrarouge : étude du cas de polluants gazeux en zone industrielle à haute résolution spatiale. In : Congrès de la SFTH. Toulouse, France.

Lachérade, S., Miesch, C., Lemaître, F., Briottet, X., Le Men, H., Boldo, D., Valorge, C., 2005. Analysis of the spectral variability of urban materials for classification. A case study over Toulouse (France). International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (8/W27).

Le Bris, A., Robert-Sainte, P., 2009. Classification of roof materials for rainwater pollution modelization. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(1-4-7/W5).

Lefèvre-Fonollosa, M.-J., Michel, S., Hosford, S., 2012. HYPXIM : an innovative spectroimager for science, security, and defence requirements. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 200, 20–27.

Martin, C., Bernard, R., 2012. Status of “MEMOIRES” - a thermal and optical data base (Mean of Exchange and valorization of Measurements of thermal, Optical and InfraREd properties of Samples and scenes). In : Fraunhofer IOSB. Ettlingen, Allemagne.

Masson, V., 2008. The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. Meteorology and Atmospheric Physics 102 (3-4), 135–157.

Mestayer, P., Bagga, I., Calmet, I., Fontanilles, G., Gaudin, D., Lee, J., Piquet, T., Rosant, J.-M., Chancibault, K., Lebouc, L., Letellier, L., Mosini, M.-L., Rodriguez, F., Rouaud, J.-M., Sabre, M., Tétard, Y., Brut, A., Selves, J.-L., Solignac, P.-A., Brunet, Y., Dayau, S., Irvine, M., Lagouarde, J.-P., Kassouk, A., Launeau, P., Connan, O., Defenouillère, P., Goriaux, M., Hébert, D., Letellier, B., Maro, D., Najjar, G., Nerry, F., Quentin, C., Biron, R., J.-M., C., Galvez, J., Klein, P., 2011. Flux-SAP 2010 Experimental campaign over an heterogeneous urban zone, Part 1 heat and vapour flux assessment. In : Proceedings of the 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Kos, Greece.

Mestayer, P., Durand, P., Augustin, P., Bastin, S., Bonnefond, J.-M., Benech, B., Campistron, B., Coppalle, A., Delbarre, H., Dousset, B., Drobinski, P., Druilhet, A., Frejafon, E., Grimmond, C., Groleau, D., Irbine, M., Kergomard, C., Kermadi, S., Lagouarde, J.-P., Lemonsu, A., Lohou, F., Long, N., Masson, V., Moppert, C., Noilhan, J., Offerle, B., Oke, T., Pigeon, G., Puygrenier, V., Roberts, S., Rosant, J.-M., Saïd, F., Salmond, J., Talbaut, M., Voogt, J., 2005. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE) : set-up and first results. Boundary-Layer Meteorology 114 (2), 315–365.

Nagao, M., Matsuyama, T., Ikeda, Y., 1979. Region extraction and shape analysis in aerial photographs. Computer Graphics and Image Processing 10 (3), 195–223.

Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N., Houzay, E., 2012. Stereopolis II : A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 200, 69–79.

Pauwels, V., Timmermans, W., Loew, A., 2008. Comparison of the estimated water and energy budgets of a large winter wheat field during AgriSAR 2006 by multiple sensors and models. Journal of Hydrology 349 (3-4), 425–440.

Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (1/W41).

Poutier, L., Miesch, C., Lénot, X., Achard, V., Boucher, Y., 2002. COMANCHE and COCHISE : two reciprocal atmospheric codes for hyperspectral remote sensing. In : Proc. AVIRIS Earth Science and Applications Workshop.

Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., Kaufmann, H., 2001. Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (7), 1525–1532.

Shafri, H., Taherzadeh, E., Mansor, S., Ashurov, R., 2012. Hyperspectral remote sensing of urban areas : an overview of techniques and applications. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4 (11), 1557–1565.

Sobrino, J., Bianchi, R., Paganini, M., Sória, G., Jiménez-Muñoz, J., Oltra-Carrió, R., Mattar, C., Romaguera, M., Franch, B., Hidalgo, V., Cuenca, J., Julien, Y., Atitar, M., Fernández-Renau, A., Gómez, J., de Miguel, E., Gutiérrez de la Cámara, O., Jiménez, M., Prado, E., Rodríguez-Cantano, R., Ruiz, I., Nerry, F., Najjar, G., Kastendeutch, P., Pujadas, M., Molero, F., Moreno, J., Alonso, L., Fernández, F., Galán, E., Cañada, R., Romero, J., Calpe-Maravilla, J., Camps-Valls, G., Bosch-Magraner, M., Puente-Robles, R., Cordero-Salvador, J., Torres-Carrero, J., Duque-Cuesta, M., Moya, F., Labajo, A., Labajo, S., Hidalgo-Rodríguez, J., Acero, J., Hernández-Martín, E., Martilli, A., Salamanca, F., Gimeno-Presa, L., Pigeon, G., 2009. Dual-use European Security IR Experiment 2008 (DESIREX 2008) Final Report. Tech. rep., European Space Agency, contract n˚ : 21717/08/I-LG, http ://www.uv.es/desirex.

Souchon, J.-P., Thom, C., Meynard, C., Martin, O., 2012. A large format camera system for national mapping purposes. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 200, 48–53.

Souchon, J.-P., Thom, C., Meynard, C., Martin, O., Pierrot-Deseilligny, M., 2010. The IGN CAMv2 system. The Photogrammetric Record 25 (32), 402–421.

Vermote, E., Tanré, D., Deuzé, J., Herman, M., Morcrette, J.-J., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : an overview. IEEE Transactions on Geos-

cience and Remote sensing 35 (3), 675–686.

Viallefont, F., Poutier, L., Foucher, P.-Y., Adeline, K., Briottet, X., 2013. Radiometric calibration and validation of hyperspectral camera for UMBRA airborne campaign. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote SensingSubmitted.

Weng, Q., 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas : requirements, methods and trends. Remote Sensing of Environment 117 (2), 24–49.