

VECTEURS AÉRIENS TÉLÉOPÉRÉS POUR L'ACQUISITION DE DONNÉES SPATIALES D'OBJETS PATRIMONIAUX, - RETOUR D'EXPÉRIENCE -

Violette Abergel¹, Renato Saleri², Hervé Lequay³

1: laboratoire MAP aria UMR CNRS MCC 3495 ,ENSA Lyon , violette.abergel@lyon.archi.fr

2: laboratoire MAP aria UMR CNRS MCC 3495 ,ENSA Lyon , renato.saleri@lyon.archi.fr

3: laboratoire MAP aria UMR CNRS MCC 3495 ,ENSA Lyon , herve.lequay@lyon.archi.fr

Résumé

Le relevé aérien constitue, dans le domaine de l'archéologie et de l'architecture, un vaste champ d'applications et d'intérêt. Au-delà des capacités croissantes des drones existants, le potentiel opérationnel de tels outils dépasse aujourd'hui l'imagination de leur propres créateurs : initialement conçus dans le secteur de la robotique civile et militaire, de récentes expérimentations ont pu tester le vol autonome, la prise de décision automatique, ainsi que l'intelligence distribuée.

Avec près de dix ans d'expérience dans le domaine du relevé aérien, le laboratoire MAP a expérimenté un large panel de vecteurs aériens, pilotés ou semi-autonomes, équipés de capteurs de différentes natures, à des fins de télédétection et d'acquisition de données spatiales, ce travail étant principalement dévolu à la modélisation et à la simulation d'environnements 3D à haute valeur patrimoniale. Les compétences du MAP concernent donc la mobilisation de vecteurs aériens sans équipage, mais aussi le développement d'outils experts pour la modélisation et représentation 3D ou encore les protocoles d'analyse d'image dans le domaine de l'architecture, de l'urbanisme et du paysage.

Mots-clés : drones, modélisation géométrique 3D, acquisition de données spatiales, procédures SfM.

Abstract

Aerial surveying is, in the domain of archeology and architecture, an exponential field of application and interest. Beyond the increasing flying capabilities and skills of existing UAV, the operational potentiality of such aircraft oversteps the imagination of their own creators. Initially conceived for robotic civilian and military surveying applications, recent experiments have tested autonomous flight, self decision-making and multi-agent convergent tasks.

Based upon 10 years of aerial surveying experience, part of the MAP activity is concerned: firstly, unmanned flight and related developments within a specific institutional partnership and secondly, advanced tool-making workflow for architecture and urban design 3D modeling and image analysis protocols.

Keywords: UAV, 3D modeling, spatial data acquisition, SfM protocols

1. Introduction

Cet article présente les résultats de quelques-unes des campagnes menées par le laboratoire MAP depuis une dizaine d'années avec des vecteurs aériens téléopérés. Il s'agit essentiellement d'un retour d'expérience sur les capteurs et les vecteurs utilisés, mais aussi la mise en évidence des limites opérationnelles des configurations mobilisées au regard des besoins expérimentaux du laboratoire. C'est par la mise en convergence de compétences complémentaires et trans-disciplinaires au fil des campagnes que nous sommes en mesure aujourd'hui d'adosser à nos travaux de recherche une plate-forme technique à opérabilité mixte, dont la géométrie se plie au gré des impératifs opérationnels des campagnes de prise de vue.

Le laboratoire MAP, créé en 1998, réunit dans une UMR CNRS/MCC les compétences de quatre laboratoires de recherche impliqués dans les questionnements scientifiques principalement liés à la modélisation géométrique et à l'acquisition de données spatiales. A cela s'ajoutent le développement d'outils d'assistance à la conception et pour une moindre part à la simulation et l'évaluation du projet par des approches environnementales, notamment les questions liées à

l'amplification procédurale de données spatiales et le développement d'outils de détection automatique d'artéfacts. Ces domaines d'étude nécessitent bien sûr l'implication massive des outils numériques dans le processus tout entier et exigent une veille attentive des dispositifs matériels et logiciels existants ou en devenir. Le développement récent de la photogrammétrie automatisée et l'évolution des algorithmes de vision par ordinateur, ainsi que les capacités de traitement des machines les plus récentes, ont permis l'essor de techniques de modélisation géométrique de plus en plus efficaces, avec des processus d'acquisition toujours plus autonomes. Au début des années 2000, les scanners lasers semblaient promis à une suprématie durable, les outils de photogrammétrie de l'époque étant complexes à mettre en œuvre et ardu à exploiter pour des utilisateurs non confirmés. Cette tendance semble s'être complètement inversée depuis l'avènement des algorithmes basés sur des structures SfM (Structure from Motion). Nous assistons actuellement à l'émergence de solutions logicielles commerciales ou libres basées sur la géométrie projective et aujourd'hui capables pour la plupart d'automatiser entièrement le processus de modélisation géométrique, depuis la calibration des caméras jusqu'à la génération de meshes 3D texturées en passant par l'auto-corrélation, la génération de points de contrôle et

la génération de nuages de points.

Le caractère monumental de bon nombre de terrains d'étude a cependant mis en évidence les limites des campagnes photographiques terrestres: à ce titre l'exploitation de vecteurs aériens a permis efficacement de combler cette lacune en mettant à notre portée des données spatiales jusque là inaccessibles. Bien sûr la mobilisation de capteurs aériens nécessite des connaissances dans un tout autre domaine, mais sur ce point aussi des percées spectaculaires ont été menées dans le domaine de l'assistance au pilotage comme dans celui des configurations aéromobiles ou des systèmes de propulsion. Ce n'est que par une mise en oeuvre prudente et constamment relayée par l'expérience précieuse d'équipes partenaires toujours impliquées lors des missions que nous n'avons eu à déplorer (jusqu'ici) aucun accident majeur.

2. Les vecteurs

Présent sur la scène des vecteurs télé-opérés depuis une dizaine d'années, le laboratoire MAP a constamment testé et expérimenté différentes configurations matérielles et logicielles issues d'horizons académiques et institutionnels divers. Aux balbutiements des premières campagnes ont rapidement succédé des expériences de plus en plus ciblées vers l'acquisition de données spatiales à l'aide de capteurs photographiques. Depuis quelques années, par la mise en convergence d'outils et de matériels sophistiqués et au travers d'une collaboration fructueuse avec des partenaires industriels et technologiques de très haut niveau, le laboratoire MAP est en mesure de mobiliser un work-flow capable de répondre aux demandes les plus exigeantes en termes de précision de la mesure et de sécurité de mise en oeuvre.

2.1 Paramoteur PIXY

L'intérêt pour les vecteurs aériens a pris corps au début des années 2000, à l'occasion de la signature d'une convention avec l'institut National du Patrimoine Tunisien qui cherchait un moyen de cartographier avec précision la zone des théâtres du site romain de Dougga ainsi que la modélisation poussée de certains éléments majeurs de son architecture. L'ampleur du chantier a rapidement imposé l'utilisation d'un capteur aérien télé-opéré, mobilisable sans besoin de ressources ou de connaissances particulières dans le domaine du pilotage.



Figure 1 : Dougga : campagne aérienne paramoteur.

Quelques rudiments d'aéorologie ainsi qu'un briefing succinct sur les connaissances "à minima" pour effectuer un décollage et un atterrissage dans des conditions de sécurité acceptables pour l'époque permettaient de mettre en l'air un paramoteur 2 axes de type PIXY sans trop de difficultés. Le contrôle en vol était cependant rendu difficile par sa sensibilité à la moindre brise qui le rendait sujet à de fortes dérives sur l'axe ainsi qu'à une instabilité permanente sur le plan vertical. Enfin la tourelle non stabilisée rendait hasardeuse toute tentative d'alignement de prises de vues successives, la seule parade consistant à multiplier les passages sur zone pour pouvoir obtenir - par "redondance massive" - un semblant de couverture régulière. Alors que le décollage s'effectuait - toujours par vent de face - sur une distance réduite (15-20m) et sans trop de heurts, l'atterrissage se montrait lui techniquement plus complexe à maîtriser. Il consistait en général par un posé "en vrac" rendu possible par la cage en aluminium/zycral protégeant efficacement l'électronique de bord et la charge utile.

2.2 Copter 1 (Survey Copter)

Les limites opérationnelles du PIXY ont naturellement conduit le laboratoire à chercher un vecteur de nature différente, capable d'être opéré à partir d'une surface réduite et moins sensible à l'aéorologie particulière à proximité du sol ou des obstacles et surtout de pouvoir opérer "en vol stationnaire" afin d'optimiser le positionnement du capteur lors de la prise de vue. C'est donc naturellement vers l'hélicoptère que le MAP a cherché des solutions existantes.



Figure 2 : Le Capitole de Dougga, Copter 1.

La société Survey Copter, basée à Pierrelatte dans la Drôme provençale, développait déjà depuis quelques années des solutions à usage militaire, capable d'emporter des charges utiles destinées à la surveillance et à la télédétection, notamment des capteurs optiques et/ou thermiques. La question du pilotage n'est - dans ce cas - plus triviale et elle mérite d'être soulevée: le contrôle d'un hélicoptère "modèle réduit" ne peut pas être improvisé - contrairement au cas du PIXY - et nécessite le contrôle par un opérateur entraîné. Il s'agit donc bien entendu de "pilotage à vue" qui de ce fait limite fortement l'amplitude opérationnelle du capteur, d'une part par l'impossibilité de déporter le vecteur à plus d'une centaine de mètres de son point de décollage sous peine de ne plus pouvoir interpréter avec certitude sa position dans l'espace, ensuite par la

difficulté à le positionner précisément dans un plan horizontal et vertical, ce qui s'avère nécessaire pour permettre une discriminance angulaire satisfaisante entre les clichés.

Bien sûr le travail s'effectue avec un opérateur tourelle qui contrôle l'appareil de prise de vue à l'aide d'un retour vidéo et qui de fait dirige les opérations en dictant au pilote les manoeuvres à exécuter; ce type de positionnement n'est cependant pas suffisamment précis pour permettre une campagne de prises de vue globale. Tout au plus, les images aériennes peuvent être exploitées en marge d'une campagne terrestre photographique ou laser classiques afin de compléter ponctuellement la texture des objets modélisés. C'est avec ce vecteur que nous avons néanmoins accompagné les campagnes de prises de vues de la cour carrée de la Sorbonne et de l'Hôtel de Sully à Paris en 2003. Une présentation officielle des travaux effectués lors de ces deux campagnes a été présentée aux journées européennes du patrimoine en 2004.

2.3 Copter 1b

Les limites opérationnelles de cette première machine ont rapidement nécessité l'acquisition de la première version "dronisée" de la gamme Copter. La mise en oeuvre étant plus complexe que la version précédente mais avec l'avantage d'un système de contrôle qui rendait le vecteur autonome et programmable. L'interface permet - après calibration préalable de la carte locale - de définir un plan de vol avec des waypoints à suivre. Le cas échéant, la machine va s'arrêter et attendre une instruction, initier une séquence de prise de vue ou poursuivre son chemin en infléchissant sa trajectoire. Une attention particulière doit être portée au tracé des lignes de vol car le vecteur n'étant pas équipé de détecteur de proximité, elles doivent être établies en tenant compte des obstacles potentiels au droit des branches de la navigation prévue.



Figure 3 : Le Copter 1b à Oudna (Tunisie).

2.4 Copter 4

L'essor des capteurs lasers a permis début 2008 d'envisager l'emport d'un scanner de petite dimension. La motorisation du Copter 1b s'avérant insuffisante en l'état - le Zenoah de 26 cm³ alors utilisé était déjà en limite de puissance pour l'emport de la station weControl embarquée - c'est vers une version bimoteur, développée par Survey Copter depuis quelques années, que le choix a été fait. Ce vecteur, capable de

supporter idéalement une charge de 12kg s'avère suffisamment robuste pour embarquer un laser, et possède une réserve de puissance confortable pour une utilisation courante.

Néanmoins, l'essor spectaculaire et récent de la photogrammétrie automatisée a cependant rendu caduque cette voie, nous utilisons donc depuis cette période des capteurs photographiques numériques plein format - haute résolution qui remplissent avec efficacité les impératifs des missions menées depuis. Une fonctionnalité non prévue sur la version commerciale de l'interface weControl a par ailleurs été ajoutée à la demande du laboratoire: la mise au point d'un protocole expérimental de prises de vues "à la verticale" pour cartographier avec précision des sites archéologiques par exemple, nécessite une redondance importante au niveau des artefacts photographiés; pour une spatialisation optimale des objets survolés, ceux-ci doivent être visibles sur - à minima - 4 ou 5 clichés contigus ce qui impose un taux de recouvrement inter-images supérieur ou égal à 80%. Intervient ici la possibilité de déclencher les prises de vue automatiquement lors du vol, la cadence de déclenchement étant fonction de l'altitude moyenne du vol, de la vitesse de déplacement (en général proche de 2 m/s) et du taux de recouvrement, nous l'avons vu, en général proche de 80%, paramètre par l'opérateur.

De fait, le Copter 4 répond pleinement aux besoins relatifs à la prise de vue verticale de sites archéologiques en extérieur, comme en témoignent les campagnes de Vintimille ou Pompéi. Cependant, ce système exige une organisation conséquente, et s'avère gourmand en ressources matérielles, humaines, et temporelles. Le matériel nécessaire à son déploiement impose un transport par camionnette, à gérer avec précautions étant donnée la fragilité de l'ensemble. Par ailleurs, depuis mai 2012, la législation française en matière de drones à usage civil soumet ces vecteurs aériens à des réglementations très strictes, et impose notamment à chaque mission l'obtention d'une autorisation de vol préalable, définissant des conditions de vol dépendant de scénarios de sécurité. Le Copter 4 appartient à la catégorie F (drones de 25 à 150kg), et se situe donc d'ores et déjà hors des quatre scénarios de sécurité usuels. Des dérogations liées au caractère expérimental des vols sont certes envisageables, mais pas systématiques, ce qui nous conduit à chercher en parallèle des solutions alternatives, plus légères et, si possible, moins contraignantes en termes de déploiement.



Figure 4 : Le Copter 4 à Cerveteri (Italie).

2.5 Octocoptère Push-Pull

Par ailleurs, l'utilisation de moteurs thermiques peut limiter l'opérabilité des vecteurs "grand format" habituellement utilisés par le laboratoire. Outre la nécessité de réaliser "à la demande" le mélange 2 temps indispensable à l'alimentation des moteurs avec la conséquente émission de fumées polluantes, une partie des relevés effectués par le laboratoire porte sur des espaces confinés ou de petite taille, incompatibles avec la dimension du vecteur ou la nature du vol; rappelons que les signaux GPS sont masqués en intérieur et rendent impossible le vol en mode automatique. Dans ce cas, la mise en oeuvre d'une machine de petite dimension, parfaitement compensée et l'absence de vent en intérieur permet un vol extrêmement efficace au plus près des décors ou des détails d'architecture. Bien sûr, la nécessité de travailler à la verticale limite la précision du contrôle des trajectoires "à vue" mais étant donnée la stabilité du vol produit, le contrôle s'effectue par de simples inflexions sur un vol "d'équilibre" rendu possible par la configuration de ces nouvelles machines volantes. Un avantage non négligeable consiste en la possibilité de confiner de manière absolue l'espace à traiter permettant ainsi de sécuriser complètement les aires d'évolution, dont la présence humaine peut se résumer au pilote et au cadreur. De cette manière, les conditions sont remplies pour assurer un vol selon le scénario S1 prévu par la DGAC. Notons tout de même que, si l'Octocopter ne permet pas d'embarquer une charge utile aussi conséquente que sur le Copter 4, il supporte tout de même le poids d'un reflex numérique type Nikon D7000 équipé d'un objectif moyenne ou courte focale, souvent plus légers, matériel par expérience adapté à la prise de vue en intérieur.

2.6 Ballon captif

Le ballon captif n'entre pas véritablement dans la catégorie d'aéronef télé-opéré, ne s'agissant que d'un vecteur aérien se déployant à la verticale et sans véritable capacité de déploiement déporté, si ce n'est que par une exploitation - le cas échéant - d'une composante de vent soufflant dans la bonne direction.

Ce type de vecteur, bien que simple à mettre en oeuvre et jusqu'ici parfaitement compatible avec les nouvelles normes de navigabilité imposées par la DGAC, se plie difficilement aux exigences d'une campagne aérienne dévolue à la photogrammétrie automatisée par exemple; sa sensibilité aux phénomènes aérologiques (vent, turbulences...) ainsi que l'impossibilité de le positionner à la demande en un point précis voire de lui faire suivre une trajectoire programmée par avance n'ont permis jusqu'ici de l'exploiter que dans le cas de campagnes photographiques aériennes "basse hauteur". Notons au passage que les expériences faites avec un dirigeable de 35m³ n'ont pas permis d'améliorer de façon sensible les conditions de prise de vue, la dimension de l'engin (9m de long) le rendant beaucoup trop sensible aux mêmes phénomènes aérologiques...



Figure 5 : La cité internationale de Lyon.

3. Les campagnes

Aux vues des campagnes menées depuis plus de 10 ans par le laboratoire, c'est la solution "voilure tournante" qui a certainement rempli de manière satisfaisante les impératifs de mission. Bien que la technologie mobilisée pour ce cas de figure soit complexe et d'un rendement aérodynamique somme toute pénalisant, c'est le type de vol qui jusqu'ici a rempli au mieux les besoins en terme d'opérabilité: la possibilité de se positionner en stationnaire afin de trouver le meilleur angle de vue, le suivi précis de plan de vol programmé et (dans le cas du Copter 4) une capacité d'emport compatible avec la masse des capteurs employés. Il reste que la masse du vecteur lui-même (plus de 35 kgs à vide) dépasse largement la limite imposée par la DGAC pour une activité "utilitaire": on rentre ici dans la catégorie F (de 25 à 150 kg) mais dont la pratique nous est exceptionnellement ouverte (sous réserve d'obtention d'un laissez passer officiel de la DGAC au cas par cas) étant donné le caractère expérimental de notre activité et de notre expérience dans le domaine. La mise en oeuvre de ce vecteur est néanmoins assujettie à un déploiement laborieux et encombrant: plusieurs éléments de contrôle à câbler préalablement, une lourde batterie de campagne à déplacer, une antenne à mettre en place pour la liaison HF et la télémétrie... Le tout nécessitant une fourgonnette aménagée parfois difficile à déployer sur le terrain. En revanche, l'octocoptère s'avère d'une mise en place extrêmement rapide, trouvant place sur la banquette arrière d'une petite voiture. Il peut être déployé très facilement et remis de manière tout aussi confortable. Il reste que la fiabilité de son système de contrôle ne nous semble pas - jusque ici - aussi efficace que celle du Copter 4. Il demeure bien plus sensible aux conditions météo et la propulsion électrique ne permet qu'une autonomie de 8-9 minutes. Sur cette machine le capteur employé - plus souvent dévolu à la vidéo - est soit une caméra type GoPRO soit un Nikon D7000 avec objectif 10.5mm "fish eye" focale fixe d'un poids de 1,2 kgs.

Nombre de campagnes de prises de vue ont été effectuées avec le Copter 1 et/ou le PIXY. Leur faible capacité opérationnelle n'a pas permis de remplir pleinement les objectifs des missions effectuées. Ce n'est qu'en 2005 que pour la première fois le Copter 1b est déployé sur le terrain et permet de tester efficacement le vol en mode "mission" et "assisté". Bien que la capacité à piloter des hélicoptères radio-

commandés soit un pré-requis souhaitable, l'utilisation du Copter 1B ne le requiert pas et nécessite à minima d'une courte formation au siège de la maison mère (valant qualification pour toutes les machines de même catégorie). Le laboratoire MAP est par ailleurs un des seuls exploitants ayant conservé opérationnelle la liaison RC avec l'aéronef, la plupart des utilisateurs s'en affranchissent au vu de l'efficacité et de l'autonomie du dispositif. Il est arrivé néanmoins que par dégradation de liaison radio entre le vecteur et la station sol ou par perte de signaux GPS la machine devienne incontrôlable et nécessite d'une reprise en main interpestive en mode RC.

3.1 Théâtre de Oudna (Tunisie)

Pour cette toute première mission deux modes de vol ont été exploités : un survol en mode automatique avec des aller-retours espacés d'une dizaine de mètres et un vol en mode assisté avec huit vols stationnaires avec prises de vues convergentes. Les données issues de ces deux vols ont été ainsi exploitées de manière spécifique:

- une orthophoto de grande dimension, obtenue par assemblage manuel de la mosaïque d'images issue de la campagne.
- une modélisation 3D du théâtre à l'aide du logiciel Image Modeler permettant de construire des géométries texturées de manière semi-automatique. Ces premiers résultats, fastidieux et laborieux avec les outils de l'époque, ont permis néanmoins de préfigurer les impératifs opérationnels des campagnes à venir.

3.2 Saint Michel de Cuxa (66)

Dans le cadre du projet 3D Monuments , la campagne de prise de vue sur Saint Michel de Cuxa dirigée par Michel Berthelot, a permis de tester non seulement un vol à grande hauteur (100m) mais également l'expérimentation d'un géoréférencement précis des clichés obtenus. La collaboration avec le laboratoire MATIS de l'IGN et la mobilisation de ses chercheurs lors des campagnes de prise de vue nous ont parfois conduit à mener des expériences de terrain non prévues initialement. La consolidation des nuages de points issus de phases de calcul préalables des outils exploités est rendue nécessaire lors des campagnes de grandes dimensions. Pour affiner la précision des mesures, il est d'usage soit de déployer au sol des mires géoréférencées (GCP) auxquelles on aura recours pendant les phases de calcul, soit de monitorer la position exacte d'artefacts facilement identifiables depuis le vol (coins de bâtiments, détails de pavements significatifs, détails divers...). Il est également possible de recourir aux informations enregistrées en temps réel par le capteur durant le vol, pour peu qu'il soit équipé d'un récepteur GPS.

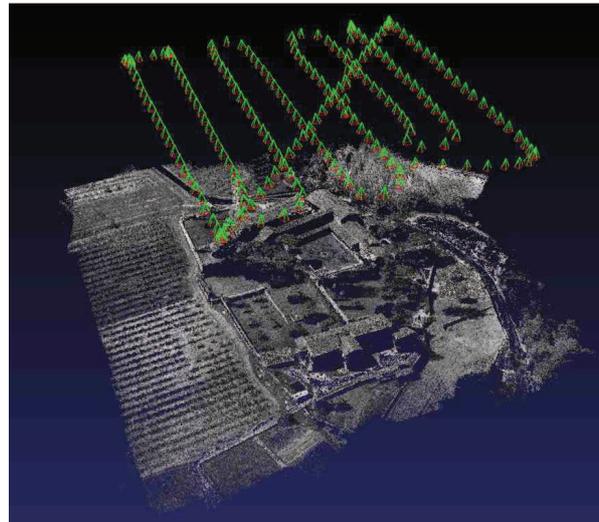


Figure 6 : Nuage de points et trajectoire du vecteur aérien.

Depuis 2006 l'IGN travaille à la réalisation d'un petit dispositif permettant le monitoring à grande échelle et le suivi de mouvements de terrain appelé Géocube. Il a été à de nombreuses reprises déployé sur le terrain lors des missions et efficacement utilisé comme GCP de précision. La capacité d'emport du Copter 4 a permis d'en monter un sur le plan fixe de l'hélicoptère et de le coupler avec le capteur photographique utilisé lors du vol, un Canon EOS 5. Bien que garantissant un monitoring précis de la position horizontale de l'appareil au moment de la prise de vue, l'impossibilité de contrôler avec précision la verticalité de la prise de vue pendant le vol, rien ne garantit la correspondance exacte entre la position du capteur et le centre géométrique de l'image capturée.

3.3 Théâtre Romain de Vintimille (Italie)

Le théâtre romain de Vintimille (Italie) a fait l'objet d'un relevé complet, dont la précision requise était inférieure à 4mm (GSD = Ground Sample Distance <4). Ceci pour réaliser des levés topographiques ainsi que des plans et des orthophotos au 1/20. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'institut FBK (Fondazione Bruno Kessler) de Trente, sous la direction scientifique de Fabio Remondino. Le protocole expérimental mis en oeuvre a également permis de mesurer la différence de précision du relevé avec ou sans l'utilisation des points de contrôle au sol lors de la consolidation du subséquent nuage de points. Il a également été possible de mesurer la distorsion générale du nuage et la précision locale du relevé. C'est aussi la première fois que des vues obliques sont utilisées en corrélation avec la couverture horizontale pour construire des sections et des élévations verticales. Le laboratoire a également pu tester les configurations capteur/optique optimaux, en termes de résolution et de poids. Nous avons calculé et validé l'utilisation presque systématique depuis ce jour d'un capteur plein format en 24Mpix avec un objectif 50mm qui permet de valider GSD (en mm) = 1/10.h (en m). Ainsi, avec un vol à hauteur moyenne de 40m par rapport au point le plus bas du site nous obtenons bien un GSD théorique maximum de +/- 4mm. La campagne sur le théâtre de Vintimille est aujourd'hui portée en exemple par le laboratoire FBK en termes d'accomplissement des objectifs de mission, d'intégration des moyens mis en oeuvre et d'aboutissement des mesures effectuées.

C'est à Vintimille que nous avons cependant pu mesurer la fluctuation de la précision du positionnement GPS, dont la dérive d'un jour sur l'autre de quelques 3 mètres nous a poussés à effectuer la dernière branche d'un vol programmé en extrême limite d'une route très fréquentée; depuis ce jour nous intégrons une marge de sécurité supplémentaire de 5m dans le tracé de nos plans de vol...



Figure 7 : Orthophoto du théâtre romain de Vintimille (Italie).

La plupart des campagnes récentes ont fait l'objet d'un post traitement des données à l'aide de la suite logicielle MicMac, développée par le laboratoire MATIS de l'IGN avec lequel nous entretenons un partenariat depuis de nombreuses années. A partir d'une série de photos le pipe-line global consiste en une extraction automatisée de points de contrôle, une passe de calibration des caméras, une phase de calcul de corrélation dense inter-images et enfin la construction d'ortho-photos. Le choix d'une longueur focale appropriée est indispensable car elle va déterminer le nombre optimal de photos à prendre ainsi que la résolution finale des nuages de points générés (GSD). Bien que la calibration des caméras soit automatisée, il est utile de procéder à une première passe de prises de vue (quelques images suffisent) sur un élément géométrique orthogonal (coin intérieur d'une pièce par exemple) afin de fournir une calibration précise du matériel utilisé lors de la campagne. Par ailleurs, un taux de recouvrement de 80% comme mentionné précédemment n'est pas excessif pour permettre une corrélation efficace des clichés entre eux.

3.4 Le secteur des théâtres de Pompei (Italie)

Sous l'impulsion de l'université Federico 2 de Naples nous avons été invités à effectuer une levée expérimentale de la zone des théâtres dans la partie Sud de la ville de Pompei. Celle ci devrait être idéalement préalable à une campagne de relevé globale à effectuer dans les prochaines années sous couvert de financement européen. Il était question d'y mettre à l'épreuve les protocoles expérimentaux déjà validés par le passé et quantifier l'investissement en temps et financier d'une campagne de plus grande envergure. La zone survolée mesure 170 x 100 m environ, soit presque deux hectares ; elle a été "couverte" par 18 branches aller-retour de 170 m chacune, auxquelles il faut ajouter les branches de ralliement et les trajectoires d'inversion de cap. Nous

avons ainsi estimé la longueur du vol à plus de 3.5 km, ce qui, à raison de 2m/sec, représente environ 50 min de vol. Bien que le Copter 4 embarque 4 litres d'essence et affiche ainsi une autonomie théorique de 1h20 (20min/Lt) nous avons réalisé à Pompei le vol le plus long en absolu pour notre petit hélicoptère. Nous avons effectué au dessus de l'Odéon une série de photos obliques permettant la consolidation d'un nuage dense comprenant aussi bien les parements verticaux que les dalles horizontales.

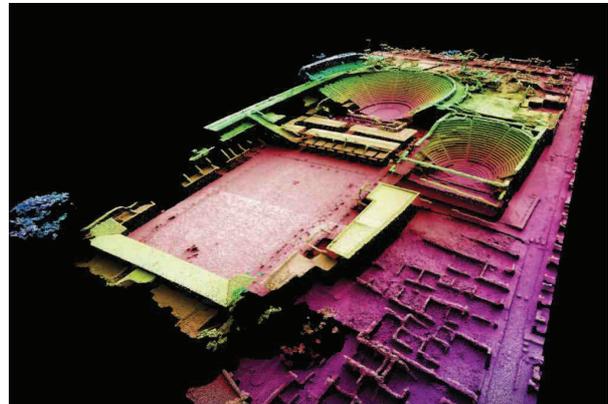


Figure 8: Corrélation dense et depth shading du nuage de points de la zone des théâtres à Pompei (Italie).

3.5 Le château Boulbon (13)

C'est ici une initiative privée qui a été prétexte à expérimenter de nouveaux protocoles d'acquisition, toujours avec le Copter 4.



Figure 9: Relevé vertical de la façade Ouest du château Boulbon

Le Château de Boulbon est un des vestiges fortifiés majeurs de la vallée du Rhône et a vraisemblablement été érigé au XI^{ème} siècle comme bastion de défense et d'observation, surplombant de sa masse imposante la basse vallée du Rhône et le posant comme sentinelle privilégiée du comté de Provence. Ses bastions érigés en donjons et sa façade abrupte sur le piton rocheux qui le supporte est, de fait, inaccessible et difficilement visible depuis le contre-bas C'est pour cette raison, et pour faciliter le travail de relevé préalable à sa restauration à venir que les ressources du laboratoire ont été mobilisées pour l'occasion. Encore une fois, les ressources logicielles dévolues au pilotage de la machine ne permettent pas de programmer un vol sur

un plan vertical, indispensable à la levée d'une façade par exemple.

Le logiciel de traitement de données spatiales ne fait, pour sa part, pas la différence entre une campagne verticale et horizontale, les prérequis d'acquisition restent les mêmes dans les deux cas de figure. L'autorisation de vol, indispensable depuis mai 2012 pour toute opération aérienne extérieure avec un aéronef téléopéré, ne permettait cependant le survol que de la partie orientale du château, facilement ségrégeable mais fortement encaissée. La présence attenante au château de gorges abruptes limitait fortement l'accès à la constellation GPS. De ce fait le décollage et l'atterrissage de la machine devaient se faire en mode RC jusqu'à la hauteur à laquelle la couverture GPS redevenait suffisante pour un positionnement autonome du vecteur. Le positionnement à une vingtaine de mètres de la roche à permis de construire le modèle 3D du versant oriental de la forteresse avec la résolution (prévue) de +/- 2mm.

4 Perspectives attendues

Nous avons vu que pour assurer une couverture efficace en termes d'acquisition spatiale, le contrôle précis de la trajectoire était primordial. Il est en effet très important de positionner le capteur de manière précise dans l'espace afin de garantir, soit une discriminance angulaire optimale dans le cas de captures "en volume", soit d'assurer une continuité contrôlée du data-flow en assurant un taux de recouvrement optimal. Dans tous les cas, les flous de bougé ou de mise au point sont à proscrire absolument. Pire, une photo floue non identifiée et non extraite du set à traiter peut "polluer" l'interprétation des données sur tout un lot d'images. Sur le plan vertical, une altitude contrôlée va permettre l'homogénéité de la mesure en termes de résolution au sol (GSD). Les dernières campagnes menées par le laboratoire on mis en concurrence des protocoles d'acquisition complémentaires (verticaux et obliques) afin de déterminer les modes de capture les plus efficaces pour capturer l'intégralité des géométries d'un objet survolé. Rappelons que jusque ici les campagnes verticales ne permettent de mesurer efficacement que des planimétries horizontales. Les toutes dernières missions menées par le laboratoire ont permis de tester quelques protocoles permettant à terme de pallier à cet inconvénient inhérent au mode de calcul effectué par les solutions logicielles mobilisées.



Figure 10 : l'Abbaye de Notre Dame des Dombes

Depuis 2008, c'est par l'utilisation d'un avion léger "grandeur" qu'il nous est possible d'aborder la prise de vue à l'échelle du territoire afin de construire des modèles 3D à grande échelle. L'altitude de vol se situe en général entre 300 et 600m et sur des circumnavigations de plusieurs kilomètres, ce qui place, de fait, ce type de vol en dehors des capacités opérationnelles de la plupart des drones civils. Les premières expérimentations ont permis d'ajuster les paramètres concernant l'altitude de survol et le choix des optiques les plus appropriées. Evidemment cette méthode reste limitée, étant assujettie aux règles de survol spécifiques à l'aviation légère. Gageons qu' à terme nous puissions intégrer les bases de données multi-résolutions issues de campagnes de prise de vue à plusieurs échelles de survol.

5 Bibliographie et références

E. Nocerino, F. Remondino, F. Menna, R. Saleri, *Accuracy and Block Deformation Analysis in Automatic UAV and Terrestrial Photogrammetry – Lesson Learnt* – in International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II – 5W1, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2-6 september 2013 Strasbourg, France.

R. Saleri, V. Cappellini, N. Nony, M.P. Deseilligny, E. Bardière, M. Campi, L. Deluca, *UAV Photogrammetry for archeological survey: The Theaters Area of Pompei*, in DIGITAL HERITAGE 2013, october 28 – november 1st 2013 Marseille, France

Busseray C. De Luca L. Véron P., Florenzano M. 2008 *A realtime 3D interactive interface for a image spatial retrieval*. Proceedings of the IADIS International Conference on Computer Graphics and Visualization.

Chapuis J. 2007. *Oberon Based Autopilots for Unmanned Aerial Vehicles*. WeControl AG Air Force Center corporate document.

Deseilligny M.P. & Clery I. 2011. *Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images*. In Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 38 (5/W16).

Deseilligny M. De Luca L. Remondino F. 2011 *Automated image based Procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimages*. Proceedings of XXIIIth International CIPA Symposium.

Deseilligny M. Pappadimitriou N. 2006. *A multiresolution and optimisation-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT HRS stereop imagery*. In Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 36 (1/W41).

Page décrivant l'activité du laboratoire MAP dans le domaine :



web