



HAL
open science

Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère : application au suivi d'évolution de digues

Vincent Tournadre

► **To cite this version:**

Vincent Tournadre. Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère : application au suivi d'évolution de digues. Traitement des images [eess.IV]. Université Paris-Est, 2015. Français. NNT : 2015PESC1131 . tel-01373128

HAL Id: tel-01373128

<https://theses.hal.science/tel-01373128v1>

Submitted on 28 Sep 2016

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.

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

École Doctorale Paris-Est
Mathématiques & Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS EST

Domaine : Traitement du Signal et des Images

présentée par **Vincent Tournadre**
pour obtenir le grade de
Docteur de l'UNIVERSITÉ PARIS EST

Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère, application au suivi d'évolution de digues

Tome I : Corpus

Soutenue publiquement le 21 décembre 2015 devant le jury composé de :

Rapporteurs :

M. Pierre Grussenmeyer
M. Christian Heipke

*INSA Strasbourg
Leibniz Universität Hannover
ENS Cachan*

Président de jury :

M. Jean-Michel Morel

Examineurs :

M. Pascal Monasse
M. Gilles Rabatel

*École des Ponts ParisTech
IRSTEA Montpellier*

Directeur de thèse :

M. Marc Pierrot-Deseilligny

IGN - ENSG Paris-Est

Encadrant industriel :

M. Paul-Henri Faure

CNR - CACOH Lyon

École Nationale des Sciences Géographiques
Laboratoire d'Opto-Électronique et de Métrologie Instrumentale
6, Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes
77420 Champs-sur-Marne
France

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
École Doctorale Paris-Est MSTIC
6, Av Blaise Pascal - Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée cedex 2
France

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

École Doctorale Paris-Est
Mathématiques & Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication

PhD Thesis
of UNIVERSITÉ PARIS EST
Specialty : Signal and Images Processing

presented by **Vincent Tournadre**
to obtain the title of
Docteur de l'UNIVERSITÉ PARIS EST

**Metrology with light aerial photogrammetry,
application to dyke monitoring**

Volume I : Corpus

Presented on December 21st 2015 with the jury composed of :

Reviewers :

M. Pierre Grussenmeyer

INSA Strasbourg

M. Christian Heipke

Leibniz Universität Hannover

President :

M. Jean-Michel Morel

ENS Cachan

Examinators :

M. Pascal Monasse

École des Ponts ParisTech

M. Gilles Rabatel

IRSTEA Montpellier

Advisor :

M. Marc Pierrot-Deseilligny

IGN - ENSG Paris-Est

Industrial supervisor :

M. Paul-Henri Faure

CNR - CACOH Lyon

École Nationale des Sciences Géographiques
Laboratoire d'Opto-Électronique et de Métrologie Instrumentale
6, Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes
77420 Champs-sur-Marne
France

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
École Doctorale Paris-Est MSTIC
Département Études Doctorales
6, Av Blaise Pascal - Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée cedex 2
France

*Dix années après,
à quelques jours près...*

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier mes encadrants, Marc Pierrot-Deseilligny, et Paul-Henri Faure, sans qui cette étude n'aurait pu voir le jour. J'ai eu la chance de bénéficier d'un encadrement sans faille, aussi bien au niveau scientifique qu'organisationnel, et vous en remercie vivement.

Merci à Pascal Monasse, Jean-Miche Morel et Gilles Rabatel d'avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation, et particulièrement à Christian Heipke et Pierre Grünenmeyer pour en être les rapporteurs.

Merci à mes collègues pour les bons moments que nous avons partagés, les relectures, les discussions et les cafés : Mehdi Daakir, Anna Christofol, Anna-Maria Rosu, Luc Girod, Mariam Samaan, Jonathan Lisein, Ewelina Rupnik et les experts dev (Matthieau Deveau, Jeremy Belvaux et Gérard Choqueux).

Merci au personnel administratif, avec une pensée particulière pour Marie-Claude Foubert, Florence Gaggini, Christiane Guillerau-Zahra et Sylvie Cach, qui m'ont tant facilité la vie. Votre compréhension quant à ma situation parfois hors cadre et votre sympathie ont été des atouts indéniables pour mener à bien ce projet.

Merci aux équipes de l'IGN, spécifiquement aux chercheurs du LOEMI pour les discussions techniques que nous avons eues, aux enseignants du DIAS pour leur organisation du monitorat, au SAA pour les acquisitions aériennes et à l'équipe RSI pour leur résolution rapide de petits soucis informatiques.

Merci aux équipes de la CNR pour leur accueil et enthousiasme quant à nos recherches. Une pensée particulière pour les équipes de topographes, dont l'assistance sur le terrain a été précieuse, et à Asline Koudjourné pour son assistance sur les traitements.

Merci à l'ESGT et à José Cali pour m'avoir ouvert l'accès au laboratoire de métrologie, et pour votre aide sur la reproduction d'un vol type à échelle réduite. Une pensée amicale pour Jacques Beilin dans ce projet.

Merci aux partenaires extérieurs, auxquels nous avons fait appel pour bénéficier d'une expertise et/ou de moyens techniques sur des expérimentations : L'Avion Jaune, Redbird, Vinci Construction Terrassement et Alexandre Patté, Sintégra et Maxime Rousseau, ainsi que Francesco Nex de l'Université de Twente.

Merci au CFEETK pour m'avoir encouragé et soutenu dans la voie du doctorat.

Merci enfin à ma famille et à mes amis, qui ne tomberont certainement pas sur ces lignes par hasard. Une pensée particulière pour mon papa, parti trop tôt, et à ma compagne Charlie pour m'avoir accompagné le long de cette aventure.

RÉSUMÉ

En embarquant un appareil photo grand public de bonne qualité sur un drone ou un ULM, il est aujourd'hui possible de réaliser de manière 100% automatique des modélisations 3D visuellement « parfaites » ou en tout cas suffisantes tant que ce modèle est utilisé comme support de communication.

Par contre, les performances de ces méthodes sont encore mal maîtrisées dans le contexte où l'on veut utiliser le modèle comme outil de mesure. Les géométries d'acquisition linéaires, propices aux dérives de bandes photogrammétriques, en sont un exemple représentatif. Un phénomène de courbure de bande est alors constaté, nécessitant un travail de mesure terrain conséquent pour être corrigé. Ces imprécisions limitent l'intérêt de telles acquisitions, et sont un défi pour la communauté des photogrammètres, le marché naissant du drone, mais aussi de multiples industriels ayant un intérêt fort pour des systèmes capables d'assurer un suivi de mouvement 3D des sols avec une précision de quelques millimètres (par exemple suivi de digues, érosion agricole, surveillance de réseaux ferrés,...).

Cette thèse est un projet de recherche issu d'un partenariat entre l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), et la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), concessionnaire chargé d'entretenir et surveiller le réseau de digues de retenue du fleuve. Il s'agit - à partir de moyens aériens légers - d'arriver à un système d'auscultation plus rapide, plus économique et offrant une géométrie plus fine que les systèmes topométriques utilisés actuellement.

Nous présentons tout d'abord une étude comparative des moyens aériens légers, montrant l'intérêt et les limitations des drones face aux ULM. Nous proposons des procédures d'acquisition adaptées aux géométries étudiées, permettant de limiter de manière opérationnelle les dérives. Dans un second temps, nous montrons que les phénomènes de courbure sont liés à des modèles d'orientation internes inadaptés, et nous proposons une procédure d'auto-calibration en trois étapes. Nos essais menés sur des chantiers linéaires montrent que le calcul des orientations est sensiblement amélioré (d'écarts métriques à des écarts centimétriques). Dans un troisième temps, nous proposons une optimisation de la compensation sur les points d'appui, permettant de diminuer le nombre de mesures nécessaires. Enfin, nous présentons des méthodes pour contrôler l'incertitude des modèles 3D générés, et à travers une analyse diachronique, des exemples de suivi d'évolution permettant de suivre finement l'évolution de tels ouvrages.

Mots-clefs: drone, ULM, auscultation, modèle 3D, MicMac, vision par ordinateur

ABSTRACT

By embarking a good quality consumer grade camera on an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or on an ultralight system, it is possible to create – fully automatically – 3D models that are visually "perfect", or at least sufficient for visual or communication purposes.

However, the accuracy of these methods is still a concern, especially if the resulting models are to be used as measuring tools. Linear acquisitions – also known as corridor mapping – are a striking example of the uncontrolled error propagation. A bowl effect is often observed, requiring multiple ground measurements to be overcome. These effects restrict the interest of such acquisitions. They are a challenge for the photogrammetrists community, the emerging civil UAV market, as well as many industrials interested in systems able to monitor ground deformations with an accuracy within a few millimeters (railway network surveillance, erosion of agricultural land, embankments monitoring,...).

This thesis is an applied research project, led with a river concessionary which has the responsibility to maintain and keep under surveillance its containment dykes network. The purpose is to use light aerial systems as a mean for a monitoring system which is faster, cheaper, and more detailed than the topometric solutions used so far.

First of all, we present a comparative study to understand, between UAVs and ultralight system, which tool is the most adapted for a specific need. We propose refined acquisition procedures, than can be used to limit operationnaly the drifts. In a second phase, we identify the internal camera model as the weak link, and propose a three steps auto-calibration procedure. Our tests led on linear acquisitions demonstrate that the external orientations accuracy are noticeably improved (from decimetric or even metric disparities, reduced to a few centimeters or less). In a third part, we propose an optimisation of the adjustment on the ground control points, which is a way to limit the amount of ground measurements necessary. Finally, we present methods to control 3D models uncertainty, and through a diachronic analysis, examples of how such data can be used to monitor such structures through time.

Keywords : UAV, ultralight aviation, monitoring, 3D model, MicMac, Computer Vision

SOMMAIRE

<u>Tome 1</u>	1
Chapitre 1 – Introduction	19
1.1 L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière.....	20
1.2 La Compagnie Nationale du Rhône.....	20
1.3 La sûreté et la réglementation.....	20
1.4 Besoins.....	21
1.5 Enjeux.....	22
1.6 Organisation et contribution du document.....	23
Chapitre 2 – Contexte	25
2.1 Procédure actuelle de surveillance des endiguements.....	25
2.2 Aviation et photographie aérienne.....	27
2.2.1 Historique.....	27
2.2.2 L'Ultra-Léger-Motorisé (ULM).....	28
2.2.3 Les drones.....	29
2.3 Méthodes d'auscultation surfaciques par scan laser.....	33
2.3.1 LiDAR terrestre.....	33
2.3.2 LiDAR embarqué.....	33
2.4 La photogrammétrie.....	35
2.4.1 Historique.....	35
2.4.2 La photogrammétrie automatisée.....	36
2.4.3 Présentation de la chaîne de calcul MicMac.....	38
Code C++.....	38
Fichiers XML.....	38
Interfaces en ligne de commande.....	39
Interfaces graphiques individuelles.....	40
Interfaces graphiques globales.....	40
2.5 Conclusion.....	41
Chapitre 3 - Acquisition	43
3.1 Sites et réglementations.....	43
3.1.1 La Pallière.....	44
3.1.2 Rochemaure.....	45
3.1.3 Avignon.....	46

3.2 Appareils photographiques.....	47
3.2.1 Formation d'une image.....	47
3.2.2 Appareils photographiques évalués.....	47
3.2.3 Recommandations.....	49
3.3 Moyens aériens.....	51
3.3.1 Drones à voilure fixe.....	51
Gatewing X100.....	51
Delair Tech DT18.....	53
Retour sur expérience.....	55
3.3.2 Drones à voilure tournante.....	56
Mikrocopter HexaXL.....	56
DroneSys DS6-1200.....	57
Retour sur expérience.....	58
3.3.3 Ultra-Légers-Motorisés (ULM).....	59
Hélicoptère ULM.....	59
ULM multi-axes.....	61
Retour sur expérience.....	62
3.4 Méthodes d'acquisition.....	62
3.4.1 Acquisitions nadir centimétriques.....	63
3.4.2 Acquisitions obliques.....	64
3.4.2 Acquisitions multi-capteurs.....	64
3.5 Conclusion et perspectives.....	65
Chapitre 4 - Estimation des poses.....	67
4.1 Orientation d'une série d'images.....	67
4.1.1 Principe général.....	67
4.1.2 Principe suivi par Apero.....	69
4.2 Méthodes de contrôle des orientations.....	71
4.3 Optimisation de l'ajustement des faisceaux.....	72
4.3.1 Critère de convergence.....	72
4.3.2 Viscosité sur les orientations internes et externes.....	73
4.4 Points homologues.....	73
4.4.1 Estimation.....	73
4.4.2 Résultats.....	75
4.4.3 Simulation.....	76
4.5 Orientation interne.....	78
4.5.1 Modélisation physique.....	78
4.5.2 Évolution des systèmes optiques.....	80
4.5.3 Modèle photogrammétrique standard étendu.....	81
4.5.4 Correction non radiale des dérives résiduelles.....	84
4.5.5 Procédure proposée : synthèse.....	85
4.6 Traitements avec images obliques.....	85
4.7 Camlight – Un prototype de caméra photogrammétrique pour drone.....	88
4.8 Conclusion.....	89

Chapitre 5 - Compensation et mise en correspondance.....	91
5.1 Transformation de Helmert.....	91
5.2 Compensation sur les mesures terrain.....	92
5.3 Optimisation de la compensation.....	93
5.4 Correction par un modèle quadratique.....	95
5.5 Résultats.....	97
5.6 Évaluation de la procédure face aux solutions existantes.....	99
5.7 Mise en correspondance.....	101
5.8 Conclusion.....	103
Chapitre 6 - Évaluation.....	105
6.1 Méthodes de comparaisons.....	105
6.1.1 Comparaison avec un modèle grille :.....	106
6.1.2 Comparaison avec un nuage de points :.....	107
6.1.3 Comparaison avec des modèles maillés :.....	108
6.2 Méthodes d'évaluation.....	108
6.3 Contrôle ponctuel.....	109
6.4 Évaluation avec relevé LiDAR terrestre.....	111
6.5 Contrôle par répétabilité.....	114
6.6 Contrôles surfaciques ponctuels.....	117
6.7 Évaluation de modèles 3d produits à partir de logiciel commerciaux.....	120
6.8 Suivi diachronique.....	122
6.9 Conclusion.....	124
Chapitre 7 - Conclusion générale et perspectives.....	127
<u>Tome 2.....</u>	131
Annexe 1 - Introduction à la programmation C++ avec la bibliothèque Elise	135
Organisation des dossiers, des fichiers, conventions.....	135
Créer un commande mm3d.....	135
Créer un programme avec arguments mandataires et optionnels.....	137
Charger un fichier XML et lire ses informations.....	138
Lister les fichiers dans un dossier, séparer le répertoire du nom des images.....	140
Annexe 2 - Workflow type adapté aux ouvrages linéaires.....	143
Calcul des points homologues multi-échelles.....	143
Calcul des orientations internes et externes en 3 étapes.....	143
Compensation sur les points d'appui.....	143

Contrôle des orientations.....	144
Sélection de la zone d'intérêt sur un tableau d'assemblage.....	144
Calcul de corrélation dense, orthophotographie et nuage de points coloré.....	145
Annexe 3 - Reproduction d'une acquisition type avec connaissance des orientations externes.....	147
But et intérêt de l'opération.....	148
Matériel.....	148
Procédure.....	148
Prise de vue.....	149
Résultats.....	149
Annexe 4 - Rapport de mission : Palliere-2013.....	151
Choix du type de porteur.....	151
Choix des repères à implanter.....	152
Mission topographique.....	152
Matériel photographique.....	153
Mission aérienne.....	154
Premiers résultats.....	155
Résultats de la similitude spatiale sur les points d'appui.....	155
Comparaison entre le MNT et le nivellement.....	157
Points utilisés pour le calcul.....	157
Points non utilisés lors du calcul.....	158
Annexe 5 - Rapport de mission : Rochemaure-2013.....	159
Partenariat IGN/CNR.....	159
Choix des repères à implanter.....	160
Déroulement de la mission.....	160
Mission topographique.....	160
Matériel photographique.....	162
Mission aérienne.....	163
Premiers traitements.....	163
Comparaison Cloud to Cloud.....	165
Entre les deux relevés Lidar :.....	165
Entre le Lidar terrestre et la photogrammétrie :.....	166
Comparaison Grid to Grid.....	168
Entre les deux relevés Lidar :.....	168
Entre le Lidar terrestre et la photogrammétrie.....	171
Réduction du nombre de points d'appui.....	172
Synthèse.....	175
Annexe 6 - Rapport de mission : Rochemaure-2014 ; Avignon-S1-S2-S4.....	177
Avant-propos.....	177
Acquisitions en scénario S1.....	178
La Pallière PK133.4.....	179

Avignon-S1.....	180
Rochemaure-2014.....	180
Acquisitions en scénario S2.....	182
Acquisitions en scénario S4.....	183
Récapitulatif et retour d'expérience sur les équipements.....	184
Description des outils de la suite MicMac.....	184
Tapioca.....	184
Tapas.....	185
GCPBascule.....	185
Campari.....	185
Tarama.....	185
Malt.....	185
Nouvelle procédure de calcul d'aérottriangulation.....	186
Configuration de Campari.....	187
Traitements de La Pallière PK133.4.....	187
Suivi d'évolution ponctuel :.....	189
Rochemaure-2014.....	190
Adaptation sur 6 points d'appui :.....	191
Génération du MNS et interpolation sur les points de contrôle :.....	191
Suivi d'évolution ponctuel :.....	191
Avignon-S1.....	193
Adaptation sur les GCP :.....	193
Interpolation du MNT :.....	194
Avignon-S2.....	195
Adaptation sur 6 GCP :.....	196
Génération d'un MNS et interpolation sur les points de contrôle :.....	196
Avignon-S4.....	197
Résultats : synthèse.....	197
Conclusion.....	198
Annexe 7 - Rapport de mission : Palliere-2014.....	199
Introduction.....	199
Emprise du relevé.....	200
Déroulement chronologique.....	200
Repères topographiques.....	202
Zones de contrôle.....	202
Images acquises.....	203
Traitement des données.....	205
Jeu de données #1 : calcul d'aérottriangulation.....	205
Jeu de données #2 : calcul d'aérottriangulation.....	206
Calcul des MNT de contrôle : photogrammétrie terrestre.....	207
Précision des modèles 3D générés.....	208
Réduction du volume de données.....	210
Conclusion.....	212
Annexe 8 - Rapport de mission : Palliere-2015.....	213
Introduction.....	213

Déroulement de la mission.....	213
Mission topographique.....	214
Zones de contrôle terrestres.....	215
Acquisitions Palliere-2015a et Paliere-2015b.....	216
Acquisition Palliere-2015c.....	218
Acquisition Palliere-2015-ULM.....	219
Calcul des orientations.....	220
Évaluation des modèles 3D.....	222
Liste des Figures.....	225
Liste des Tables.....	233
Liste des Illustrations.....	235
Bibliographie.....	241

CHAPITRE 1

1 – INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans un contexte technologique en fort développement. Les travaux de miniaturisation électronique, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, l'émergence d'algorithmes de reconnaissance d'image ainsi qu'un contexte législatif favorable ont ouvert le champ à des applications disruptives vis-à-vis des méthodes topométriques actuelles.

Le domaine aéronautique produit des avions de plus en plus légers et autonomes. De nouveaux types d'ULM ont fait leur apparition, mais le dynamisme de la filière est principalement caractérisé par l'émergence des drones civils.

La communauté des photogrammètres a pu bénéficier d'un croisement de compétences avec celle de la vision par ordinateur. Un haut degré d'automatisation en découle, certains logiciels permettant d'effectuer en un seul clic ce qui nécessitait auparavant l'expérience d'un opérateur aguerri et de matériels pointus.

En embarquant une caméra grand public sur un vecteur aérien, il est ainsi désormais possible d'effectuer une prise de vue multi-stéréoscopique, et de transformer les images résultantes en un modèle 3D sans défaut visuel. Le défi consiste désormais à réaliser une reconstruction automatisée dont les défauts géométriques seront minimes, afin de pouvoir utiliser le modèle 3D comme un outil de mesure.

Cette thèse, issue d'un partenariat entre l'Institut de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) vise à appliquer ces nouveaux outils et méthodes au suivi métrologique de digues. Ces géométries d'acquisition étant propices aux dérives altimétriques, nous proposons à travers cette étude des méthodes pour mesurer précisément des ouvrages linéaires en limitant les points au sol.

1.1 L'INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE

« L'Institut de l'Information Géographique et Forestière a pour vocation de décrire, d'un point de vue géométrique et physique, la surface du territoire national et l'occupation de son sol, d'élaborer et de mettre à jour l'inventaire permanent des ressources forestières. » (Source : <http://www.ign.fr>)

Successeur du Service Géographique des Armées depuis 1940, l'institut est rattaché depuis 2012 à l'Inventaire Forestier National. Regroupant près de 1600 collaborateurs, il assure des missions aussi diverses que l'éducation, la recherche, la production de données géographiques,...

Cette étude a vu le jour grâce à l'implication de la Direction de la recherche et de l'enseignement, au sein de laquelle l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) et le Laboratoire d'Opto-Électronique et de Métrologie Instrumentale (LOEMI) sont regroupés.

1.2 LA COMPAGNIE NATIONALE DU RHÔNE

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est le deuxième producteur français d'électricité et le premier producteur français d'électricité exclusivement renouvelable. Concessionnaire du Rhône, la CNR gère la navigation sur le fleuve et agit quotidiennement pour assurer son entretien et la sécurité des équipements. En particulier, la CNR dispose d'un patrimoine composé de 50 barrages, écluses, usines hydroélectriques et 400 km de digues.

Comptant près de 1400 collaborateurs, le Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques (CACOH) en regroupe 45 dont une vingtaine d'ingénieurs de spécialités diverses : hydrologie, topographie, génie civil,... À travers des essais et simulation, le CACOH étudie les phénomènes pouvant influencer sur l'évolution des ouvrages hydrauliques.

1.3 LA SÛRETÉ ET LA RÉGLEMENTATION

Construites et gérées par la CNR, les digues des aménagements du Rhône représentent près de 400 kilomètres de linéaire entre la Suisse et la ville d'Arles avant le delta du Rhône. Établies entre 1950 et 1986 avec les matériaux en place et perméables, ces ouvrages vieillissent et se doivent d'être surveillés de plus en plus finement.

En tant qu'ouvrage de retenue d'eau, les digues sont soumis à la réglementation sur la sûreté des barrages. Les décrets n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 et n° 2015-526 du 12 mai 2015 fixent et précisent les règles de surveillance en

complément du code de l'environnement. Les textes distinguent plusieurs classes d'ouvrages ainsi que des procédures de surveillance et d'auscultation à mener afin de garantir leur bon état (Table 1).

	Barrage			Digue		
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C
Rapport de surveillance	1 an	3 ans	5 ans	3 ans	5 ans	6 ans
Rapport d'auscultation	2 ans	5 ans	5 ans	Sans objet		

Table 1: Périodicité des mesures de sécurité sur les ouvrages hydrauliques. Source : Décret n° 2015-526

1.4 BESOINS

Dans l'optique d'améliorer le suivi de ses digues, la CNR et l'IGN se sont rapprochés pour développer les acquisitions permettant une définition géométrique continue de l'ouvrage. Des acquisitions au LiDAR terrestre ou aérien ont déjà été réalisées sur quelques zones réduites. Cependant l'utilisation de ce type de technologie reste coûteuse (intérêt limité aux linéaires très faibles), fastidieuse (stations multiples, temps d'acquisition important) et de précision peu satisfaisante (infra décimétriques).

L'érosion interne, première cause de rupture de digues¹, est au cœur du projet ERINOH (ÉROsion INterne des Ouvrages Hydrauliques) débuté en 2006 et auquel 75 organismes collaborent. Les essais effectués sur modèle physique au sein du CACOH [Beguïn 2011] ont montré que certains phénomènes d'érosion interne engendrent une déformation de la surface (Figure 1). Selon cette étude, des tassements de faible ampleur (quelques centimètres) peuvent être le signe précurseur d'un désordre dans le corps de la structure. La détection de ces changements est donc un levier pour limiter le risque de défaillance et améliorer le suivi des digues.

En outre, la vaste concession est sujette aux phénomènes naturels (séisme, crue, tempête,...) ou humains (incident de navigation,...). La CNR recherche donc un moyen lui permettant d'établir rapidement un état des lieux, et spécifiquement lorsque la digue est inaccessible depuis le sol. Le drone comme porteur offre trois avantages majeurs : il peut être déployé rapidement, à moindre coût, et évoluer à basse altitude. Son utilisation en cas de situation de crise est alors relativement intéressante, mais reste – en raison de leur faible résistance aux vents – astreinte à des conditions météorologiques favorables. Plus résistants, les ULM peuvent être envisagés comme vecteurs alternatifs.

¹ À ce jour, la CNR n'a jamais été confrontée à un tel incident

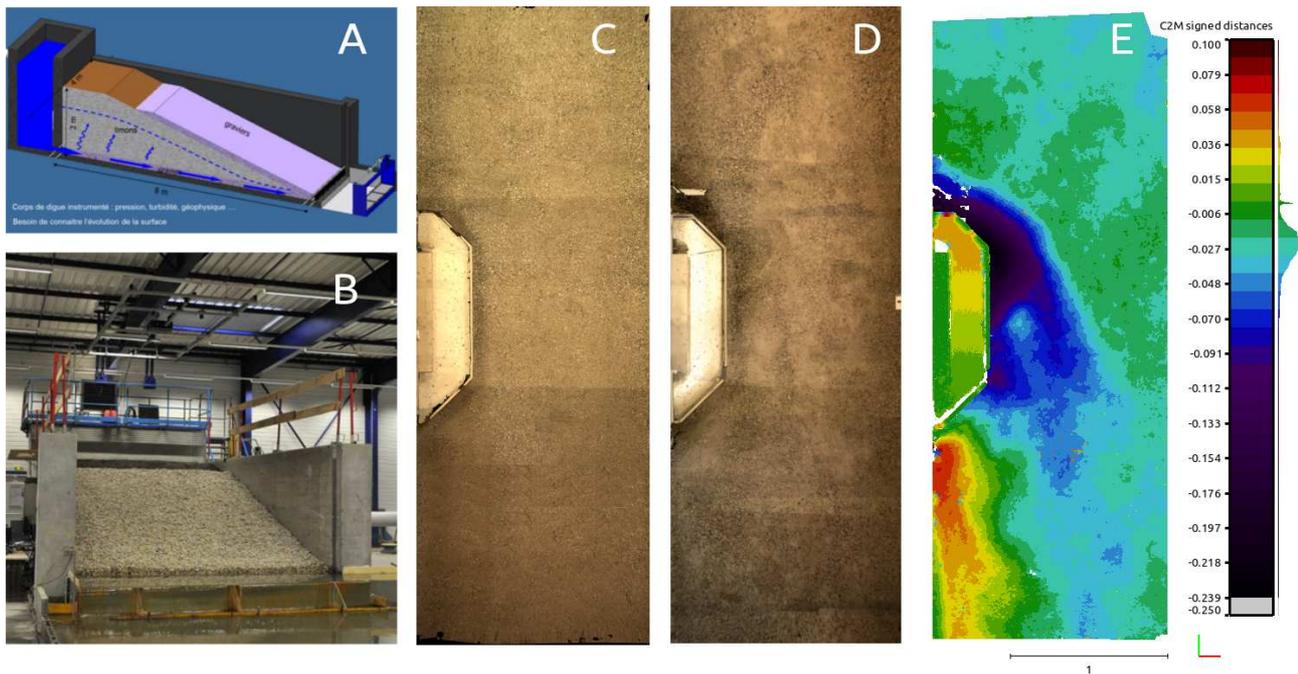


Figure 1: Modèle physique (A et B) dans lequel une érosion interne a été simulée ; orthophotographies réalisées avant (C) et après (D) essai. La comparaison des modèles 3D (E) montre l'évolution de la surface de l'ouvrage suite à la perturbation interne.

Source : rapport interne CNR

Le résultat final recherché est un modèle numérique de terrain (MNT), sous forme de nuage de points. Dans le cas d'ouvrages nécessitant une surveillance régulière, la précision recherchée sur les altitudes est le centimètre. Dans le cas d'une intervention à la suite d'un événement exceptionnel, le besoin de précision est moindre, se limitant à 3cm.

Type d'acquisition	Fréquence	Linéaire	Incertitude maximale tolérée	Précision cible	Besoin
Récurrente	1 fois / an	Jusqu'à 1000 mètres	± 2.5 cm	± 1 cm	Détection de déformations dans le cadre du suivi d'une zone sensible bien définie.
Exceptionnelle	Situation de crise	Quelques kilomètres	± 5 cm	± 3 cm	Comparaison à un état initial pour la réalisation d'un état des lieux à la suite d'un événement exceptionnel.

Table 2: Besoins identifiés par la CNR pour améliorer le suivi de ses ouvrages

1.5 ENJEUX

Le dictionnaire du SANDRE (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau) définit une digue comme « un ouvrage continu longitudinal par rapport au sens de l'écoulement de l'eau, généralement de grande longueur, surélevé par rapport au terrain naturel et destiné à s'opposer au passage de l'eau ou à la canaliser ».

En France, près de 10 000 kilomètres de digues protègent le territoire, et selon les estimations, entre 500 et 4000 kilomètres seraient en mauvais état. Ces ouvrages sont parfois gérés de manière archaïque par près de 1000 gestionnaires de tailles diverses, qui n'ont pas forcément les compétences pour assurer la sécurité de leurs équipements, et qui parfois même ne connaissent pas leur responsabilité définie par l'article 33 de la loi du 16 septembre 1807.

La tempête Xynthia de 2010 a mis en lumière un certain nombre de défaillances dans la gestion de ces ouvrages. Suite au désastre, 195 kilomètres de digues ont été endommagés, certains points ayant subi une rupture. Responsable de la mort de 47 personnes et en ayant blessé plus de 200, le *plan digue*, a été lancé en 2010 pour tirer des leçons de ce drame et éviter qu'il ne se reproduise.

Population	Tours	Orléans	Authion
Dans la zone protégée	135000	63000	62000
Dans la zone inondable	120000	60000	52000
En danger en cas de rupture	14000	11000	6000

Figure 2: Estimation des conséquences d'une rupture de digues sur les populations urbaines. Source : Projet Didro

Le projet « Didro », constitué par des industriels, des laboratoires de recherche et un opérateur de drones civils a été lancé en 2014. Sélectionné mi-2015 par le Fond Unique Interministériel, il vise à développer une solution commerciale de reconnaissance, de surveillance et d'auscultation des digues par drone. Il souligne la volonté des acteurs publics de s'impliquer pour la sécurité de ces ouvrages, et reconnaît ainsi l'intérêt du drone et de ses mesures pour la sécurité des populations (Figure 2).

1.6 ORGANISATION ET CONTRIBUTION DU DOCUMENT

À travers cette étude, nous proposons un cadre permettant d'organiser une modélisation 3D de précision centimétrique d'ouvrages linéaires, en minimisant le nombre de points d'appui à une mesure par tranche de 100 mètres linéaires. Dans une série d'expérimentations, nous évaluons l'intérêt de quatre drones dans trois scénarios de vol : deux voilures tournantes (scénario S1) et deux voilures fixes (scénario S2 et S4) ; ainsi que deux acquisitions par ULM (hélicoptère et multi-axes). Dotés de petites caméras, de masse comprises entre 50 et 500 grammes, nous étudions la capacité de plusieurs modèles à répondre aux besoins identifiés par la CNR.

Après un rappel au [Chapitre 2](#) du contexte technologique et réglementaire dans lequel cette étude se place, nous présentons les acquisitions menées dans le [Chapitre 3](#), les avantages et limitations associés à ces vecteurs ainsi que des

recommandations afin d'améliorer les acquisitions et de choisir le vecteur approprié à un besoin identifié. Le [Chapitre 4](#) décrit la problématique rencontrée lors de l'estimation des poses sur des chantiers linéaires, et propose des méthodes de correction. Le [Chapitre 5](#) s'attache à compenser de manière optimale les dérives résiduelles sur les mesures terrain, et décrit la procédure suivie pour générer les modèles numériques de terrain. Le [Chapitre 6](#) détaille les méthodes utilisées pour contrôler la précision de ces modèles et présente l'intérêt de ces données pour un suivi diachronique des ouvrages hydrauliques.

CHAPITRE 2

2 – CONTEXTE

La surveillance des endiguements, réglementée en France depuis 1807, est en fait une technique millénaire qui a notamment permis aux Égyptiens de maîtriser l'irrigation [Bonneau 1993]. Les techniques ont beaucoup évolué depuis, et nous présentons dans ce chapitre une description détaillée des méthodes et instruments actuellement employés pour suivre l'évolution de ces ouvrages.

Nous exposons ici l'intérêt des méthodes d'auscultation surfaciques face au suivi ponctuel des ouvrages, habituellement réalisé par nivellement de précision. Nous présentons l'intérêt et l'évolution des moyens aériens et leur cadre législatif. Enfin, nous présenterons l'utilisation de LiDAR et de la photogrammétrie pour répondre aux objectifs visés.

2.1 PROCÉDURE ACTUELLE DE SURVEILLANCE DES ENDIGUEMENTS

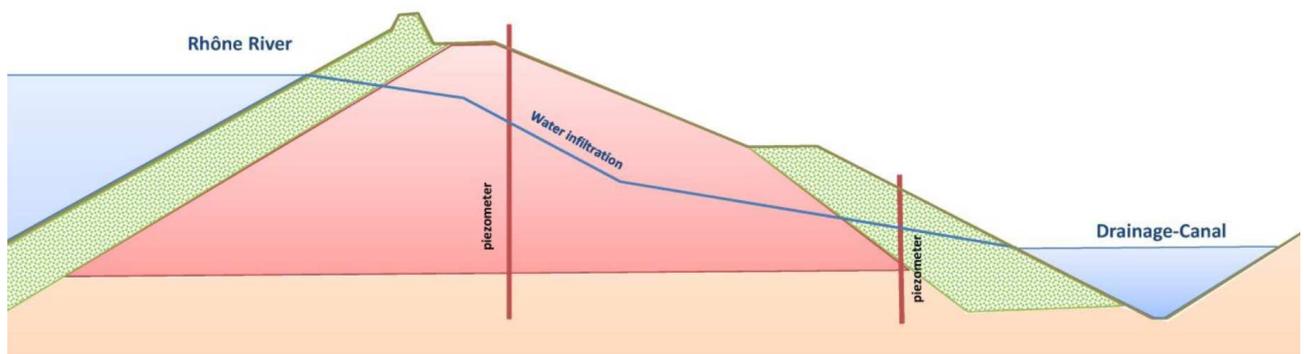


Figure 3: Coupe transversale d'un endiguement CNR équipé de deux piézomètres. Les mesures permettent d'estimer le niveau d'eau à l'intérieur de l'ouvrage, et ainsi de détecter d'éventuels dysfonctionnements (charge hydraulique importante). Source : rapport interne CNR

La surveillance des ouvrages endigués se déroule aujourd'hui selon 3 axes:

- surveillance visuelle : des techniciens parcourent régulièrement la concession, à la recherche de défauts visuels tels que des fuites, des affaissements notoires ou tout signe précurseur.
- suivi et mesure de la charge hydraulique interne : sur l'ensemble du linéaire

des endiguements CNR, des piézomètres sont installés sur des profils transversaux tous les 300 à 500 mètres (Figure 3).

- auscultation altimétrique sur zones ponctuelles : en complément des mesures piézométriques, un réseau de références altimétriques est installé le long de l'ouvrage et régulièrement ausculté par nivellement direct.

En parallèle, sur des zones spécifiques et réduites, la CNR est amenée à mettre en œuvre des reconnaissances géotechniques et géophysiques afin de connaître la structure interne de l'ouvrage.

La surveillance visuelle est efficace pour détecter des défauts ayant déjà endommagé la structure ; il s'agit du premier niveau de détection.

Les mesures piézométriques permettent de surveiller le rabattement hydraulique entre le Rhône et un contre-canal. Elles peuvent ainsi indiquer le niveau d'eau dans le corps de la digue, et prévenir des défauts internes aux emplacements où ils sont installés.

La surveillance altimétrique permet de suivre l'évolution d'un ouvrage selon un profil (en long), avec une précision très fine sur les points mesurés (de l'ordre du millimètre). En comparant des profils relevés à des époques différentes, on peut constater sur certaines zones identifiées un tassement qui se ralentit au cours du temps. Un accroissement de la vitesse de tassement est ainsi un élément alarmant.

Ces tassements peuvent être observés de manière générale (comparaison d'un tassement moyen sur l'ensemble de la digue) ou ponctuelle (observation de l'évolution altimétrique de chaque repère). Appliqué à des ouvrages monolithiques, cette méthode permet de suivre rigoureusement leur évolution.

Cependant, les digues sont généralement constituées de matériaux fins et divers (Figure 4). Une déformation mesurée en deux points espacés de 50 mètres ne permet pas de détecter un éventuel désordre survenant entre ces repères, mais uniquement dans leur environnement direct.

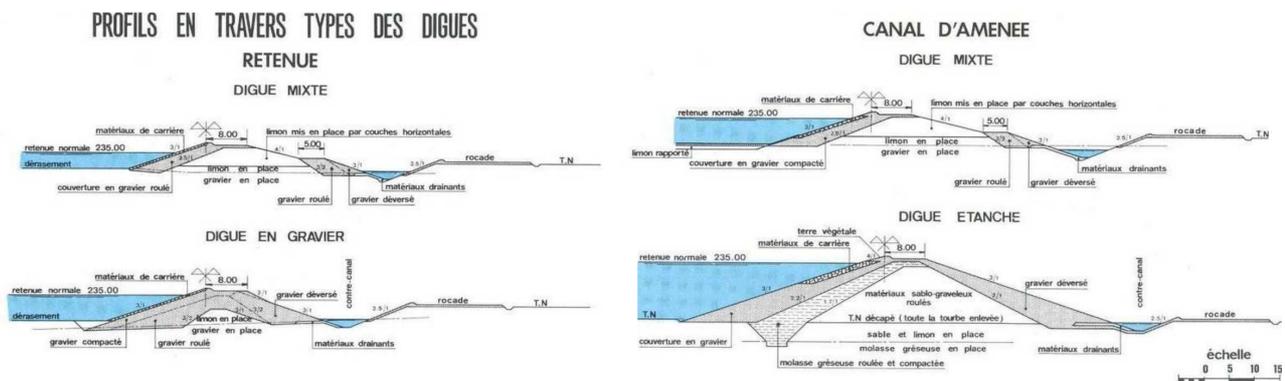


Figure 4: Profils types des aménagements sur le site de La Pallière (01). Source : rapport interne CNR

Ces systèmes ont été mis en place depuis des décennies. Ils ont permis la détection de nombreux désordres et leur intérêt a été démontré par plusieurs études [DiBiagio et Myrvoll 1986 ; Simm et al. 2012]. En complément de ces outils, la CNR souhaite profiter des derniers développements technologiques afin de garantir un contrôle optimal de ses ouvrages en les auscultant dans leur globalité, par le biais de modèles topographiques surfaciques.

2.2 AVIATION ET PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE

2.2.1 HISTORIQUE

Les photogrammètres ont toujours eu un intérêt vif pour les prises de vue aériennes. Offrant un point de vue isométrique propice à la reconstruction tridimensionnelle, l'acquisition d'images aéroportées a révolutionné l'urbanisme, la cartographie, la défense, et de nombreuses autres activités. La première image aérienne a été acquise en 1858 (Figure 5), grâce à l'ingéniosité de Gaspard-Félix Tournachon [Eisenbeiss 2009]. À partir d'une montgolfière, le photographe parvint à s'élever à une hauteur de 80 mètres pour obtenir une image oblique de Paris.

D'autres pionniers ont utilisé des cerfs-volants dès les années 1882 [Colomina et Molina 2014]. Nécessitant la mise au point de dispositifs afin de déclencher automatiquement la prise de vue, plusieurs cerfs-volants étaient attachés pour créer la portance nécessaire à l'élévation des lourdes caméras.

En 1897, Alfred Nobel conçut la première fusée équipée d'une caméra. Avec un rayon d'action de quelques kilomètres, la caméra pouvait atteindre quelques centaines de mètres d'altitude, et dès 1903 effectuer des prises de vue gyro-stabilisées. Les principaux inconvénients étant l'imprécision des trajectoires et les difficultés liées à la récupération des clichés (éjection de la caméra et redescente en parachute).

En parallèle de ces essais, Julius Neubranner travaillait sur la confection d'appareils photographiques miniatures [Verhoeven 2009]. Harnachés au corps de pigeons, ils ont pu immortaliser avec peu de moyens une vision inédite du voyage des volatiles. Leur trajectoire étant jugée trop aléatoire, le système fut abandonné, mais les travaux d'allégement et de miniaturisation furent cruciaux, et demeurent aujourd'hui encore un défi.

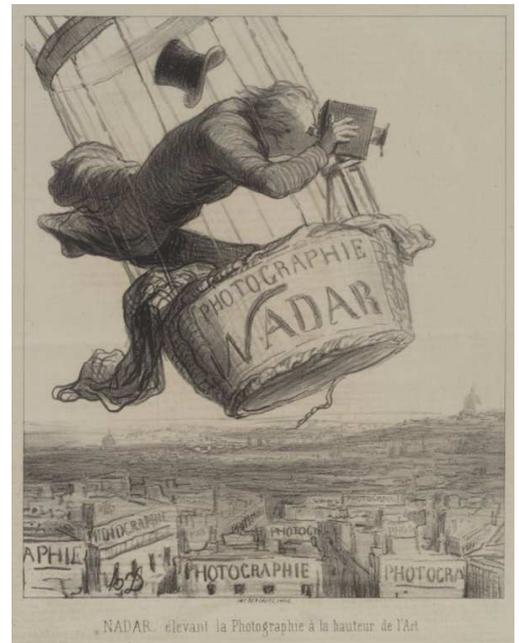


Figure 5: Lithographie d'Honoré Daumier (journal *Le Boulevard*, 1863) illustrant la première prise de vue aérienne

Ces systèmes, bien que novateurs et ouvrant de nouveaux champs d'études, ont été marginalisés par les progrès de l'aviation. En 1909, Wilbur Wright pris la première photographie depuis un avion. La technologie connut un fort développement pour son utilisation militaire en 1914-1918, permettant d'améliorer les fonctionnalités des appareils photographiques.

L'imagerie spatiale émergea après la seconde guerre mondiale. La preuve de concept fut amenée dès 1946 par la reconversion des fusées militaires V-2 en outils de prise de vue stratosphérique. Des satellites orbitaux sont ensuite venus compléter le système, et répondent désormais à des besoins de plus en plus spécifiques.

Il existe aujourd'hui une forte variété de vecteurs utilisables pour obtenir un cliché depuis les airs. Les ouvrages de la CNR étant de longueur relativement restreinte, les moyens aériens légers tels que les drones et ULM permettent une optimisation des coûts, et offrent une qualité d'image supérieure au moyens lourds dans un certain nombre de scénarios (vols à basse altitude, par temps nuageux,...).

2.2.2 L'ULTRA-LÉGER-MOTORISÉ (ULM)

La définition d'un ULM n'est pas une constante internationale. En France, on caractérise ainsi un aéronef permettant d'embarquer un à deux passagers, et dont la masse au décollage n'excède pas 300 kg, et 450 kg dans le cas d'un bi-place.

L'activité est réglementée par le code de l'aviation civile (articles R.133-1, R.133-1-2, R.133-3), les arrêtés du 24 juillet 1991 et du 23 septembre 1998 modifié, l'instruction du 21 février 2012, le

règlement (CE) n° 216/2008 du Parlement européen et son annexe II. Deux arrêtés du 7 janvier 2015 précisent les règles d'insertion des ULM étrangers.

Les ULM sont limités aux vols à vue, c'est à dire durant le jour aéronautique, avec la vue du sol, en dehors des nuages et sous certaines conditions de visibilité horizontale minimale. À la différence des porteurs lourds, ils peuvent décoller et atterrir en dehors des aérodromes (il faut l'accord du propriétaire du terrain, et en avertir le maire de la commune). Une digue peut donc être le point de décollage et d'atterrissage ; les engins remorquables sont donc une solution intéressante pour intervenir en cas d'urgence.

En dehors des zones d'obstacle (artificiel ou naturel), la hauteur de vol doit être comprise entre 500 pieds (~150m) et 19500 pieds (~5950m). Les vols rasants - à moins de 150m d'altitude - ne sont pas autorisés, mais restent possibles via



Figure 6: La baignoire volante, considéré comme le premier ULM, développé par Dormoy en 1924

l'obtention de dérogations.

Les textes distinguent six classes d'ULM (Figure 7). Dans le cadre de nos recherches, nous nous sommes intéressé à l'ULM comme un moyen complémentaire au drone. À cet effet, nous avons pu effectuer une première acquisition avec un ULM trois axes, et une seconde avec un hélicoptère ultra-léger.



Figure 7: Les six classes d'ULM présentent des matériels aux caractéristiques variées.

La nécessité d'évoluer au dessus de 150 mètres (hors dérogation, difficile à obtenir dans des délais raisonnables en situation d'urgence) contraint à utiliser des objectifs à longue focale pour obtenir des images de résolution centimétrique. Cependant, le calcul d'orientation externe est réputé plus complexe [Stamatopoulos et Fraser 2011] et on peut s'attendre à des résultats imprécis, ou à devoir utiliser de nombreuses mesures terrain.

2.2.3 LES DRONES

D'abord conçus à des fins militaires, l'ascension fulgurante des drones civils est un sujet d'actualité brûlant depuis quelques années (Figure 8). On peut aujourd'hui considérer le marché dominé par trois acteurs que sont DJI, 3DR et Parrot. Les initiatives de multinationales telles Google et Facebook (connexion internet mondiale), Amazon et DHL (livraison), Intel et Qualcomm (composants électroniques), Sony (usages professionnels),... vont probablement contribuer à consolider cette filière naissante et permettre des usages de plus en plus nombreux et spécifiques.

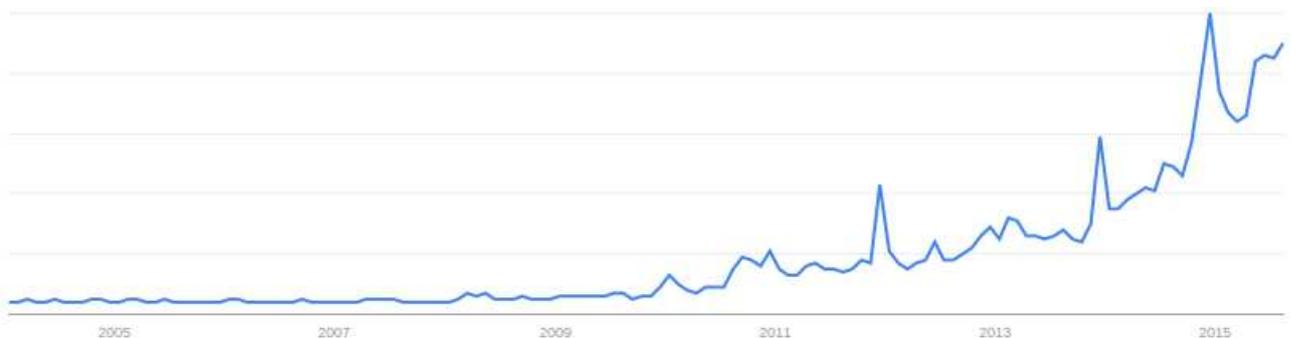


Figure 8: Tendances de recherche du terme "drone" sur le moteur de recherche Google.

Source : <https://www.google.com/trends/explore#q=drone>

Bien que l'on puisse considérer tout système aérien autonome piloté à distance comme un drone, deux types (Figure 9) se distinguent par leurs usages et l'intérêt

qu'ils offrent pour notre étude :

- les drones à voilure fixe, principalement de type planeur ou aile volante, ils sont constitués par une voilure fixe dont les manchons sont actionnés par des servo-moteurs pour contrôler la trajectoire ;
- les drones à voilure tournante, de type hélicoptère aux origines de l'aéromodélisme, ils sont désormais supplantés par les multirotors, plus stables et au pilotage plus intuitif.



Figure 9: Montage illustrant un drone Parrot eBee à voilure fixe (à gauche), et un drone Dji Inspire à voilure tournante (à droite)

En France, l'utilisation de drones est encadrée par deux arrêtés ministériels du 11 avril 2012 :

- un premier concerne leur intégration dans l'espace aérien :
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025834986> (dernier accès le 25/09/2015)
- un second est relatif à leur conception, aux conditions de leur emploi et aux capacités requises par les personnes qui les utilisent :
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025834953> (dernier accès le 25/09/2015)

Ces règles viennent compléter les lois encadrant la navigation aérienne générale, énoncées dans le Code des Transports (articles L. 6200-1 et suivants) et le Code de l'Aviation Civile (articles R. 133-1-2 et D. 131-10 et suivants).

La législation distingue sept catégories d'équipements (**Figure 10**), différenciant les aéromodèles (catégories A et B) et les aéronefs captifs (catégorie C) des drones (catégories D à G) par la présence d'un auto-pilote. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux drones de catégorie D (masse au décollage inférieure à 2 kg) et E (moins de 25 kg), permettant d'embarquer des caméras grand public et pouvant évoluer hors vue.

Les aéromodèles télépilotés (par un humain) nécessitent un degré d'expertise supérieur. Le pilotage automatique serait en outre plus performant pour suivre un

plan de vol strict [Neininger et Hacker 2011].



Figure 10: Illustration des différentes catégories de drone.
Source : société Vision du ciel

Les textes ont prévu quatre scénarios de vol (Figure 12). De complexité d'homologation et d'utilisation croissante, un opérateur peut demander son enregistrement à la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) pour un ou plusieurs d'entre eux. Le type de drone ainsi que les équipements de sécurité qu'il embarque, au même titre que le degré de qualification du télépilote, sont des éléments limitant leur utilisation dans les scénarios les plus complexes.

En complément de cet enregistrement, des autorisations administratives (mairies, préfectures,...) ponctuelles peuvent être nécessaires lors d'opérations particulières (vols proches d'un aéroport, d'une centrale nucléaire,... cf Figure 11).

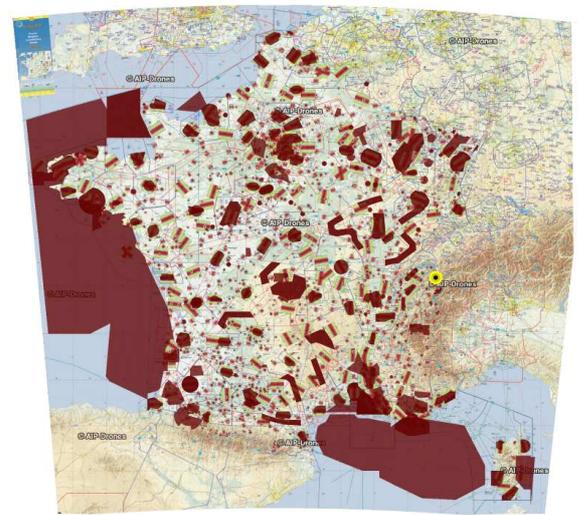


Figure 11: Espaces aériens (en rouge) où la navigation de drones est restreinte. Source : AIP-Drones

Mis à part le scénario dit S3, relatif aux vols en zone agglomérée, nous avons pu au cours de cette étude évaluer le potentiel applicatif des trois autres scénarios. Du point de vue de la CNR, chaque scénario présente un intérêt spécifique :

- le scénario S1, pour lequel 99 % des 1500 opérateurs identifiés par la DGAC ont obtenu l'agrément, offre un intérêt pour l'étude de petites zones. Plusieurs vols peuvent être combinés pour étendre une étude ;
- le scénario S2, dans lequel s'insèrent de multiples drones à voilure fixes, permet de relever des linéaires plus importants (jusqu'à 2000 mètres par vol) ;
- le scénario S4, conçu pour permettre la navigation de drones sans limite de distance, présente un intérêt marqué pour les linéaires de plusieurs kilomètres, et une réponse aux situations d'urgence pour lesquelles de multiples petites zones peuvent être touchées sur un grand linéaire.

S1	25 KG Masse max	↑ 150 m Altitude max	↔ 100 m Distance horizontale max	👁️ En vue directe du télépilote	🌲 Hors zone peuplée
S2	25 KG Masse max	↑ 50 m Altitude max	↔ 1000 m Distance horizontale max	👁️ FPV autorisé	🌲 Hors zone peuplée
S3	4 KG Masse max	↑ 150 m Altitude max	↔ 100 m Distance horizontale max	👁️ En vue directe du télépilote	🏙️ En agglomération
S4	2 KG Masse max	↑ 150 m Altitude max	↔ ∞ Distance horizontale max	👁️ FPV autorisé	🌲 Hors zone peuplée

Figure 12: Scénarios encadrant l'utilisation de drones civils à des fins professionnelles. Schéma source : <http://my-drone-service.com/reglementation/>

Ces règles mises en place mi-2012 ont permis l'émergence d'une nouvelle activité industrielle. D'une niche recensant une centaine d'opérateurs fin 2012, la profession est aujourd'hui représentée par près de 2000 opérateurs, dont certains sont regroupés à travers la Fédération Professionnelle du Drone Civil (FPDC).

La plupart des pays développés ont aujourd'hui mis en place leur propre législation ou sont encore en phase d'étude [van Blyenburgh 2013]. Des similarités existent entre les diverses réglementations, mais un travail d'uniformisation au sein de l'espace Européen est en cours. Il permettra alors de faire évoluer les règles pour accompagner les besoins industriels émergents au gré des développements technologiques assurant la sécurité du public.

Selon Rodolphe Jobard, référent Île-de-France à la FPDC, et Francis Pichard, consultant drone et travaux-publics, la réglementation – qui devait évoluer de manière bi-annuelle – devrait être mise à jour très prochainement (début 2016). Élaborée en concertation avec les opérateurs de drones, on peut s'attendre à un doublement des distances pour les scénarios S1 à S3. Ce dernier scénario verrait aussi doubler les limites de poids.

On constate donc un fort dynamisme du secteur aéronautique, menant à la mise sur le marché d'équipements qui n'entrent pas forcément dans les cases réglementaires. La France a été très réactive en mettant en place une législation adaptée à l'ouverture d'une activité commerciale. Amenée à évoluer en fonction de la sécurisation croissante des vecteurs, elle devrait permettre à terme d'emporter des équipements de plus en plus lourds afin de répondre à des besoins spécifiques.

2.3 MÉTHODES D'AUSCULTATION SURFACIQUES PAR SCAN LASER

Selon [Beguin 2011], la probabilité de détecter un défaut dans un ouvrage non monolithique tel qu'une digue est directement lié à la densité et à la répartition des points mesurés sur l'ouvrage. Les méthodes dites d'auscultation superficielles répondent à ce besoin en proposant d'utiliser des techniques et/ou matériels permettant une modélisation très fine d'une structure à partir d'une très grande densité de points.

2.3.1 LIDAR TERRESTRE

[Pirotti et al. 2013] rappellent l'état de l'art des systèmes LiDAR. Ces systèmes peuvent aujourd'hui mesurer plusieurs millions de points par seconde, avec une précision relative millimétrique. La technologie est considérée comme prometteuse, et déjà utilisée pour de nombreuses applications. Sa capacité à traverser la végétation (utilisation de LiDAR multi-écho, Figure 13) présente un intérêt particulier pour le suivi d'ouvrages naturels.

Adapté à l'auscultation de zones ponctuelles, l'outil peut être utilisé pour suivre la déformation d'une structure. Néanmoins, les géométries d'acquisition longues de plusieurs centaines de mètres vont contraindre un opérateur à effectuer de nombreuses stations, dont les scans devront être assemblés dans un même modèle, ce qui réduit la précision générale, de l'ordre de quelques centimètres selon [Robin 2013].

Selon cette étude, une brigade de deux personnes peut relever environ 200 mètres linéaires par jour, ce qui est trop élevé pour répondre à une intervention d'urgence sur un long linéaire, et d'autant plus si le sol est inaccessible.

2.3.2 LIDAR EMBARQUÉ

De par l'investissement croissant en temps humain qu'il requiert, le LiDAR terrestre est limité au relevé d'ouvrages relativement restreints (quelques centaines de mètres au plus). En couplant cet équipement à une centrale inertielle et un système de positionnement par satellite (récepteur GNSS), il est possible d'organiser le scan mobile d'un ouvrage. La technique a particulièrement été utilisée par les opérateurs de cartographie en embarquant un tel système sur divers vecteurs :



Figure 13: Riegl LMS-Z620 utilisé par la société 3D Scan Map pour le relevé terrestre de la digue de Rochemaure

- sur un véhicule terrestre : cas du véhicule Stereopolis [Paparoditis et al. 2012] embarquant de multiples capteurs, dont l'intérêt est marqué pour la cartographie et la numérisation d'environnement urbains. Il ne répond pas à l'objectif d'opérabilité en cas de terrain dégradé ;
- sur des avions/hélicoptères : pour établir des modélisations 3D à l'échelle de bassins versants, avec une précision décimétrique [Vincent et al. 2012].

Les LiDAR multi-échos embarqués sur avion présentent l'avantage de pouvoir mesurer le sol à travers une couche de végétation. Le coût d'un tel relevé n'est toutefois pas adaptés au suivi régulier de petits linéaires. Par ailleurs, la dispersion des résultats (de l'ordre du décimètre) est trop importante pour détecter des mouvements de sol limités.

En travaillant sur l'allègement de leurs matériels, les constructeurs ont permis de diviser le poids par un facteur dix. Des LiDAR miniatures pesant quelques kilogrammes peuvent désormais être embarqués sur drone, réduisant drastiquement le coût d'un scan par LiDAR aéroporté sur de petits ouvrages.

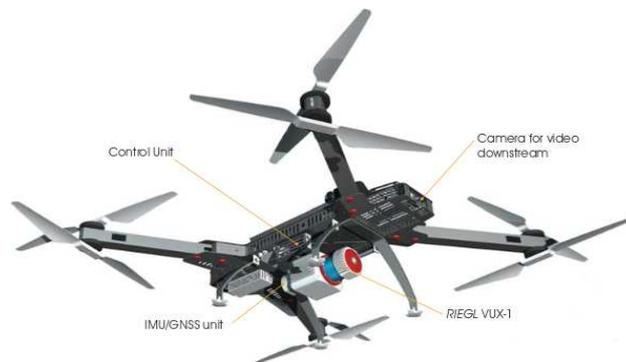


Figure 14: Système RiCOPTER équipé du LiDAR RIEGL VUX-SYS

Selon la documentation du constructeur

Riegl, le système VUX-1 (Figure 14) permet une précision relative d'un centimètre. La précision du système de géopositionnement (centimétrique), et (surtout) celui de la centrale inertielle sujette à des dérives systématiques, dégradent la précision absolue de cette solution. De nombreux acteurs cherchent à s'approprier le marché, menés par des constructeurs historiques (Riegl, Leica, Trimble,...) mais aussi par des start-up tel L'Avion Jaune [Yellowscan 2015] ou encore Velodyne [Glennie et al. 2013].

Ces systèmes ne permettent pas d'atteindre des résultats suffisamment précis pour répondre à la détection de mouvements centimétriques. De nombreuses études ont été menées pour estimer la précision des LiDAR aériens [Lin et al. 2011 ; Wallace et al. 2012 ; Kelcey et Lucieer 2012]. De fortes divergences existent entre les diverses solutions ; on peut estimer qu'ils sont opérationnels pour répondre à un besoin de précision qui n'excède pas 5 cm, dans le meilleur des cas.

Le LiDAR embarqué n'est donc pas encore assez précis pour effectuer un suivi d'évolution de digue renforcé. Les drones équipés d'un LiDAR « clé-en-main » ont un coût proche d'un LiDAR terrestre. Étant donné le facteur de risque (en cas de défaillance de l'aéronef survolant une rivière par exemple), le recours au LiDAR embarqué sur drone présente un intérêt pour les grands linéaires (supérieurs à 1000 mètres) qui ne nécessitent pas une haute précision. Sur de petits ouvrages, le

recours au LiDAR terrestre est plus économique, plus simple et plus précis.

2.4 LA PHOTOGRAMMÉTRIE

2.4.1 HISTORIQUE

Les fondements de la géométrie perspective, formalisés par Léonard de Vinci en 1492 [Doyle 1964], sont le préambule nécessaire à l'élaboration de la photogrammétrie. Comprendre comment une scène 3D peut être fidèlement restituée sur une toile permettra quelques siècles plus tard d'effectuer le raisonnement inverse à partir de photographies.

La date de l'invention de la photographie est sujette à controverse. Le principe de la chambre obscure, découvert par Aristote dans l'antiquité, a été repris et développé par de nombreux savants au cours du XVI^{ème} siècle. Il faut néanmoins attendre 1839, année reconnue comme celle de l'invention de la photographie [Newhall 1964], pour voir la première image imprimée sur une surface d'argent polie, à travers le daguerréotype mis au point par Louis Daguerre.

Une décennie plus tard, on attribuera l'invention de la photogrammétrie à Laussedat, pour sa restitution de la façade de l'Hôtel des Invalides en 1849. On peut alors observer le développement de cette science en reprenant l'analyse de [Konecny 1985] selon quatre cycles :

- la mise au point de la planche photogrammétrique, des années 1850 à 1900. Cette phase de développement intense a permis l'élaboration de nombreux dispositifs de restitution. Elle s'achève par la mise au point des premiers reconstituteurs stéréoscopiques (travaux de Charles Édouard Deville en 1896).
- la photogrammétrie analogique, des années 1900 à 1960. Elle fait appel à des instruments mécaniques et optiques, permettant de déplacer et d'orienter des images argentiques afin de rétablir la vision stéréoscopique. Les rayons issus de deux points homologues se croisent alors en un point objet marqué par une tête scripturante sur un plan 2D.
- la photogrammétrie analytique, des années 1960 à 1985 (Figure 15). Les opérations mécaniques effectuées par le biais de manivelles sont désormais pilotées par ordinateur. Après une phase d'orientation manuelle, un logiciel transforme des coordonnées image en coordonnées terrain et permet leur exploitation dans un logiciel de CAO/DAO.
- la photogrammétrie numérique, depuis les années 1985. La naissance de la photographie numérique couplée à la puissance des ordinateurs a contribué au calcul automatique des orientations à partir de quelques points homologues saisi par un opérateur sur un couple d'images. Un écran clignotant à haute fréquence et une paire de lunettes affichant pour chaque

œil une image du couple permet la restitution des éléments en 3D.



Figure 15: Appareils de stéréorestitution permettant d'associer à chaque œil une image d'un couple stéréoscopique, de les orienter, et d'en restituer les éléments.

À chacun de ces cycles correspondent des avancées techniques permettant de faire tomber certaines barrières, notamment le niveau d'expertise et les moyens requis pour restituer une scène. Avec ces systèmes, la précision du tracé dépend :

- de la précision de l'instrument de restitution : de plus en plus grande selon les phases de développement ;
- de la qualité de l'image : généralement croissante jusqu'à l'apparition de la photographie numérique, qui fut de qualité moindre à ses débuts mais est désormais supérieure à la photographie argentiques (sujet à débat) ;
- de l'acuité stéréoscopique : l'humain est ici inégal puisque les caractéristiques physiologiques d'un opérateur influent sur la qualité de sa restitution ;
- de la précision du géoréférencement : on vise généralement une précision supérieure à la taille du pixel (exemple : précision de quelques centimètres pour recaler des blocs d'images aériennes de résolution décimétrique) ;
- de la résolution des images : des images de résolution métrique ne pourront pas être restituées avec une précision centimétrique ;
- de la configuration stéréoscopique du couple : plus le rapport entre la base stéréoscopique et la hauteur de vol est important (ou distance à la scène dans le cas terrestre), meilleure est la précision du pointé 3D (jusqu'à un seuil au-delà duquel la visualisation stéréoscopique devient inconfortable).

Un nouveau cycle est certainement en train d'apparaître avec la naissance depuis une dizaine d'années de ce qu'on pourrait appeler la photogrammétrie automatisée.

2.4.2 LA PHOTOGRAMMÉTRIE AUTOMATISÉE

La photogrammétrie dite classique, nécessitant l'intervention d'un opérateur spécialisé pour la saisie de points homologues et la stéréorestitution des caractéristiques de la scène, est en fin de vie. Requérant un degré de qualification

relativement élevé et l'emploi d'équipements encombrants, complexes et coûteux, la photogrammétrie a presque toujours été réservée à une tranche infime de la population.

Aujourd'hui, grâce au rapprochement avec des communautés scientifiques transverses, notamment celle de la vision par ordinateur, des algorithmes ont pu être mis au point afin de faire tomber de nouvelles barrières, aboutissant à l'émergence de solutions logicielles automatisées (Figure 16). Les 6 points homologues nécessaires pour appliquer la méthode de Grüber sont désormais remplacés par des milliers de points automatiquement détectés. Le calcul des orientations est totalement informatisé et la stéréorestitution d'éléments par un opérateur est supplantée par la création entièrement automatisée de nuages de points.



Figure 16: Logos de logiciels populaires de photogrammétrie automatisée

On peut classer les logiciels photogrammétriques selon trois catégories :

- des solutions *cloud* (ex : Autodesk 123DCatch [123DCatch 2015], PhotoModeler [Photomodeler 2015]...);
- des logiciels propriétaires (ex : Agisoft Photoscan [Photoscan 2015], Pix4D [Pix4D 2015], Acute3D [Acute3D 2015]...);
- des logiciels ouverts et modifiables, généralement sous licence libre open-source et gratuits (ex : Bundler [Bundler 2015 ; Snavely et al. 2006], MicMac [MicMac 2015 ; Pierrot-Deseilligny et Paparoditis 2006], VisualSfM [Vsfm 2015 ; Wu 2011],...).

De complexité d'utilisation croissante, ces différentes solutions traduisent également des différences majeures dans leur fonctionnement. Les premières solutions sont principalement destinées au grand public, et permettent notamment de traiter des images qui n'ont pas été acquises selon un protocole photogrammétrique strict, au prix d'une reconstruction parfois approximative. À notre connaissance, ces services en ligne ne permettent actuellement pas d'utiliser des points d'appui pour asseoir et géoréférencer un relevé, les excluant de fait des applications métrologiques.

Les logiciels propriétaires ont un fonctionnement permettant des usages professionnels. La possibilité d'utiliser des points d'appui permet ainsi de compenser d'éventuelles dérives, mais aussi de qualifier la précision des calculs. Ils reprennent les dernières avancées en traitement d'image, mais la fermeture de

leur code source laisse planer une zone d'ombre sur leur fonctionnement interne.

Les solutions libres et ouvertes ont donc notre préférence. La suite logicielle *MicMac* (Multi-Images Correspondances, Méthodes Automatiques de Corrélation), développée au sein de l'IGN, a été utilisée au cours de cette étude afin de proposer une solution non seulement gratuite, mais surtout compréhensible et optimisable.

2.4.3 PRÉSENTATION DE LA CHAÎNE DE CALCUL MICMAC

Élaborée pour les besoins internes de l'IGN, la suite logicielle *MicMac* permet de transformer automatiquement un ensemble d'image en un modèle 3D.

Mutli plates-formes (GNU/Linux, Windows et Mac OS), son code est ouvert depuis 2007 sous la licence Cecill-B, adaptation en droit français des licences L-GPL, BSD, Apache ou W3C auxquelles une obligation forte de citation est ajoutée. À la différence des nombreux logiciels photogrammétriques « *One-Click* », elle regroupe un ensemble d'outils à la complexité assumée, permettant un paramétrage optimal des calculs. Divers outils bas niveaux permettent un contrôle total sur le processus de calcul ; *MicMac* peut être manipulé à travers 5 niveaux d'utilisation, de complexité décroissante :

- personnalisation du code C++ ;
- emploi de fichiers XML ;
- interface en ligne de commande ;
- interfaces graphiques individuelles ;
- interface graphique globale.

CODE C++

En Annexe 1 du second Tome, une introduction à la programmation C++ en utilisant la bibliothèque *ELISE* est présentée. Cette bibliothèque contient un ensemble de fonctions bas niveaux pour la manipulation d'images. La documentation incluse avec les sources du logiciel explique en partie son fonctionnement.

Ce niveau d'accès est utilisé par un nombre très restreint d'utilisateurs ; en pratique il permet d'écrire des programmes qui seront appelés à un niveau d'accès supérieur. Il est toutefois possible d'éditer le code afin d'en personnaliser une partie.

FICHIERS XML

L'appel d'une commande pouvant requérir de nombreux paramètres, *MicMac* peut être appelé à travers l'emploi de fichiers au format XML (*eXtensible Markup Language*). Constitués d'un ensemble de balises, des fichiers types sont

disponibles avec les sources du logiciel. Ils peuvent être personnalisés afin de contrôler finement le fonctionnement d'un programme.

Par exemple *Apero*, le module de calcul des orientations de *MicMac*, s'utilise en appelant par ligne de commande un fichier XML (exemple : *Apero MesParametres.xml*). Ce fichier doit suivre un formatage strict ; il peut par exemple être configuré pour contrôler quels paramètres internes doivent être relâchés, à quel moment, le nombre d'itérations,...

Unique niveau d'accès à la naissance de la suite, l'emploi de fichiers XML reste assez complexe et nécessite une certaine initiation. Il est néanmoins adapté à certains usages spécifiques et reste prisé par les *early-adopters*.

INTERFACES EN LIGNE DE COMMANDE

MicMac propose pour la plupart de ses outils une interface en ligne de commande (Figure 17). Regroupés depuis 2013 sous la commande unique *mm3d*, il s'agit d'appeler un programme spécifique suivi d'un certain nombre d'arguments obligatoires ou optionnels. L'interface fait ensuite le lien avec les programmes en C++, et remplit au besoin un fichier XML temporaire.

```

vince@vince-HP-Z420-Workstation:~$ Tapas RadialStd -help
*****
* Help for Elise Arg main *
*****
Mandatory unnamed args :
* string :: {Calibration model}
* string :: {Full Directory (Dir+Pattern)}
Named args :
* [Name=ExpTxt] INT :: {Export in text format (Def=false)}
* [Name=Out] string :: {Directory of Output Orientation}
* [Name=InCal] string :: {Directory of Input Internal Orientation (Calibration)}
* [Name=InOri] string :: {Directory of Input External Orientation}
* [Name=Doc] INT :: {Do Compensation}
* [Name=ForCalib] INT :: {Is for calibration (Change def value of LMV and prop diag)?}
* [Name=Focs] Pt2dr :: {Keep images with focal length inside range [A,B] (A,B in mm) (Def=keep all)}
* [Name=VitesseInit] INT
* [Name=PPRel] Pt2dr :: {Principal point shift}
* [Name=Decentre] INT :: {Principal point is shifted (Def=false)}
* [Name=PropDiag] REAL :: {Hemi-spherik fisheye diameter to diagonal ratio}
* [Name=SauvAutom] string :: {Save intermediary results to, Set NONE if dont want any}
* [Name=ImInit] string :: {Force first image}
* [Name=MOI] bool :: {MOI}
* [Name=DBF] INT :: {Debug (internal use : DebugPbCondFaisceau=true) }
* [Name=Debug] bool :: {Partial file for debug}
* [Name=DegRadMax] INT :: {Max degree of radial, default model dependent}
* [Name=DegGen] INT :: {Max degree of general polynome, default model dependent (generally 0 or 1)}
* [Name=LibAff] bool :: {Free affine parameter, Def=true}
* [Name=LibDec] bool :: {Free decentric parameter, Def=true}
* [Name=LibPP] bool :: {Free principal point, Def=true}
* [Name=LibCP] bool :: {Free distorsion center, Def=true}
* [Name=LibFoc] bool :: {Free focal, Def=true}
* [Name=RapTxt] string :: {RapTxt}
* [Name=LinkPPaPPs] REAL :: {Link PPa and PPs (double)}
* [Name=FrozenPoses] string :: {List of frozen poses (pattern)}
* [Name=SH] string :: {Set of Hom, Def="", give MasqFiltered for result of HomolFilterMasq}
* [Name=RefineAll] bool :: {More refinement at all step, safer and more accurate, but slower, def=true}
* [Name=ImMinMax] vector<std::string> :: {Image min and max (may avoid tricky pattern ...)}
* [Name=EcMax] REAL :: {Final threshold for residual, def = 5.0 }
vince@vince-HP-Z420-Workstation:~$ Tapas RadialStd ".*ARW" InCal=Calibration LibPP=false

```

Figure 17: Exemple d'utilisation du module *Tapas* en ligne de commandes ; un fichier d'aide décrit les arguments impératifs ou optionnels. La dernière ligne illustre un calcul pour lequel une calibration initiale est reprise, son point principal restant figé

Par exemple, *Tapas* est une interface vers *Apero*. Lors de son exécution, un fichier XML temporaire est écrit avec les caractéristiques choisies par l'utilisateur. L'interface se limite alors à appeler *Apero* avec ce fichier XML.

Niveau d'accès privilégié par la majorité des utilisateurs, sa maîtrise permet d'enchaîner les commandes les unes après les autres en les empilant par exemple dans un script *shell*.

INTERFACES GRAPHIQUES INDIVIDUELLES

L'interface en ligne de commande étant rebutante pour de nombreux utilisateurs potentiels, des modules graphiques individuels ont été développés afin de proposer une expérience plus conviviale (Figure 18).

L'ouverture de ces outils s'effectue en ligne de commande, il s'agit de taper *mm3d* puis le nom de la commande précédé de la lettre minuscule « *v* »

(Ex : *mm3d vTapas*). Les options et le fonctionnement sont identiques aux interfaces en ligne de commande, à la différence près qu'il n'existe pas forcément une interface individuelle pour chaque outil.

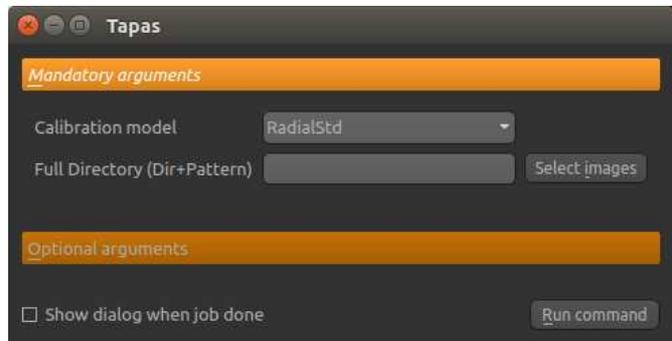


Figure 18: Exemple d'interface individuelle pour l'outil Tapas.

INTERFACES GRAPHIQUES GLOBALES

Enfin, un certain nombre d'interfaces graphiques dites globales ont été développées. Une première interface a été lancée sous l'égide de l'IGN [Cléry et Pierrot-Deseilligny 2011], mais le financement actuel de la recherche sur projet est un frein à son maintien.

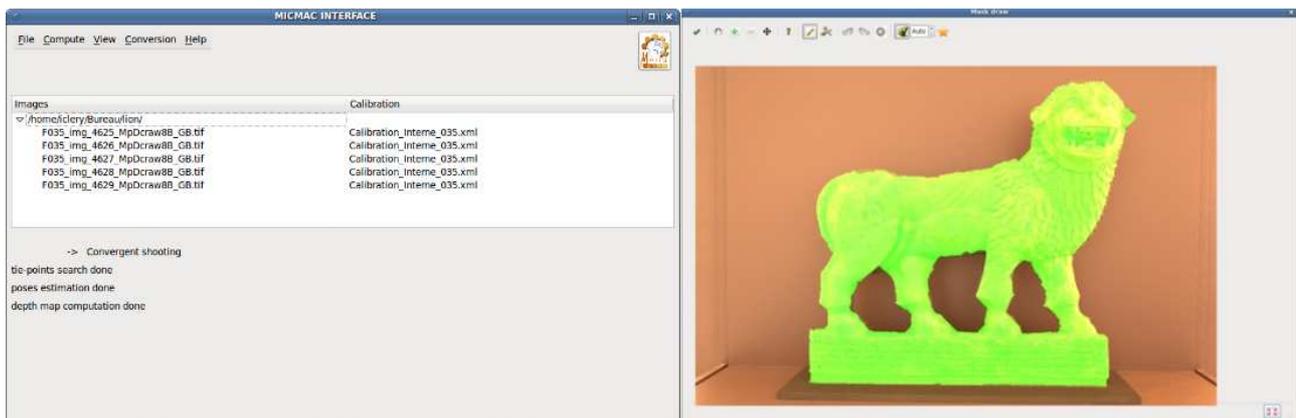


Figure 19: Interface développée par Isabelle Cléry avec la fenêtre principale (à gauche) et l'interface de saisie (à droite). Image extraite de [Cléry et Pierrot-Deseilligny 2011]

Des acteurs privés ont aussi créé leur propre interface de manière indépendante (Figure 20). Il est difficile de recenser chacune d'elle ainsi que leurs caractéristiques principales. On peut néanmoins penser qu'elles ont été développées pour des environnements Windows, voire Mac (populaire dans le milieu de l'archéologie notamment).

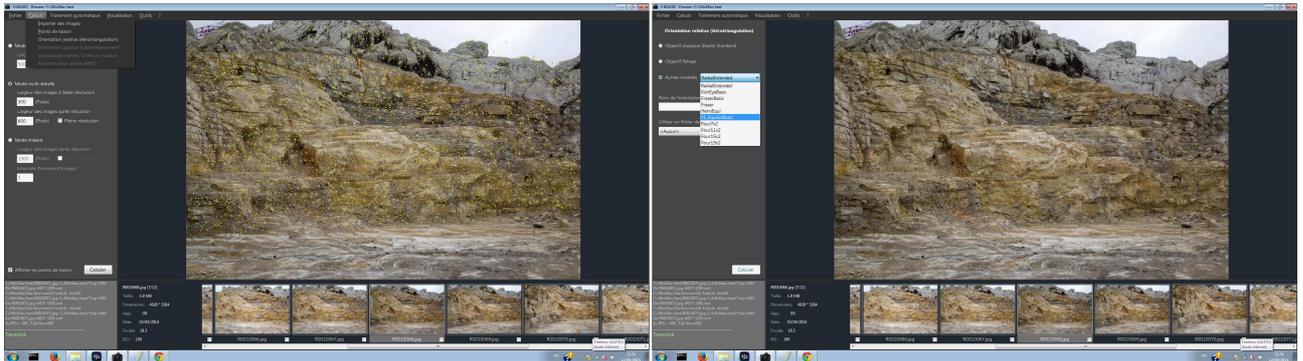


Figure 20: Interface développée par Vinci Construction Terrassement et utilisée dans le groupe de construction dans le cadre de travaux de production

Enfin, sous l'égide du Cerema dans le cadre de l'opération de recherche APHOGEOPHY (Applications de la photogrammétrie pour le génie civil et la géophysique de subsurface) et grâce aux travaux de Denis Jouin, une interface multi plates-formes sous licence CeCILL-B est en cours de développement depuis début 2015 (Figure 21). Actuellement en phase d'alpha-test, l'interface propose de vulgariser un certain nombre de termes techniques et de proposer des *workflows* types simplifiés.

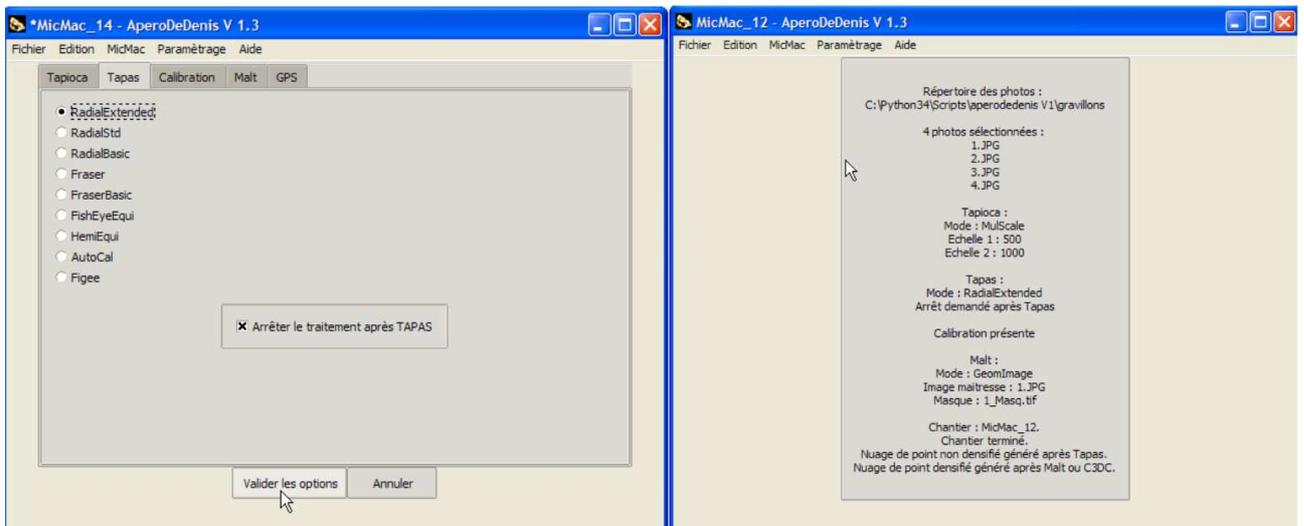


Figure 21: Version alpha de l'interface open-source développée par le Cerema

2.5 CONCLUSION

D'une surveillance essentiellement visuelle, l'auscultation des digues fait aujourd'hui intervenir de multiples techniques (nivellement de précision, mesures piézométriques, instrumentation en fibre optique,...) afin d'anticiper tout phénomène pouvant mettre en danger la sécurité de ces ouvrages. Ces méthodes permettent de mesurer précisément un phénomène en des points particuliers, répartis le long de la structure.

Néanmoins, les techniques employées ne permettent pas de surveiller la naissance de désordres éventuels entre ces points de mesure. Les nouvelles technologies de mesures semblent permettre d'apporter un complément en établissant des modèles surfaciques.

Le LiDAR embarqué ne répond pas aux attentes en terme de précision pour de l'auscultation renforcée. Terrestre, il représente un coût important pour atteindre les précisions ciblées, et ne permet pas d'intervenir sur un terrain dégradé ou inaccessible. La photogrammétrie par drone présente un espoir en ce sens.

L'automatisation des calculs et les algorithmes de traitement automatique nécessitent cependant de rester vigilant. En perdant un certain contrôle sur la manière dont ces données sont manipulées et transformées, la précision des résultats pourrait en être entachée. L'utilisation de logiciels libres et ouverts permet un contrôle avancé, d'où le choix de la suite *MicMac*. Son utilisation pouvant paraître complexe, un *workflow* type spécifique aux ouvrages linéaires est nécessaire.

CHAPITRE 3

3 - ACQUISITION

3.1 SITES ET RÉGLEMENTATIONS

Au cours de cette étude, nous avons mené de nombreuses expérimentations afin de déterminer le vecteur le plus approprié à un suivi d'évolution des digues de la CNR.

L'ULM, l'outil historiquement privilégié pour ausculter de petites zones [Buckley et al. 2002, Mills et al. 2005], est aujourd'hui en compétition avec le drone, apparaissant comme l'outil le plus économique et facile à déployer [Everaerts 2008, Eisenbeiss 2009].



La CNR a identifié trois sites présentant un intérêt pour l'étude (Figure 29).

Site	Intérêt du site	Méthodes d'auscultation	Zone à ausculter
La Pallière Rive Droite PK133.4	Mouvements avérés	RN et profils en travers	1200 mètres
Rochemaure Rive Droite PK153.0	Lever LiDAR terrestre (13/05/2013)	Lever LiDAR et profils	600 mètres
Avignon Rive Gauche PK237.7 Rive Droite PK233.4	Zone sensible	Instrumentation potentielle par fibre optique	600 mètres 10 kilomètres

Quinze jeux de données ont pu être acquis au cours de cette étude, faisant appel à des vecteurs et scénarios de vols divers, dont nous présentons les suivants :

Identification du jeu	Vecteur aérien	Linéaire	Date de l'acquisition
Rochemaure-2013	Mikrocopter HexaXL	600 mètres	02/07/13
Rochemaure-2014	Mikrocopter HexaXL	600 mètres	07/04/14
Avignon-S1	Mikrocopter HexaXL	600 mètres	10/03/14
Avignon-S2	Gatewing UX100	600 mètres	01/04/14
Avignon-S4	Delair Tech DT18	10 000 mètres	01/04/14
Palliere-2013	Mikrocopter HexaXL	1100 mètres	28/02/13
Palliere-2014a	Mikrocopter HexaXL	600 mètres	03/04/14
Palliere-2014b	Mikrocopter HexaXL	600 mètres	04/04/14
Palliere-2015a	DroneSys DS6-1200 Hexacoptère	1100 mètres	14/04/15
Palliere-2015b	DroneSys DS6-1200 Hexacoptère	1100 mètres	15/05/15
Palliere-2015c	DroneSys DS6-1200 Hexacoptère	1100 mètres	15/05/15

3.1.1 LA PALLIÈRE

La digue a été construite dans les années 1980 lors de la création de l'aménagement de Belley, en utilisant les matériaux disponibles sur place (Figure 22). La structure fait l'objet d'une surveillance altimétrique ; elle a montré pendant 30 ans des vitesses de tassement de plus en plus faibles. Un incident mineur survenu en 2011 a provoqué une réaction rapide de la CNR, qui a installé en addition du réseau de nivellement des piézomètres afin de vérifier le bon rabattement hydraulique dans le corps de la digue. Une surveillance visuelle mensuelle permet de détecter rapidement d'éventuels incidents (venue d'eau claire en bas de talus, érosion de matériaux drainants, ornières,...).

L'auscultation photogrammétrique aérienne trouve ici tout son intérêt. En établissant des modèles surfaciques très fins, une analyse diachronique est un complément idéal si elle permet de détecter des désordres avant qu'ils n'endommagent la structure.

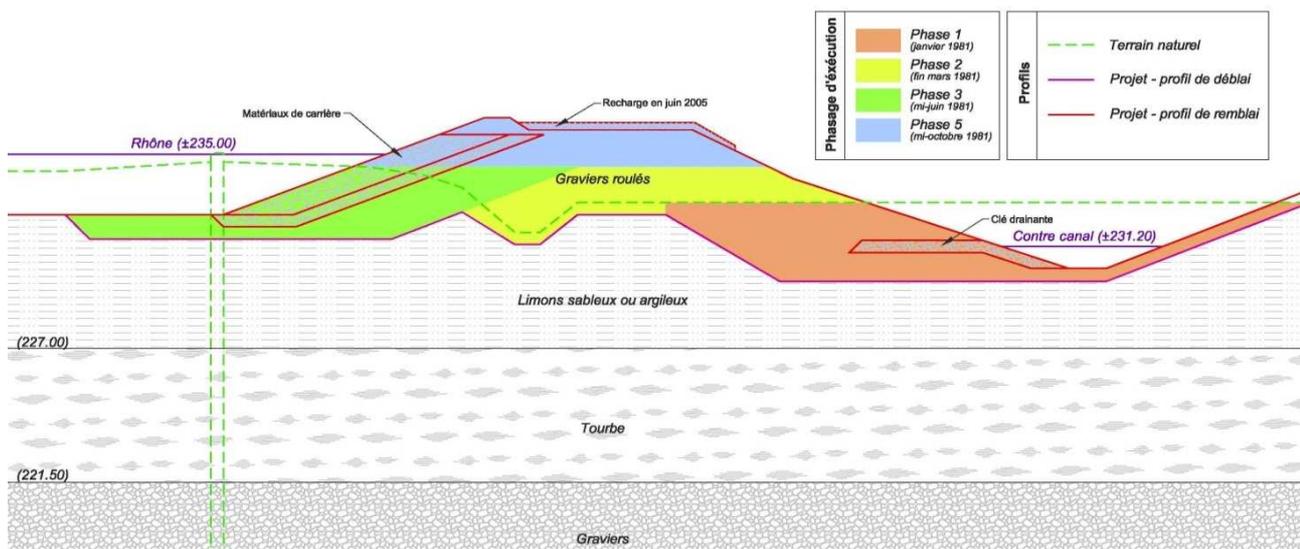


Figure 22: Coupe de la digue illustrant les phases de construction et matériaux

Située en dehors d'une zone urbaine, la digue peut être survolée par drone ou ULM. Compte tenu de la présence d'un aéroclub à moins de 10 km (Figure 23), l'évolution par drone en scénario S2 reste possible, mais à une hauteur de vol limitée à 50 m. Par ailleurs, un protocole administratif est nécessaire dans ce dernier cas, limitant son intérêt. La digue a été survolée en scénario S1 (vols multiples) et par ULM hélicoptère afin d'évaluer le potentiel de ce vecteur sur de longs linéaires.

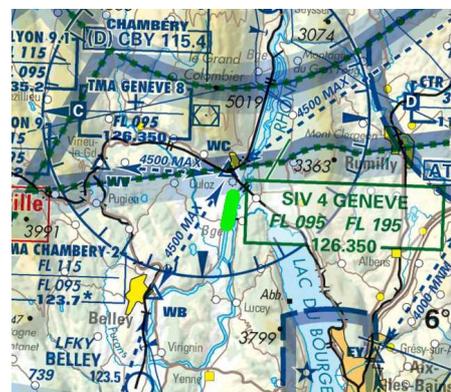


Figure 23: Extrait de la carte aéronautique ICAO

3.1.2 ROCHEMAURE

Linéaire de 600 mètres qui présente l'intérêt d'avoir été l'objet d'un relevé LiDAR terrestre en avril 2013. La digue (Figures 25 et 27) est un aménagement considéré comme stable. Une arrivée d'eau en pied de digue a néanmoins nécessité une intervention (Figure 24). Deux relevés photogrammétriques y ont été menés à neuf mois d'intervalle (07/2013 et 04/2014).



Figure 24: Incident survenu début 2014



Figure 25: Illustrations de la digue de Rochemaure

La digue est située en rive droite du Rhône, et se trouve à moins de 5 km de l'aérodrome de Montélimar Ancône, dont la piste a une longueur de 1200 mètres (Figure 26). Cette présence est un frein à l'utilisation de drones en scénario S2 ; la réglementation impose dans ce cas la mise en place d'un protocole entre l'opérateur de vol et l'exploitant de l'infrastructure. L'acquisition en scénario S1 est toutefois assez simple et adaptée au contexte compte tenu du linéaire relativement faible (acquisition en trois tronçons de 200 mètres).

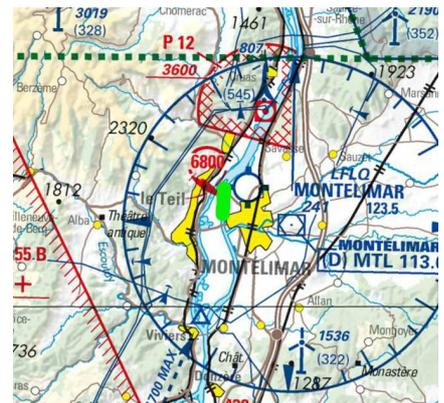


Figure 26: Extrait de la carte aéronautique ICAO

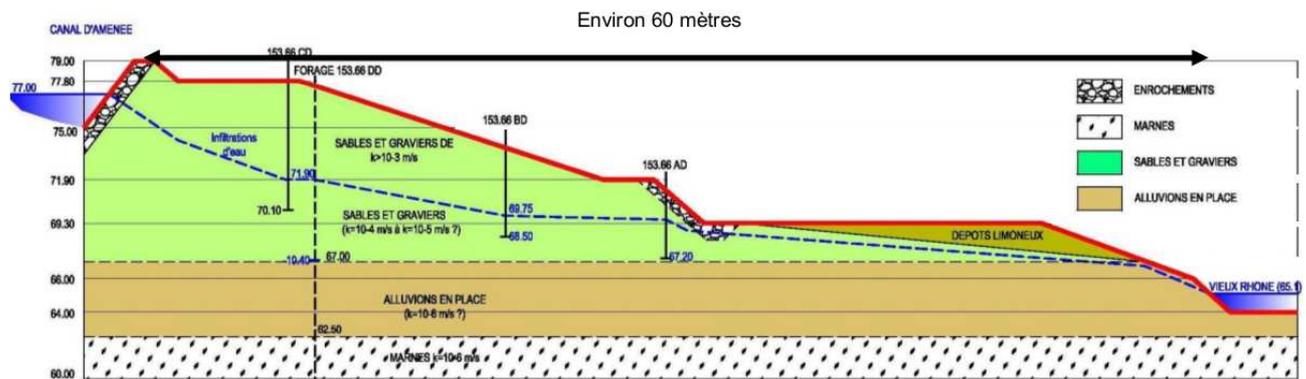


Figure 27: Coupe de la digue au droit du site de Rochemaure (07)

3.1.3 AVIGNON

Les digues d'Avignon ont été survolées à quatre reprises. En rive droite, une acquisition a permis d'établir un état des lieux avant que des travaux y soient menés sur un petit linéaire (600 mètres). La production d'une orthophotographie centimétrique a permis une alternative viable à l'établissement d'un plan topographique. Une seconde acquisition menée en 2015 a permis de faire un point de suivi d'avancement de chantier.

Le site a également été utilisé afin d'évaluer l'intérêt des scénarios S2 et S4, ainsi que des matériels qui leur sont associés. L'évolution en scénario S2 a fait l'objet d'un test de répétabilité (deux vols indépendants) sur le linéaire de 600 mètres en rive droite. L'acquisition en S4 a quant à elle visé un linéaire de 10 kilomètres en rive gauche.

Les deux linéaires se trouvent dans la CTR d'Avignon (pour *Control Traffic Region*, espace dans lequel le trafic aérien est strictement régulé). Ils sont aussi à moins de 15 kilomètres des aérodromes d'Avignon Caumont et d'Avignon Pujaut (Figure 28), dans une zone de transit VFR (pour *View Flight Rules*, zone de vol à vue) régissant la navigation dans l'espace situé entre 500 et 1700 pieds (de 150 à un peu plus de 500 mètres).

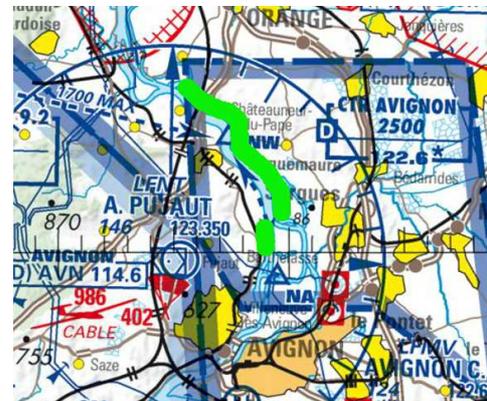


Figure 28: Extrait de la carte aéronautique ICAO

Conformément aux articles 4-3 et 4-4 de la réglementation du 12 avril 2012, un protocole entre l'opérateur de vol et les aérodromes visés est nécessaire. En pratique, une ZRT (*Zone Réglementée Temporaire*) a pu être établie dans la zone d'étude, se substituant à l'espace aérien avec lequel elle interfère.

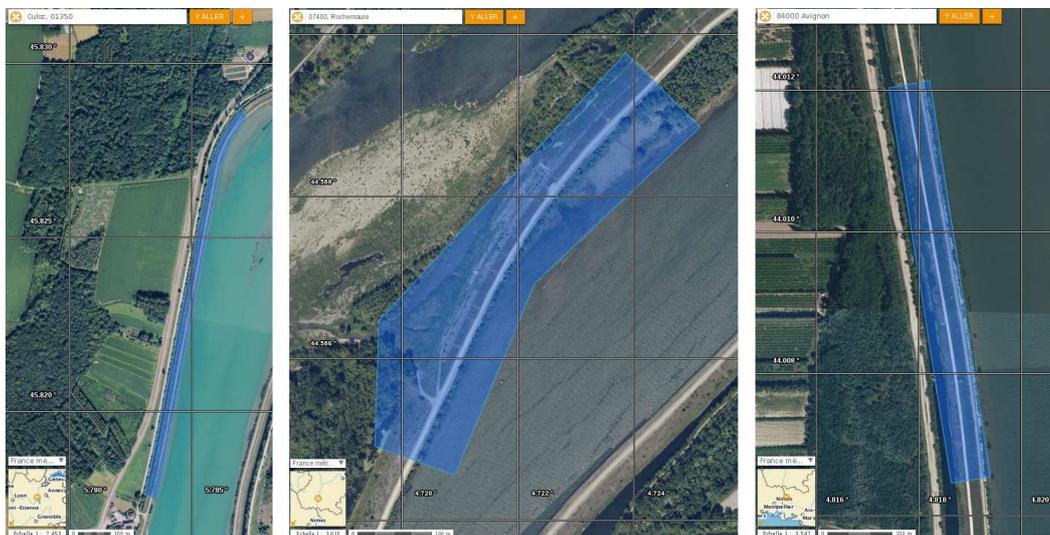


Figure 29: Emprise des linéaires de La Pallière (à gauche), Rochemaure (au centre) et Avignon (à droite)

3.2 APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES

Alors que de nombreux drones « clé-en-main » intègrent des caméras grand public, le choix d'un appareil photographique et des réglages associés à des fins de restitution photogrammétrique nous semble requérir une étude préalable des systèmes d'imagerie.

3.2.1 FORMATION D'UNE IMAGE

Un appareil photographique est un instrument permettant d'enregistrer une scène 3D sur un support 2D. De manière générale, il résulte de l'assemblage dans une chambre noire (Figure 30) :

- d'un objectif (composé d'une ou plusieurs lentilles), qui est défini par sa longueur focale, son ouverture, ainsi que son champ de vision ;
- d'un capteur (ou un film sensible en photographie argentique), composé de photosites qui enregistrent la quantité de lumière (radiométrie) pour chaque pixel ;
- d'un obturateur, afin de régler le temps d'exposition ;
- d'un diaphragme permettant de contrôler la quantité de lumière (le paramètre d'ouverture) et la profondeur de champ.



Figure 30: Illustration du Sony DSC-RX1.

Source :

<https://www.alphaphotoclub.com/wp-content/uploads/2014/04/sensor1.jpg>

Le choix d'un appareil photographique résulte d'un compromis entre de nombreux paramètres [Souchon et al. 2006]. Outre les critères de prix, de taille de capteur et de poids auxquels les dronistes débutants se réfèrent, la qualité de la reconstruction photogrammétrique d'une série d'images repose sur une prise de vue adaptée mais aussi sur l'utilisation de matériel approprié.

3.2.2 APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES ÉVALUÉS

Les vecteurs à voilure fixe sont généralement conçus pour emporter une charge donnée. L'appareil photographique vient se loger dans un emplacement spécifiquement prévu, et un logiciel dédié déclenche la prise de vue soit à intervalles donnés, soit lorsque le drone passe autour de *waypoints* (« points de passage » prévus dans le plan de vol). Le remplacement de l'appareil se confronte donc à deux problèmes :

- il peut induire un déplacement du centre de gravité, ce qui peut détériorer la qualité du vol voire même conduire à des crashes ;
- le logiciel de planification de vol, s'il est fermé, ne permettra pas forcément de prendre en compte les caractéristiques du nouvel appareil, ce qui peut impliquer des problèmes de recouvrement voire même de déclenchement.

Les drones à voilure tournante ont la réputation d'être plus modulables. Les systèmes clé-en-main sont néanmoins confrontés aux mêmes problèmes de planification et de déclenchement. Le montage de l'appareil s'effectue sur une nacelle gyrostabilisée. Dans le cas d'une nacelle de mauvaise qualité, il est préférable d'accrocher l'appareil sous le ventre du drone, en plaçant une pièce de mousse pour contrer les vibrations (Figure 31).



Figure 31: Une nacelle gyrostabilisée de bonne qualité est préférable pour embarquer l'appareil photographique. Néanmoins, un montage simplifié est possible pour acquérir des images nadir de bonne qualité

Appareil	Capteur	Objectif – Focale
Sony DSC-RX1	24 x 36 mm – 24 MP	Fixe non interchangeable – 35 mm f/2.0
Camlight IGN	24 x 36 mm – 20 MP	Interchangeable – 35 mm et 85 mm Leica f/2.0
Ricoh GR IV	7,4 x 5,6 mm - 10 MP	Rétractable à focale fixe - 6,0 mm (28 mm équivalent) f/1.9
Sony NEX 7	15, 6 x 23,4 mm – 24 MP	Interchangeable – 24 mm Zeiss (35 mm équivalent) f/1.8
Delair-Tech	10,6 x 12,6 mm – 5 MP	Fixe non interchangeable – 12 mm (35 mm équivalent)

Les essais menés avec le Sony NEX7 n'ont pas été concluants et ne seront pas développés dans cette étude. Nous avons pu constater de fortes aberrations chromatiques, une forte distorsion ainsi qu'un certain flou dans l'ensemble de l'image. Résultant probablement d'un défaut dans l'optique utilisée, une acquisition menée avec le DSC-RX1 a montré des résultats de qualité nettement supérieure (Figure 32).

Le choix d'un appareil photographique est néanmoins un critère important pour les applications métrologiques.



Figure 32: Extrait d'images prises par le NEX7 (à gauche) et le DSC-RX1 (à droite) : au sol (en haut) et en vol (en bas)

3.2.3 RECOMMANDATIONS

Le protocole de prise de vue pour une restitution photogrammétrique optimale requiert une certaine vigilance quant aux réglages de l'appareil photographique [Pierrot-Deseilligny et Cléry 2012]. Le post-traitement faisant appel à des algorithmes de reconnaissance de pixels selon des niveaux radiométriques, il est préférable d'opérer une prise de vue à paramètres constants :

- Privilégier l'enregistrement des images en format brut (RAW) afin d'éviter le bruit de compression JPG, et choisir une balance des blancs en accord avec les conditions lumineuses (éviter le mode automatique).
- Sélectionner le mode de prise de vue manuel (éviter les modes priorité vitesse ou ouverture qui amènent des variations radiométriques), les réglages d'ouverture, de vitesse et de sensibilité étant déterminés selon le compromis présenté Figure 33.



Figure 33: Le triangle de l'exposition expose le compromis nécessaire entre vitesse d'obturation, sensibilité et ouverture.

Source: <http://www.astuces-photo.com/wp-content/uploads/2012/10/Triangle-exposition.jpg>

Embarqué sur un drone à voilure tournante navigant à des vitesses inférieures à 5 m.s^{-1} , un temps de pose de $1/1000$ limite le flou à un filé de 5 mm , soit la moitié de la résolution pixellaire. Sur un drone à voilure fixe, dont la vitesse en vol est généralement comprise entre 10 et 30 m.s^{-1} , il est plus prudent de régler le temps d'exposition à des valeurs inférieures (les appareils récents descendent jusqu'à $1/4000$ voire $1/8000$).

Une vitesse faible nécessite une ouverture et/ou des ISO forts afin de contrebalancer le manque de luminosité nécessaire à une image

radiométriquement égalisée. Lorsqu'une optique de bonne qualité est utilisée, il nous semble préférable (dans le cas où la scène se situe au-delà de la distance hyperfocale) de privilégier une ouverture forte afin de minimiser la valeur de la sensibilité ISO et le bruit numérique résultant.

Le choix d'un objectif à focale fixe est préférable à un objectif à focale variable. Embarqué sur un vecteur soumis à de fortes vibrations, un ruban adhésif est nécessaire afin de garantir une longueur focale constante. Dans le cas contraire, l'objectif peut être amené à se dévisser au cours de la prise de vue, ce qui va engendrer des complications lors de l'estimation des poses tel qu'observé par [Cramer et Haala 2012] (il faudrait alors calculer pour chaque pose un modèle caméra unique, ce qui est possible via *Apero*² mais complexe d'un point de vue mathématique, et inadapté aux mesures de précision).

Les objectifs rétractables nous semblent à éviter pour les applications de métrologie. Le système de rétractation ne paraît pas très stable d'un point de vue mécanique, et les fortes vibrations auquel l'appareil est soumis en vol pourraient influencer un déplacement du point principal de symétrie. Ces appareils ont néanmoins l'avantage d'être plus légers et permettent de réaliser des travaux pour lesquels la qualité photogrammétrique n'est pas aussi rigoureuse (foresterie, carrière, suivi de chantier,...).

Les capteurs photographiques, de technologie CMOS ou CCD, se différencient principalement par leur taille et leur nombre de pixels. La qualité de l'enregistrement s'estime généralement par le rapport signal sur bruit (*Signal Noise Ratio SNR*). De manière générale, plus les photosites sont grands, plus ils capteront de lumière. Un compromis entre taille de capteur et nombre de pixels est trouvé par les constructeurs afin d'offrir un SNR satisfaisant. Du côté des utilisateurs, le choix est généralement restreint par le budget, les capteurs grand formats étant de meilleure qualité, mais plus onéreux.



Figure 34: Exemples d'artefacts créés par l'utilisation d'un obturateur à rideau.

Source : Google Images

Le choix d'un obturateur adapté est aussi un point important. Les obturateurs à plan focal (« obturateur à rideau ») sont communs sur la plupart des appareils photographiques. Constitués de deux rideaux se déplaçant (horizontalement ou verticalement) devant le capteur à vitesse constante, la translation du premier permet d'exposer le capteur à la lumière, alors que le second vient couper la

² Programme de calcul des orientations de la suite MicMac

lumière et clôt la prise de vue. Ce dispositif permet d'atteindre des temps d'exposition très faibles, mais il implique une asynchronisation lors de l'enregistrement de chaque pixel (Figure 34).

Sur un vecteur en déplacement, il est nécessaire que tous les pixels soient enregistrés au même instant. Cela exclut les obturateurs à rideau ou à disque (plus rares), au profit des obturateurs centraux.

Enfin, la mise au point doit impérativement être effectuée en mode manuel, et rester constante pour toute l'acquisition. Dans le cas aérien, la hauteur de vol est dans la plupart des cas supérieure à la distance hyperfocale ; une mise au point à l'infini est alors nécessaire. Pour la photogrammétrie terrestre, il peut être utile de fermer davantage le diaphragme afin de bénéficier d'une profondeur de champ accrue, quitte à utiliser un trépied et des temps de pose plus longs.

3.3 MOYENS AÉRIENS

3.3.1 DRONES À VOILURE FIXE

GATEWING X100

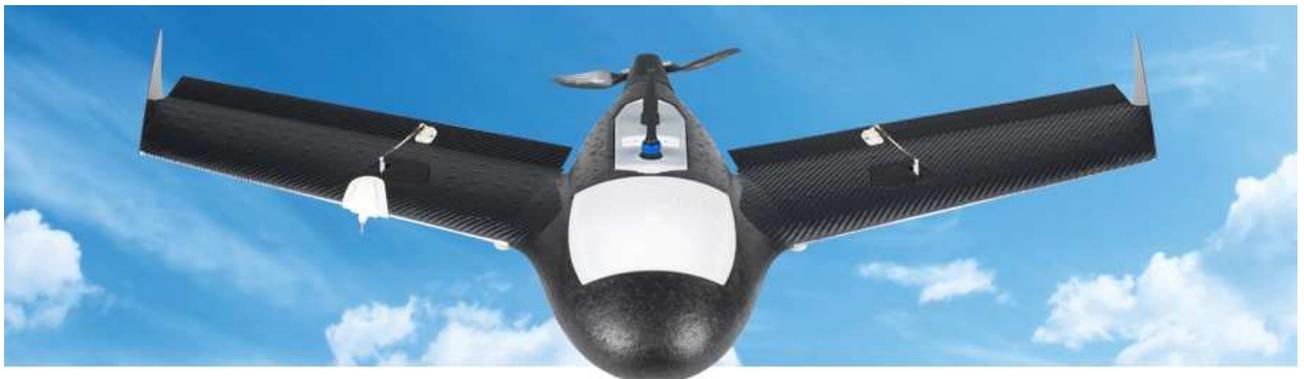


Figure 35: Illustration du drone Gatewing X100. Source : <http://uas.trimble.com>

Le Gatewing X100 (Figure 35) est un pionnier des systèmes dédiés aux usages professionnels civils. Ce drone « clé-en-main » couplé à une solution de traitement d'images automatique a permis une disruption dans les travaux habituellement menés par les géomètres et topographes.

Ses caractéristiques intrinsèques (hauteur de vol à 100 minimum, vitesse vol minimale de $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, appareil photographique dédié à focale fixe) limitent la résolution des images à 3,5 cm minimum, son intérêt étant de pouvoir couvrir de vastes zones (jusqu'à 2 km^2 par vol).

Notre retour d'expérience, en ne jugeant que la partie opérationnelle et non les résultats obtenus après traitements photogrammétriques, est assez contrasté. Il s'agit d'un vecteur totalement autonome, sur lequel il est aisé de définir un plan de vol en quelques clics. Accessible à un télépilote débutant (formation préalable

nécessaire), il est doté d'une bonne autonomie en vol (45 minutes).

Néanmoins, le système présente des inconvénients, notamment lorsqu'il est comparé avec les dernières avancées (sorti en 2010, il n'est aujourd'hui plus commercialisé). Tout d'abord, la facilité d'utilisation a comme contrepartie un manque de flexibilité des paramètres de vol (par exemple l'ajout d'images obliques est impossible).



Figure 36: Image acquise avec le X100. Les points d'appui, prévus pour une acquisition à 60 mètres, restent visibles. Un léger flou est perceptible sur certaines images, spécifiquement dans les coins

L'appareil photographique dédié à ce vecteur, le Ricoh GR IV, est lui criticable. On regrettera la présence d'un obturateur à rideau ainsi qu'une qualité d'image « amateur » (en comparaison avec les appareils réflex embarquables sur d'autres solutions), bien que largement suffisante pour de nombreuses applications (Figure 36). Le coût du capteur (environ 500€) est néanmoins très faible par rapport au coût du système complet (environ 30 000€).



Figure 37: Le drone est fixé sur une catapulte afin de faciliter son décollage

L'atterrissage sur une digue est d'ailleurs sujet à risque, tant la largeur de la piste peut sembler étroite au regard du sacrifice consenti en cas de

défaillance. Une zone plus large, située sur la rive face à celle auscultée a été sélectionnée pour ces opérations (Figure 37).

Ces inconvénients sont toutefois à contre-balancer au vu des derniers développements réalisés. Depuis la prise de participation de Trimble en 2012, deux nouveaux modèles ont été mis au point : l'UX5 et l'UX5 HP. Ces modèles embarquent des appareils photographiques de bien meilleure qualité (notamment un appareil plein format de 36 MP à objectif interchangeable pour l'UX5 HP).

Le logiciel de planification des vols a été mis à jour intégrant de nouvelles options et la procédure d'atterrissage a été améliorée. Cependant, l'enregistrement des images est effectué en JPG car le temps d'écriture des données RAW est trop important au vu de la vitesse de croisière pour garantir un taux de recouvrement important.

En l'état, ce modèle permet de répondre à la problématique de l'intervention d'urgence (Table 2), à condition que la zone ne soit pas dans un espace aérien contrôlé. Les évolutions des matériels et de la législation pourraient cependant leur conférer un intérêt accru.

DELAIR TECH DT18

Le DT18 (Figure 38) est un drone à voilure fixe développé par la société Delair Tech. Il s'agit du premier équipement civil à avoir été autorisé à évoluer en dehors de la vue du télépilote, sans limite de distance. Équipement clé-en-main, une formation de télépilote complexe est nécessaire (au moins 300 heures de vol en avion sont exigées).

Le constructeur propose deux capteurs : un premier capteur RGB de 5 mégapixels, et un second avec une quatrième bande permettant d'enregistrer le proche infrarouge. La légèreté du capteur est ici dictée par la législation imposant une masse au décollage inférieure à 2 kg (cas du scénario S4) ainsi qu'un certain nombre d'équipements (une caméra dans le nez de l'appareil pour la navigation, un dispositif permettant de reprendre le contrôle à tout moment,...).



Figure 38: Le DT18 et sa station de contrôle

Pionnier de ce nouvel espace aérien, le vecteur a trouvé de nombreuses applications de surveillance visuelle : pipelines [Pognonec 2014], actes de malveillance [Pouliquen et Lagarde 2014], viticulture de précision [Barbey et al. 2014],... Nous avons voulu estimer l'intérêt de cet outil pour de la surveillance de digues, et notamment sa faculté à pouvoir intervenir sur de grands linéaires en urgence (scénario exceptionnel).

Le vecteur et sa station de contrôle semblent de très bonne qualité. Le décollage par catapulte est optionnel, un simple lancement à la main est possible. Une fois

en l'air, le pilotage se fait par une série de clics sur un fond de carte. Il nous a permis de relever un linéaire de 10 kilomètres (deux axes Aller-Retour) en moins d'une heure. Son fuselage fin lui permet une pénétration dans l'air avec peu de frottements (d'où la longue autonomie). Nous avons cependant constaté que cela entraîne aussi une certaine instabilité. Lorsque la météo est agitée, le drone a tendance à dévier de sa trajectoire, nécessitant de multiples passages.



Figure 39: Image acquise avec le DT18. Le réglage de l'appareil photographique sans retour d'image peut amener à surexposer des zones. L'intersection en damier des points d'appui n'est pas nette

Malheureusement, la qualité d'image nous semble aujourd'hui insuffisante pour fournir une réponse aux besoins ciblés (Figure 39). Nous regretterons l'absence de paramétrages de prise de vue fins (seules la vitesse et la sensibilité sont contrôlables), ainsi que l'impossibilité de vérifier la qualité d'image en vol (problèmes depuis surmontés).

L'utilisation d'un tel vecteur est sujette à un protocole administratif lourd. Selon le retour d'expérience de la société Redbird, rodée aux vols dans ce scénario, il faut compter un mois pour obtenir les autorisations nécessaires. Ce délai élimine de facto le vecteur pour une réponse en cas d'urgence.

RETOUR SUR EXPÉRIENCE

Les systèmes clé-en-main offrent l'avantage de la simplicité de leur utilisation.

Deux acquisitions ont été menées avec le drone Gatewing X100 : une première en volant le long de la digue (vent alternativement de face, puis de dos), une seconde en navigant en travers de l'ouvrage (vent de côté).

Les sommets de prise de vue sont à intervalles réguliers lorsque le drone évolue le vent de côté. En navigant le long de la digue, le drone est plus rapide lorsqu'il a le vent de dos que de face (Figure 40). L'espacement entre les sommets est donc moins régulier d'un axe à l'autre. Lors de nos essais, le drone a évolué à des vitesses supérieures à 100 km/h, ce qui a conduit à un léger effet de filé sur quelques images.

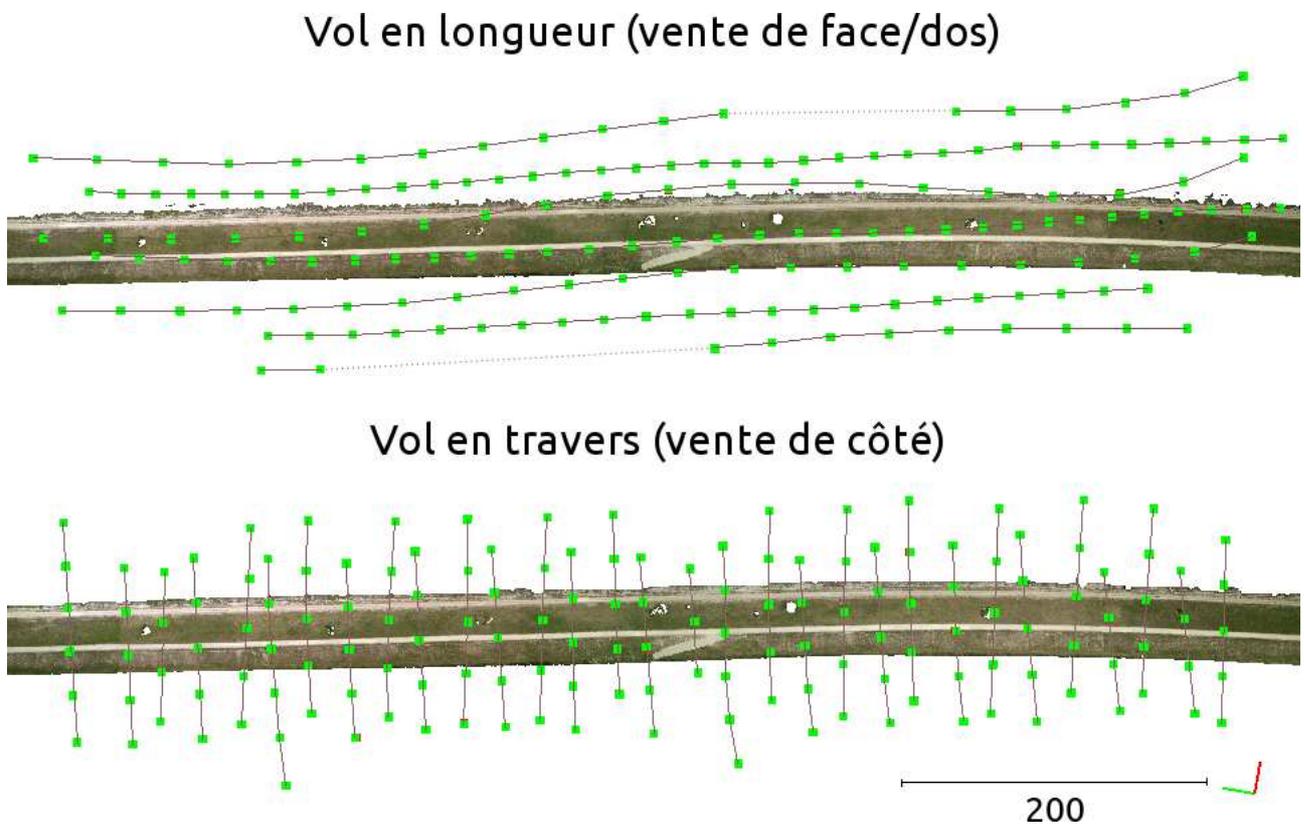


Figure 40: Position des clichés obtenus selon deux géométries d'acquisition. Le vol en travers de la digue peut sembler contre nature. Dans le cas de la digue d'Avignon, il nécessite près de trois fois plus de temps d'acquisition qu'un vol le long de la digue. Le réseau est cependant nettement plus régulier et les images de meilleure qualité

Les clichés sont légèrement bruités, avec de faibles aberrations chromatiques dans les coins. Les images étant prises au 1/1000, et la vitesse du drone en vol variant de 10 à 30 m.s⁻¹, on peut en déduire un flou de filé variant de 1 à 3 cm, soit près d'un pixel.

Le système développé par Delair Tech nécessite un équipement pointu pour répondre aux exigences sécuritaires de la DGAC (Figure 41). Il est composé :

- du vecteur aérien ;
- d'une station de pilotage ;
- d'une antenne motorisée assurant la communication jusqu'à 15 km.

Le décollage et l'atterrissage sont possibles depuis une digue large, mais il est préférable de cibler un terrain clair, en hauteur afin d'assurer une meilleure communication. Le retour vidéo a été possible jusqu'à une distance de 9 km, le passage du drone en dehors de l'horizon provoquant une perte du signal. Le vecteur peut néanmoins poursuivre son vol en autonomie.

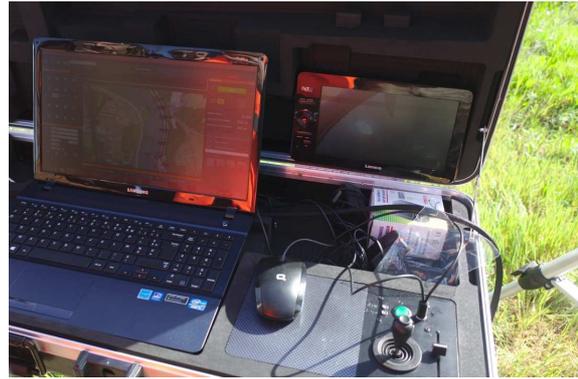


Figure 41: Station de contrôle du DT18

Afin de sécuriser la prise de vue, deux vols ont été effectués au dessus des 10 km de digue. En un peu moins d'une heure, le drone a donc parcouru plus de 40 km dans les airs (deux axes parallèles pour chaque vol), sans le moindre incident. Cela souligne l'intérêt des drones à voilure fixe, en tant que dispositifs endurants et autonomes. Ils apparaissent comme un outil propice aux travaux sur de longs linéaires. La communauté scientifique et industrielle souhaiterait cependant des améliorations au niveau des capteurs qu'ils embarquent.

3.3.2 DRONES À VOILURE TOURNANTE

MIKROCOPTER HEXAXL

Mikrocopter est une société allemande proposant des drones à voilure tournante. Prisés par les professionnels de l'image pour la finesse des paramètres accessibles, ils sont disponibles clés-en-main (*RTF : Ready To Fly*) ou en kit à monter (*ARTF : Almost RTF*).

Ces drones sont considérés comme relativement économiques, puisqu'ils sont disponibles à partir de quelques milliers d'euros (fortes variations selon les modèles). Nous avons fait appel à l'expertise de L'Avion Jaune pour nos premiers essais, puis le Service des Activités Aériennes de l'IGN s'est doté d'un tel appareil pour développer son activité (Figure 42).



Figure 42: Mikrocopter HexaXL de l'IGN avec le Sony DSC-RX1 sur une nacelle gyrostabilisée

Modulables, ils peuvent s'adapter automatiquement aux charges qu'ils embarquent, permettant d'obtenir une bonne qualité d'image (Figure 43). Le choix de l'appareil photographique repose généralement sur un compromis entre la qualité d'image et l'autonomie en vol.

Homologué pour le scénario S1, de petites modifications permettent d'obtenir une homologation en scénario S2 (ajout d'une sorte de boîte noire,...). L'intérêt est alors limité puisque son autonomie (environ 10 minutes) ne permet pas d'évoluer sur de longs linéaires dans de bonnes conditions. Nous noterons que les systèmes vieillissent relativement mal. Il faut renouveler régulièrement le parc de batteries, mais également veiller au bon état général de l'appareil. La présence de faux-contacts, un composant défailant ou même une vis mal serrée peuvent être des sources de crash.



Figure 43: Image acquise au Sony DSC-RX1 embarqué sur le Mikrocopter HexaXL. Les points d'appui sont nets, et l'image de très bonne qualité.

DRONESYS DS6-1200

DroneSys est une start-up Française spécialisée dans la mise au point de drones RTF conformes à la réglementation en vigueur. La société propose des solutions complètes testées et réglées en état de vol, ainsi que les documents nécessaires à leur homologation rapide auprès de la DGAC.



Figure 44: DroneSys DS6-1200

Remplaçant de l'HexaXL au SAA de l'IGN, le DS6-1200 (Figure 44) est habilité à

évoluer dans les scénarios S1, S2 et S3. Il embarque une électronique Mikrocopter « moderne » et une nacelle deux axes contrôlables à distance, permettant l'emport d'1kg de matériel avec une autonomie de 10 minutes.

Selon le retour du télé-pilote, ce dernier est beaucoup plus stable que le Mikrocopter. Il peut d'ailleurs évoluer avec des rafales de vents de 13 m.s^{-1} (acquisition Palliere-2015a). Les vibrations semblent mieux maîtrisées et la nacelle réactive, permettant l'acquisition d'images nettes (Figure 45). Le système a été testé avec le Sony DSC-RX1 et la Camlight de l'IGN.

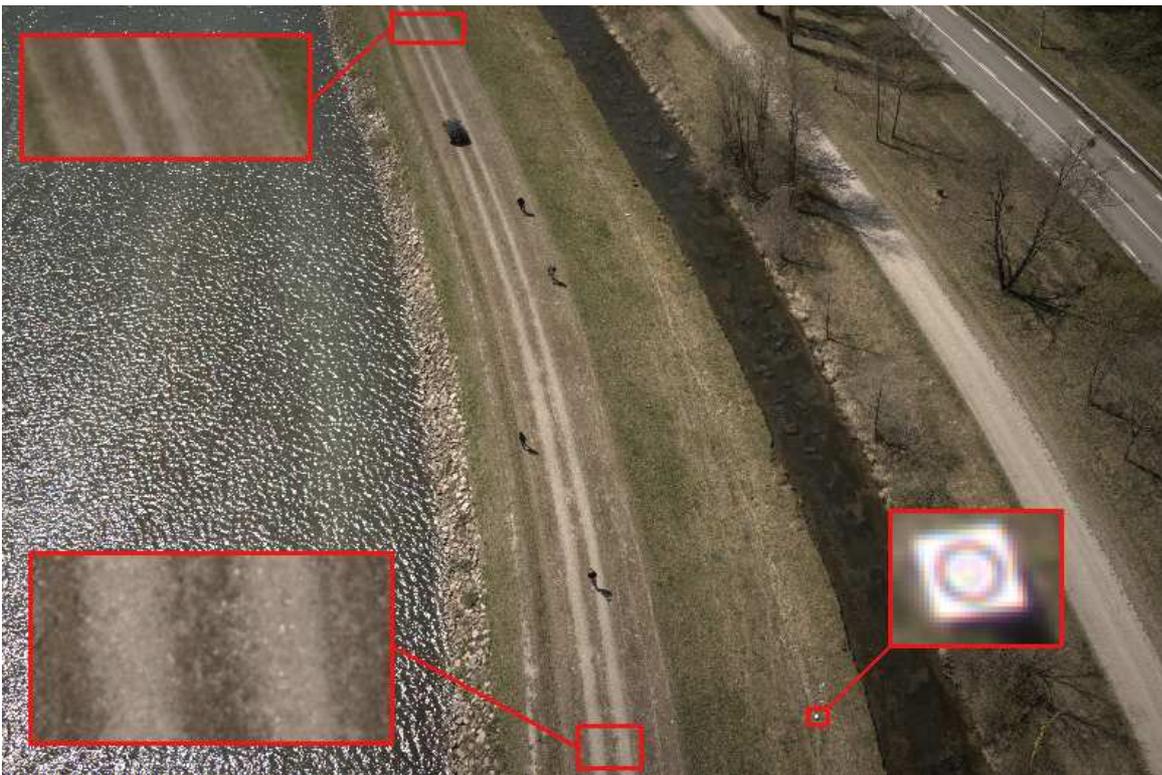


Figure 45: Image oblique acquise par le DS6-1200. La résolution est meilleure dans le bas de l'image ; les points d'appui clairement repérables.

RETOUR SUR EXPÉRIENCE

Les systèmes à voilure fixe étudiés ne répondant pas aux objectifs de la CNR, nous avons cherché à évaluer l'intérêt des drones à voilure tournante, dont la charge utile et les caractéristiques de vol permettent de s'adapter à des besoins plus spécifiques.

En volant moins haut et avec un capteur dont le SNR est plus élevé, les images acquises sont logiquement de qualité supérieure aux systèmes précédemment évalués. Les premiers essais ont cependant montré la nécessité d'un dispositif pour contrer les vibrations. Une nacelle gyro-stabilisée de bonne qualité est ainsi préférable. Son contrôle à distance permet de basculer l'axe de prise de vue afin d'acquérir des images obliques au cours d'un vol.

En cas de conditions météorologiques dégradées (de manière générale, vent supérieurs à 40 km/h), le drone est contraint à rester au sol. La vallée du Rhône, située entre le Nord de la France et la méditerranée est une zone particulièrement venteuse. Les masses d'air s'engouffrent régulièrement dans le couloir dessiné par le fleuve, nous poussant à rechercher des vecteurs complémentaires au drone, capables d'évoluer dans des conditions plus dégradées.

3.3.3 ULTRA-LÉGERS-MOTORISÉS (ULM)

Les drones à voilure tournante ont une autonomie trop faible pour être envisagés comme un outil opérationnel en cas de situation majeure sur de longs linéaires (crue, incident de navigation, séisme,...). L'intérêt des drones à voilure fixe pour ce type d'intervention est réel. Néanmoins ils se heurtent à des restrictions administratives en cas d'utilisation dans un espace aérien contrôlé, et la qualité d'image peut-être décevante.

De plus, les drones de masse inférieure à 25 kg sont généralement instables lorsque soufflent des rafales supérieures à 12 m.s^{-1} . Les ULM, de par la législation à laquelle ils doivent se soumettre, leur capacité d'emport et leur résistance, semblent fournir tous les éléments pour répondre à cette problématique.

HÉLICOPTÈRE ULM



Figure 46: L'hélicoptère ULM arrivant sur la digue à ausculter

Atlas3D, société issue d'un partenariat entre Vinci (acteur majeur du génie civil) et Ecartip (société d'ingénierie et topographie) a mis au point un système de mesure aérien léger (Figure 46). Sur un hélicoptère bi-place CH7 Kompress Charlie 2, un LiDAR Riegl VQ-480-U est embarqué, synchronisé avec une caméra Phase One iXA 180, et de nombreux outils permettant d'assurer le géoréférencement des données (centrale inertielle, récepteur GNSS,...). D'une masse maximale de 450 kg

au décollage, l'ULM peut emporter environ 30 kg de charge utile (variable en fonction de la quantité de carburant et du poids du pilote).

Le système peut être remorqué sur site, décoller (et atterrir) depuis (sur) une petite digue. Il dispose d'une autonomie en vol de 2h30, et peut ainsi relever quotidiennement plusieurs centaines de kilomètres linéaires. Évoluant régulièrement avec des vents (constants) de 80 km/h, ce vecteur se montre particulièrement efficace pour les problématiques de suivi de gros chantier (ex : ligne ferroviaire, tracé d'autoroute,...) [Vuitton 2012].



Figure 47: Le Sony DSC-RX1 35 mm (à droite) et la Camlight équipée d'un 85 mm (à gauche) accrochés sous l'hélicoptère

Le LiDAR embarqué offre une précision décimétrique. Ces données ne peuvent donc pas être utilisées pour un suivi fin des ouvrages hydrauliques. Il est néanmoins possible d'embarquer une ou plusieurs caméras (Figures 47 et 48), en complément de la PhaseOne utilisée pour la coloration du nuage de point LiDAR. Nous avons réalisé une expérimentation en couplant deux appareils photographiques avec des focales de 35 et 85 mm. L'idée est d'utiliser les images au 35 mm pour calculer les orientations, et celles au 85 mm pour calculer le modèle numérique. En volant à 150 mètres, on peut ainsi obtenir un modèle de résolution centimétrique.

Hormis quelques petits soucis électroniques avant le décollage, le relevé des 1100 mètres de digue de La Pallière s'est déroulé dans d'excellentes conditions. Grâce à son autonomie importante, il est possible de modifier le plan de vol pendant l'opération ou de demander des ajouts de dernière minute. Nous noterons que le vol est 100 % manuel, le pilote suivant au plus près une trace sur un fond de carte.



Figure 48: Images capturées par le Sony DSC-RX1 35 mm (à gauche), et par la Camlight 85 mm (à droite). Même en volant à 150 mètres, la Camlight peut acquérir des images d'excellente qualité

Le principal inconvénient de ce vecteur repose sur sa vitesse minimale, environ 10 m.s^{-1} selon les conditions météorologiques. À cette vitesse, les capacités d'enregistrement actuel des caméras peuvent être trop faibles pour garantir un recouvrement optimal.

ULM MULTI-AXES

Dans le cadre d'un travail de monitorat, une expérimentation par ULM trois axes a été menée avec les étudiants de la promotion G2011 de l'ENSG, afin d'établir un modèle 3D du site archéologique de Ganagobie (04) et de son environnement.

La charge utile de ce vecteur étant importante, quatre appareils photographiques ont été utilisés afin de limiter le risque de manque dans l'acquisition (Figure 49). Un premier Canon 5D Mark avec objectif Fisheye 8mm a permis d'obtenir une vaste couverture de la zone. Deux Nikon 1000D équipés d'objectifs de 18 mm ont été fixés pour obtenir des images obliques, et un 28 mm sur un boîtier Sony A850 fixé en visée nadir pour calculer le modèle 3D. Le déclenchement des caméras Canon et Nikon a été effectué par intervallo-mètre à 2 secondes, alors qu'une poire pressée par le copilote déclenchait l'appareil Sony.



Figure 49: Fixation de trois appareils photographiques sur le bord de l'avion. Un quatrième peut-être installé dans la trappe du cockpit

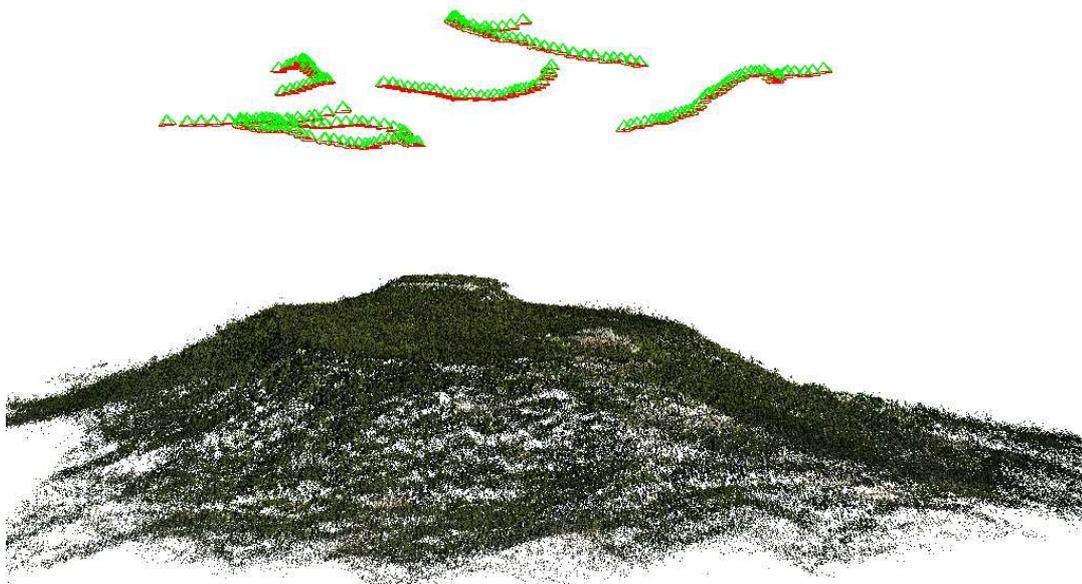


Figure 50: Résultat du calcul d'aérottriangulation (relatif). Position 3D des points homologues et des sommets de prise de vue orientés

La [Figure 50](#) montre que le site a pu être couvert dans son intégralité grâce à six axes de prise de vue. Néanmoins, on constate de fortes variations altimétriques. Trois axes (à gauche de l'image) sont même presque identiques, ce qui souligne la difficulté de ce type de vecteur à suivre un plan de vol précis.

RETOUR SUR EXPÉRIENCE

L'ULM est un moyen aérien qui peut décoller et atterrir depuis un terrain qui n'a pas été aménagé à cet effet. Pour l'acquisition de Ganagobie avec l'ULM multi-axes, le décollage a eu lieu depuis le jardin du pilote. On pourrait donc envisager un décollage depuis une digue dans le cas d'un avion remorqué sur site, tel qu'effectué avec l'hélicoptère. L'atterrissage sur digue ne pose pas de problème pour l'hélicoptère. Il est aussi possible avec un avion mais certainement plus risqué. La présence de nombreux aérodromes autour des sites étudiés, et de manière générale sur l'ensemble du territoire métropolitain, confère à ces vecteurs un intérêt certain.

La prise de vue, déclenchée jusqu'ici par intervallo-mètre ou manuellement, peut tout aussi bien être effectuée de manière plus organisée (déclenchement autour de *waypoints*). Cependant la trajectoire de ces vecteurs - pilotés manuellement – est moins stricte que celle suivie par un pilotage automatique. Le déclenchement à intervalles réguliers (toutes les 2 secondes) nous semble préférable puisqu'il permet d'éviter les bugs d'écriture dus à une *bufferisation* trop importante de la mémoire. Par ailleurs, l'emploi de matériels professionnels tel que la Camlight embarquant des disques SSD plus rapides permettra de réduire considérablement ce risque.

Plus robustes aux vents qu'un vecteur de quelques kilogrammes, les ULM constituent une alternative fiable au drone lorsque les conditions météorologiques sont tempérées. Lors de l'acquisition Pallière-2015a, des vents de 40 km/h ont été enregistrés. Le DS6-1200 a pu effectuer le relevé, au prix de quelques images floues et d'une autonomie en vol réduite de moitié. Ce sont néanmoins les conditions limites au-delà desquelles un drone à voilure tournante ne peut plus naviguer en sécurité. Le relevé par ULM hélicoptère mené dans les mêmes conditions n'a posé aucun problème.

3.4 MÉTHODES D'ACQUISITION

Les photogrammètres ont beaucoup étudié les configurations de vol pour les besoins de restitution d'acquisitions aériennes [[Kraus 2007](#) ; [Warner et al. 1998](#)] et terrestres [[Olague 2002](#) ; [Saleri et al. 2013](#) ; [Nocerino et al. 2014](#)].

Récemment, la communauté s'est penchée sur les acquisitions par drones [[Eisenbeiss et Sauerbier 2011](#) ; [Laliberte et al. 2010](#) ; [Eisenbeiss 2009](#)]. Les études de [[Nocerino et al. 2014](#) ; [Wu 2014](#) ; [James et Robson 2014](#)], ont particulièrement

étudié les configurations « cirtiques », cas où la géométrie de l'acquisition complexifie le calcul des orientations. James propose d'inclure - dans un relevé principalement nadir - quelques images obliques ($\sim 30^\circ$), ce qui selon ses simulations numériques permettrait d'éviter les dégénérescences les plus fortes. Sur des acquisitions linéaires terrestres (un seul axe de prise de vue), Nocerino propose d'inclure tous les quatre sommets deux images obliques ($\sim 45^\circ$) prises dans des directions opposées. Pour des acquisitions aériennes, Nocerino suggère d'effectuer un vol à une hauteur intermédiaire, permettant d'obtenir une taille de pixel moyen identique à celle des images nadir (Figure 51).

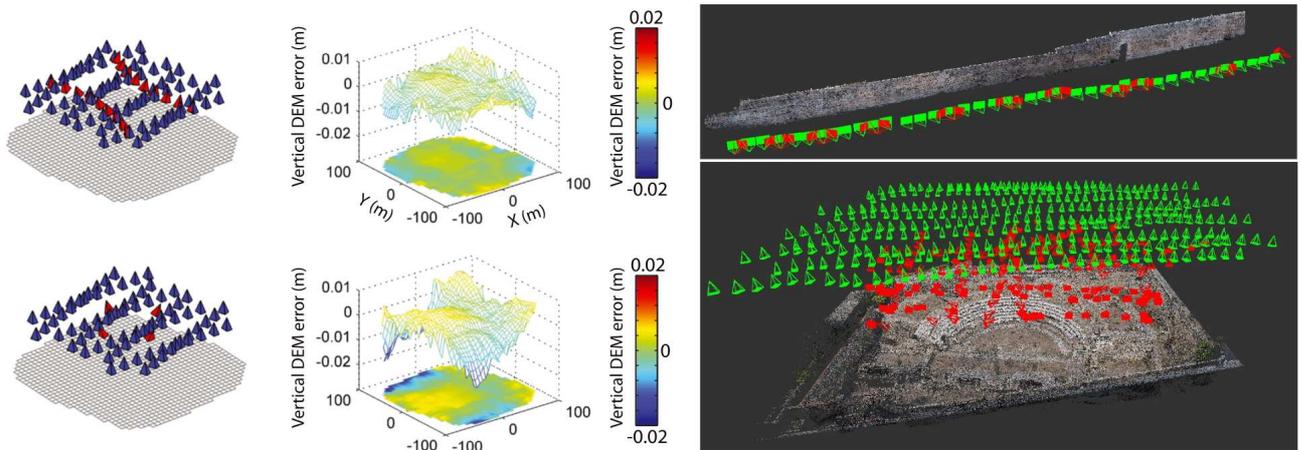


Figure 51: Extrait des simulations menées par James (à gauche), et stratégies d'acquisition proposées par Nocerino (à droite)

3.4.1 ACQUISITIONS NADIR CENTIMÉTRIQUES

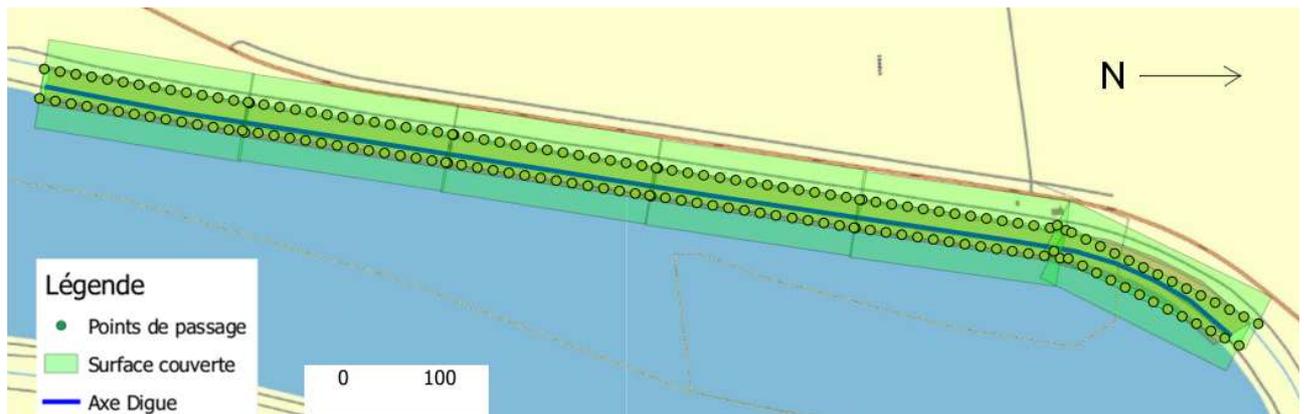


Figure 52: Plan de vol type pour une acquisition nadir en scénario S1

Les acquisitions nadir de résolution centimétriques ont été menées avec les drones à voilure tournante, dans le cadre du scénario S1. Il s'agit des relevés menés sur La Pallière, Rochemaure, et Avignon-S1. Embarquant un appareil photographique plein format (Sony DSC-RX1 24MP ou Camlight 20 MP) avec objectif de longueur focale 35 mm, les plans de vol ont été effectués selon le cahier des charges suivant :

- recouvrement longitudinal et transversal : 80 %;

- deux axes de vols parallèles parallèles couvrant entièrement la digue ;
- hauteur de vol : 60 mètres ;
- prise de vue : vitesse d'obturation fixe au 1/1000, ouverture et sensibilité ISO fixes (en fonction des conditions lumineuses), mise au point à l'infini et enregistrement des images brutes ;

L'évolution en scénario S1 contraint le drone à évoluer dans un rayon de 100 mètres autour du télépilote. Il est donc nécessaire de découper les ouvrages en petits tronçons, et d'enchaîner les vols afin de le couvrir en intégralité (Figure 52).

3.4.2 ACQUISITIONS OBLIQUES

À la suite des études de [Nocerino et al. 2013 ; Wu 2014 ; James et Robson 2014], nous avons cherché à évaluer l'apport des images obliques sur les chantiers de la CNR.

Par contraintes économique et matérielle, nous n'avons pas pu évaluer toutes les solutions proposées par la littérature. Néanmoins, deux acquisitions (Pallière-2014 et Pallière-2015) ont été menées en ajoutant aux plans de vol nadir, un second passage pour lequel l'axe de prise de vue a été basculé de 45°. Effectuées à la même hauteur de vol sur deux axes, les prises de vue obliques sont en sens contraire, le drone faisant un demi-tour pour parcourir le second axe, l'appareil photographique dirigé vers l'avant.

Afin de couvrir les mêmes linéaires, et spécifiquement le début et la fin de la zone d'acquisition, le premier axe de vol (à l'est) est décalé d'une distance égale à la hauteur de vol vers le sud (60 mètres), alors que le second est décalé de la même distance vers le nord (Figure 53).

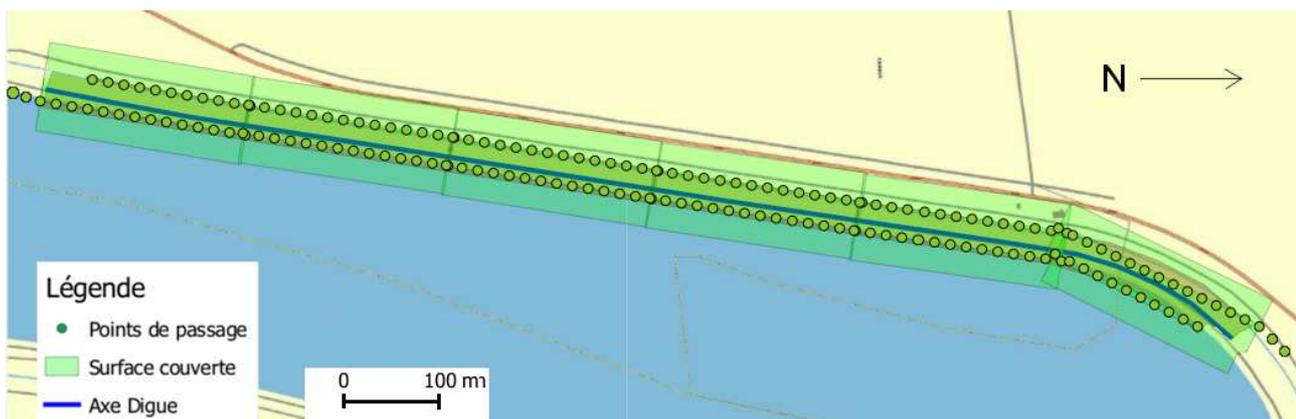


Figure 53: Plan de vol type pour une acquisition oblique en scénario S1

3.4.2 ACQUISITIONS MULTI-CAPTEURS

La charge utile des ULM n'étant pas un facteur limitant en photogrammétrie, le jeu de données acquis par la plate-forme hélicoptère ULM (Pallière-2015-ULM) a permis de mesurer la digue de La Pallière avec de multiples capteurs :

- le Sony DSC-RX1 avec son optique 35 mm ;
- la Camlight de l'IGN avec un objectif de 35 mm (intérêt : évaluation de la Camlight par rapport au Sony-DSC-RX1, les deux prises étant synchronisées, et les sommets relativement similaires) ;
- la Camlight de l'IGN avec un objectif de 85 mm (intérêt : résolution d'1 cm en volant à 150 mètres, soit la même résolution qu'en volant à 60 mètres avec un 35 mm) ;
- le système LiDAR Riegl embarqué sur l'ULM (intérêt : évaluation de la précision du système).

Le jeu de données acquis avec l'ULM trois axes ne sera pas détaillé dans cette étude. D'une part, cette acquisition en bloc ne présente pas les mêmes risques de dégénérescence tels qu'observés sur des ouvrages linéaires. D'autre part, s'agissant d'une acquisition menée avec des étudiants, nous n'avons pas pu obtenir une vérité terrain assez précise pour évaluer la qualité des mesures effectuées.

Cependant, d'un point de vue opérationnel, il est assez simple d'installer plusieurs appareils sur un même vecteur, et de synchroniser les prises de vues soit avec un logiciel (généralement lorsque plusieurs caméras d'un même constructeur sont disponibles), soit en utilisant un intervallo-mètre, ou encore en déclenchant manuellement la prise de vue (avec une poire par exemple).

3.5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons étudié trois catégories de vecteurs aériens légers :

- les ULM, pionniers de l'aviation et de la photographie aérienne. Adaptés aux grands linéaires de par leur endurance, ils offrent l'avantage de pouvoir emporter des charges utiles importantes (plusieurs dizaines de kilogrammes). Alors que le modèle hélicoptère permet de suivre un plan de vol assez strict, les avions multi-axes peuvent être perturbés par des conditions météorologiques instables.
- les drones à voilure fixe. Des solutions clé-en-main permettent une acquisition rapide d'une zone vaste, mais leur utilisation est complexe des secteurs aériens contrôlés. Par ailleurs, leur faible capacité d'emport contraint les vecteurs évalués à acquérir des images de relativement faible qualité.
- les drones à voilure tournante dits multicoptères. Ces vecteurs permettent de sélectionner des charges utiles en accord avec les besoins d'une mission donnée. L'autonomie de ces engins est leur principal point faible. L'évolution en scénario S1 est également un inconvénient puisqu'elle

implique de nombreux décollages/atterrissages, et augmente donc les risques de défaillance.

L'explosion de l'offre d'acquisition par drone est réelle (de 100 opérateurs fin 2012 à près de 2000 mi-2015). Elle pourrait tendre à marginaliser l'ULM en tant que vecteur d'acquisition. Nous noterons cependant que le nombre d'ULM en circulation est lui aussi en constante augmentation depuis 2010 (Table 3), et reste encore trois fois plus importante.

Porteur	2010	2011	2012	2013	2014	mi-2015
ULM Multiaxes	5110	5264	5344	5568	5802	n.a.
ULM Autogire	426	473	536	599	634	n.a.
ULM Hélicoptère	0	0	29	59	66	n.a.
Drone	0	0	100	500	1300	2000

Table 3: Évolution du nombre d'appareils enregistrés à la DGAC. Source : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Statistiques-ULM,12288.html> pour les statistiques ULM, recensement personnel pour les statistiques drone

Au cours de nos essais, les drones ont montré quelques défauts électroniques mineurs. Synonymes d'une perte de temps (30 minutes à 2 heures), ils ont pu être réparés relativement rapidement. Ils soulignent néanmoins que le drone n'est pas (encore) un outil technologiquement vulgarisé. Selon [Assenbaum 2014], il faudrait d'ailleurs envisager un volume de 20 acquisitions par an pour qu'un investissement soit rentabilisé. En deçà, l'appel à des professionnels serait plus intéressant aussi bien d'un point de vue opérationnel qu'économique.

CHAPITRE 4

4 - ESTIMATION DES POSES

L'estimation des poses est le problème dans lequel on cherche à déterminer les paramètres d'orientation interne (paramètres de calibration) et externe (position et orientation des caméras) d'une série d'images.

Il faut distinguer les orientations relatives (calculées dans un repère local et donc non géoréférencées, pas forcément à l'échelle), les orientations absolues « basculées » (résultat d'une similitude spatiale, §5.1) et les orientations absolues « compensées » (ajustement par la méthode des faisceaux en incluant des mesures terrain – ou autres méthodes, §5.2 et suivants).

Les orientations relatives sont nécessaires au calcul des orientations suivantes. Il n'est toutefois pas toujours nécessaire de basculer ou de compenser les orientations selon l'application désirée (par exemple : la modélisation d'une statue ou d'un visage à des fins de communication, pour des effets spéciaux,...).

Le chapitre précédent a présenté les stratégies d'acquisition déployées sur les digues de la CNR. Nous présentons ici les difficultés rencontrées lors de l'estimation des poses sur ces géométries. Nous nous limitons dans ce chapitre au calcul des orientations relatives, et présentons des solutions pour limiter au maximum les dérives. La procédure présentée correspond à la logique implémentée dans *Apero*, le module de calcul de *MicMac*.

4.1 ORIENTATION D'UNE SÉRIE D'IMAGES

4.1.1 PRINCIPE GÉNÉRAL

Une prise de vue à paramètres constants telle que recommandée §3.2.3 présente l'intérêt de réduire le nombre d'inconnues à déterminer. En fixant l'ouverture, la vitesse et la balance des blancs, les images sont de radiométrie constante (hors changement de luminosité), ce qui est utile pour une meilleure détection de points homologues (discutable selon l'algorithme de détection employé, cela a néanmoins un intérêt pour la corrélation dense). En outre, une mise au point fixe et sans changement de focale, permettent de définir un modèle caméra unique qui peut être appliqué à l'ensemble de la scène.

Embarqué sur un drone et donc soumis à des vibrations, cette affirmation est très certainement discutable. Des essais de calibration individuelle, pour lesquels les valeurs de la focale et du point principal sont relâchés, ont été menés au début de nos recherches. Les résultats étant peu probants, nous discuterons ici uniquement du calcul d'orientation d'une série d'images pour lequel les paramètres intrinsèques sont considérés constants.

Dans le cas d'une caméra sans distorsion et en se plaçant dans le repère caméra, le

point terrain $T = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ se projette sur le plan image aux coordonnées $\begin{pmatrix} i - PP_x \\ j - PP_y \\ -F \end{pmatrix}$.

Les vecteurs étant colinéaires et λ étant un coefficient multiplicatif, on peut

écrire : $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} i - PP_x \\ j - PP_y \\ -F \end{pmatrix}$.

Soient u et v tels que $u = x/z$ et $v = y/z$

On en déduit la direction des rayons : $\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = -\lambda \begin{pmatrix} (i - PP_x)/F \\ (j - PP_y)/F \\ 1 \end{pmatrix}$

d'où : $i = PP_x + F \frac{x}{z}$ et $j = PP_y + F \frac{y}{z}$.

Soit \mathfrak{S} une application de R^2 dans R^2 décrivant les paramètres internes,

D une application de R^2 dans R^2 décrivant la distorsion optique,

et π la projection canonique de R^3 dans R^2 qui à chaque point associe sa direction de rayon.

Avec une caméra sans distorsion, $\mathfrak{S} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = PP + F \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$

Avec une caméra réelle, on écrit : $\mathfrak{S} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = D \left(PP + F \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \right)$.

En notant $\pi \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$, on a alors : $\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \mathfrak{S} \left(\pi \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right)$.

Soit un ensemble n de caméras de centre C_k et d'orientation R_C^k . À des points homologues multiples $I_k(i, j)$ déterminés avec une précision σ_{pix} (généralement autour de 0.5 pixels) correspondent par intersection de faisceau des

points terrain $T_k(X, Y, Z)$ si et seulement si : $I_k = \mathfrak{I}(\pi(R_C^k(T_k - C_k)))$

On pose pour chaque couple de points homologues les équations, et on cherche à

minimiser la fonction $E = \sum_{k=1}^n \frac{(I_k - \mathfrak{I}(\pi(R_k(T_k - C_k))))^2}{\sigma_{pix}}$.

Une astuce mathématique (le complément de Schur) permet de substituer des inconnues. Il ne reste alors plus qu'à déterminer les paramètres internes et externes des caméras (6 inconnues par caméra - 3 pour la position et 3 pour l'orientation). Le problème est fortement non linéaire et sur-contraint. On procède donc à une linéarisation et à une résolution par les moindres carrés. La linéarisation peut être effectuée selon plusieurs méthodes :

- manuellement : long et source d'erreur ;
- pseudo-dérivée par différences-finies : $\frac{\partial F}{\partial x_k} = \frac{F(X + \varepsilon_k) - F(X - \varepsilon_k)}{2\varepsilon_k}$

plus simple mais long et définition délicate de ε_k

- génération automatique de code formel : démarche employée par *Apero*
- dérivation automatique de code formel (*Sparse Bundle Adjustment* [Lourakis et Argyros 2009])

4.1.2 PRINCIPE SUIVI PAR APERO

La stratégie suivie par *Apero* peut être décomposée en deux étapes :

- initialiser à des valeurs convenables toutes les orientations externes à partir d'un modèle caméra basique (distorsion très faible) et constant ;
- libérer les paramètres internes un à un tout en ajustant au cours des itérations aussi bien les paramètres internes qu'externes, en faisant appel à l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour limiter le risque de divergence.

À partir d'un jeu de points homologues, un arbre d'initialisation est donc construit en sélectionnant l'image qui offre le plus de recouvrement avec la série. Les images secondaires sont ajoutées dans un ajustement des faisceaux, en veillant à ce que la quantité et la répartition des points homologues soient optimales. Pour cela, la matrice inertielle du nuage de points homologues est calculée, et l'estimateur utilisé est sa plus petite valeur.

L'image maîtresse va constituer l'origine du repère. Un premier modèle de caméra – approximatif – est estimé à partir du format de l'image (PPA/PPS au centre et non distincts) et des données exif (taille du capteur, valeur de la focale), et pour lequel la distorsion initiale est nulle. Une ou plusieurs images filles sont alors

orientées en utilisant la matrice essentielle [Longuet Higgins 1981] couplée à l'algorithme RANSAC [Fischler et Bolles 1981] pour une initialisation rapide, mais aussi par relèvement spatial [Tommaselli et Tozzi 1996] si suffisamment de points homologues ont été détectés. La meilleure des deux solutions est sélectionnée *a posteriori*.

Un ajustement global par la méthode des faisceaux est alors exécuté afin de limiter le risque de divergence. Pour cela, le module suit la stratégie suivante (Figure 54) :

- chaque couple de points homologues est projeté en géométrie terrain à partir des valeurs d'orientations calculées à ce stade (pseudo-intersection des rayons perspectifs) ;
- les points homologues en géométrie terrain sont reprojétés dans les images ; on calcule alors pour chaque point la différence entre ses coordonnées initiales et leur reprojexion ;
- la somme des écarts de reprojexion dans les N images est calculée. Ce terme, qui dépend de trois paramètres (les coordonnées 3D, l'orientation interne, l'orientation externe), est ajouté à la fonction d'énergie à minimiser ;
- le terme est linéarisé en prenant pour valeurs initiales celles calculées à ce stade.

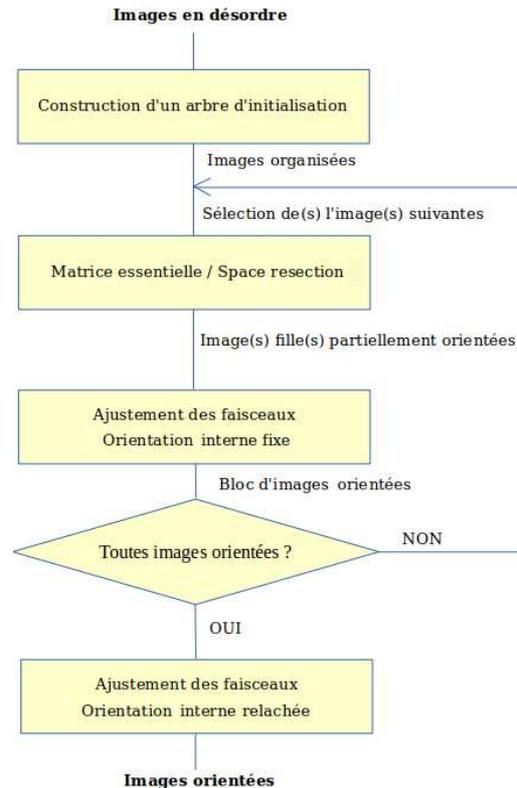


Figure 54: Stratégie suivie pour le calcul des orientations

La résolution intervient après itérations de la méthode des moindres carrés pondérés avec rejet des *outliers*. Ce problème a fait l'objet de nombreuses études, dont [Triggs et al. 2000] proposent une synthèse. Les détails mathématiques du calcul sont décrit en Annexe C de [Pierrot-Deseilligny et al. 2015].

Comme tout problème résolu par la méthode des moindres carrés, la précision de la solution est sujette à la qualité des observations et à une pondération juste de celles-ci. Appliqué sur des acquisitions linéaires, ce problème est crucial puisqu'il conduit à des imprécisions fortement marquées sur la composante altimétrique.

4.2 MÉTHODES DE CONTRÔLE DES ORIENTATIONS

Le contrôle des orientations est nécessaire pour assurer la qualité de la restitution 3D d'un site. Plusieurs niveaux de contrôle sont utilisés :

- contrôle visuel : visualisation des positions/orientations des caméras et des points homologues en 3D. Ce contrôle est efficace pour repérer les plus grosses erreurs (Figure 55).

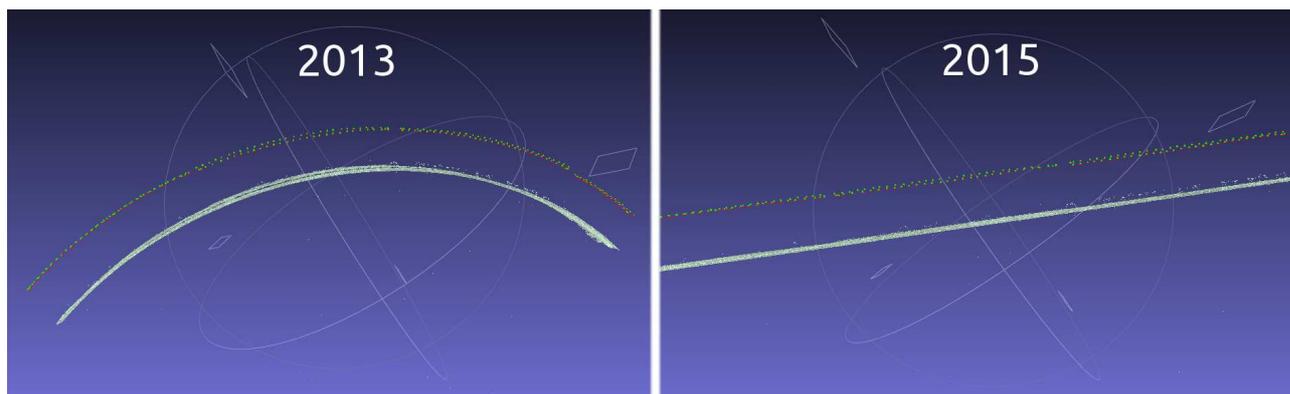


Figure 55: Orientations et points homologues dans un cas aberrant (image de gauche) et dans un cas maîtrisé. Le contrôle visuel permet de repérer les erreurs les plus marquantes mais son intérêt est limité par la suite.

- contrôle par des mesures terrain : à partir de points terrains qui ont été localisés dans les images individuelles, il est possible de géoréférencer les orientations (§5.1). Pour chaque point mesuré, on peut donc calculer des erreurs de reprojection (Figure 56) :

- terrain (en mètres) : différence entre les coordonnées terrain (mesurées par topométrie par exemple) et celles obtenues par intersection des faisceaux.
- image (en pixels) : différence entre des coordonnées image (saisie par un utilisateur ou détectées automatiquement) et celles obtenues en reprojectant un point 3D dans une image.

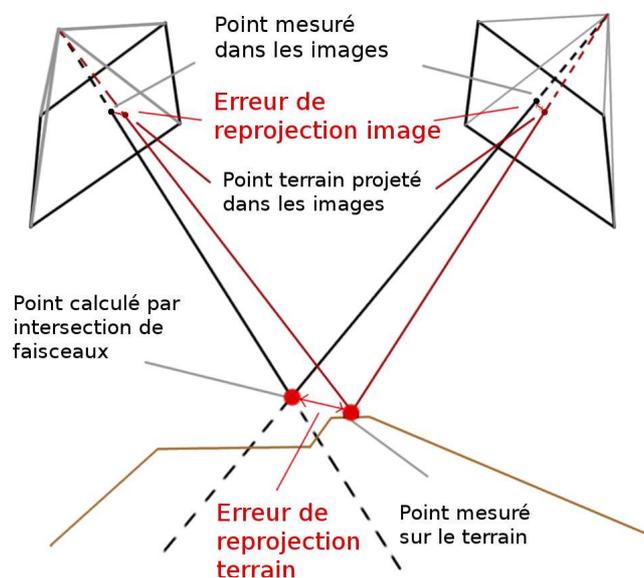


Figure 56: L'écart entre la réalité terrain et le résultat de la photogrammétrie peut être estimé en géométrie terrain et en géométrie image.

- contrôle avec une vérité terrain : comparaison des coordonnées du centre optique (calculé par photogrammétrie) avec celui déterminé par un récepteur GNSS [Stempfhuber 2013], ou par métrologie (ex : mesure du

déplacement du centre optique [Tournadre et al. 2014], Annexe 3 du second Tome).

Nous nous intéresserons principalement au contrôle des erreurs de reprojection terrain. Travaillant avec des ouvrages linéaires, l'évolution de l'erreur de reprojection terrain le long du profil permet d'une part d'analyser les précisions atteintes à des emplacements donnés, et d'autre part de repérer des systématismes éventuels (effet de courbure, présence d'*outliers*,...).

Dans ce chapitre, contrairement au suivant dans lequel nous introduirons les principes de compensation, nous ne différencions pas points d'appui et points de contrôle pour deux raisons :

- plus on utilise de points pour déterminer les sept paramètres de la similitude spatiale, plus celle-ci est robuste ;
- nous utilisons ces données pour comparer des orientations relatives qui sont définies à une similitude près, et non pour qualifier leur précision.

4.3 OPTIMISATION DE L'AJUSTEMENT DES FAISCEAUX

4.3.1 CRITÈRE DE CONVERGENCE

Dans la version initiale du logiciel (jusqu'à mi-2014), la convergence était considérée comme atteinte une fois un certain nombre d'itérations effectuées.

Cette stratégie a été mise en échec par certains essais au cours desquels, en reprenant les résultats d'une orientation donnée, de nouvelles itérations permettaient d'améliorer les résultats (erreurs de reprojection terrain sensiblement plus faibles après le second calcul).

Afin d'unifier la robustesse du calcul d'orientation, un test de convergence est désormais effectué. Le test compare l'écart ε entre deux pseudo-intersections P_i et P_{i+1} d'un point homologue aux itérations i et $i+1$, et le met en rapport avec la distance moyenne par rapport aux caméras de centres C_1 et C_2 :

$$\varepsilon = \frac{Dist(P_i \rightarrow P_{i+1})}{\frac{Dist(P_{i+1} \rightarrow C_1) + Dist(P_{i+1} \rightarrow C_2)}{2}}$$

Si $\varepsilon < 10^{-10}$, la convergence est considérée comme atteinte. Sinon, les itérations continuent. Un garde-fou permet de considérer le système comme résolu si la boucle tourne en rond. Ce critère, qui peut être jugé très restrictif, nous semble nécessaire dans le cadre d'applications métrologiques où le temps de calcul n'est pas prioritaire.

4.3.2 VISCOSITÉ SUR LES ORIENTATIONS INTERNES ET EXTERNES

L'algorithme de Levenberg-Marquardt [Moré 1978], réputé pour permettre la convergence des géométries mal conditionnées, est utilisé au cours de la résolution du système. En appliquant un coefficient dit de *viscosité* sur les orientations externes, on peut s'assurer qu'entre deux itérations, les déplacements des caméras soient limités à un certain intervalle. Le choix de ce critère est problématique :

- trop fort, la convergence est inutilement ralentie et de nombreuses itérations nécessaires ;
- trop faible, cela peut conduire à des divergences.

Le coefficient initialement choisi n'était pas optimal. Une valeur plus faible d'un facteur 10 permet d'accélérer la résolution du système tout en gardant une très bonne robustesse face aux dérives. Avec un critère de convergence mal défini, un coefficient trop fort peut aussi résulter en une solution plus fortement dégradée.

Un tel paramètre a également été ajouté sur les orientations internes, initialisé à une valeur d'un dixième du critère fixé sur les orientations externes. Cela permet, lorsque le modèle caméra est relâché, d'ajuster graduellement les orientations externes au fur et à mesure de la libération des paramètres.

Ces améliorations ont permis d'éviter les cas les plus dégénérés ; les phénomènes de courbure repérables par un simple contrôle visuel sont ainsi évités. Il est alors possible d'obtenir un modèle visuellement sans défaut sur des géométries dites critiques. Cependant, cette correction n'est pas suffisante à elle seule pour corriger le problème, les erreurs de reprojction des points de contrôle étant toujours élevées (de l'ordre du mètre). Elle permet d'atteindre le minimum de la fonction d'énergie, mais ne corrige pas l'espace des paramètres ni la fonction elle-même. On peut donc isoler deux sources possibles des effets de courbure :

- des points homologues trop bruités, ou dont la pondération n'est pas efficace pour rejeter les *outliers* ;
- un modèle caméra inadapté aux déformations.

4.4 POINTS HOMOLOGUES

4.4.1 ESTIMATION

La détection et l'appariement automatique de points homologues est un problème qui a trouvé de nombreuses solutions au cours des trente dernières années. Nécessaire pour le calcul des orientations, la création d'un jeu de points homologues entre des images se déroule en trois étapes :

- Détection de points d'intérêt : il s'agit de localiser des points saillants.

- Description des points d'intérêt : recherche d'une description mathématique décrivant la nature du point et de son environnement.
- Appariement des points : mise en relation des points aux caractéristiques communes pour former des couples.

Plusieurs travaux ont été publiés menant à des détecteurs de coins [Harris et Stephens 1988], de bords [Canny 1986] ou de régions d'intérêt [Lowe 1999 ; Lowe 2004a]. Dans la suite *MicMac*, les points homologues sont détectés via le module *Pastis*, accessible à travers l'interface *Tapioca*. Cet outil reprend le code publié par [Vevaldi 2010], qui est une implémentation en C++ de l'algorithme SIFT.

L'algorithme effectue dans une même opération la détection et la description de points saillants. Repérés à partir d'une différence de Gaussienne, un ensemble de points caractéristiques est décrit par un vecteur à 128 dimensions représentant le gradient d'image dans une région donnée.

Invariant aux translations, rotations, changements d'échelle et de contraste, et relativement robuste au bruit et à la compression JPG [Mikolajczyk et Schmid 2005], SIFT est largement utilisé par la communauté. Nous noterons que dans les pays ayant mis en place une protection intellectuelle des logiciels informatiques (par exemple aux États-Unis), l'algorithme est protégé de tout usage commercial par un brevet [Lowe 2004b]. D'autres solutions sont utilisables comme par exemple *Kaze* [Alcantarilla et al. 2012].

La phase d'appariement consiste à repérer des similarités entre les descriptions de points caractéristiques, en calculant les distances euclidiennes entre les vecteurs (cas de descripteurs composés de nombres réels). Les (dizaines/centaines de) milliers de points caractéristiques détectés par SIFT peuvent être comparés un à un au prix d'un temps de calcul conséquent. ANN (Approximate Nearest Neighbors) [ANN 2010] simplifie le problème en construisant un arbre binaire qui permet une recherche accélérée de similarités.

Quelques éléments sont alors isolés, et un filtre est appliqué pour sélectionner les points ayant les meilleures correspondances. Ce filtre peut agir en comparant les distances euclidiennes entre deux vecteurs. Plusieurs niveaux de filtrage peuvent être appliqués [Moulon 2014 ; Rabin et al. 2008] : en sélectionnant les descripteurs ayant le plus de ressemblance (peu de rejet d'*outliers*), ceux dont la ressemblance dépasse un score donné (critère général), ou encore le point - parmi les deux plus proches - ayant le meilleur score de ressemblance si le ratio entre les deux distances ne dépasse pas un certain seuil (permet d'exclure des points ressemblants, propices aux erreurs). Cette dernière approche est adoptée par la suite *MicMac*, en fixant un ratio maximal de 0.6.

4.4.2 RÉSULTATS

La détection et l'appariement en utilisant SIFT et ANN, bien que réputée robuste, nécessitent une allocation mémoire conséquente. Ainsi, traiter des centaines d'images va nécessiter un temps de calcul important, et créer beaucoup plus d'informations que les six points par couple strictement nécessaires à la résolution des équations (Figure 57). Si aucune sélection n'est effectuée, ces données doivent être chargées dans la mémoire vive pour calculer les orientations. En travaillant sur les 621 images de Palliere_2014b en pleine résolution, cela représente environ 55 Go de mémoire, et nécessite plusieurs jours de calcul.

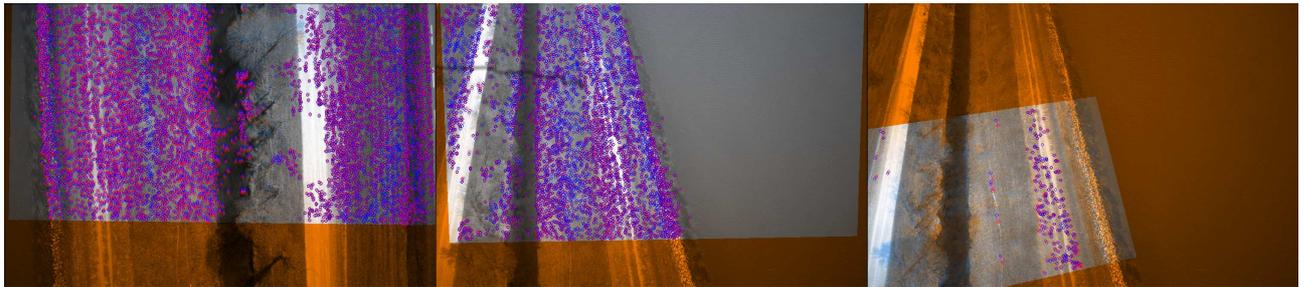


Figure 57: Détection et appariement automatisé des points homologues sur des images sous-résolues d'un facteur 4. Entre deux images verticales (à gauche) ou entre deux images obliques (au centre) les points sont nombreux hormis dans les zones végétalisées, sur l'eau et les surfaces peu texturées, ce qui limite les risques d'outliers. Entre une image oblique et une image verticale (à droite) peu de points sont détectés. Les images acquises à partir de points de vue très différents compliquent la détection de points de liaison, qui reste cependant possible et suffisante pour relier les blocs. Si le résultat est jugé insuffisant, d'autres détecteurs tels ASIFT [Morel et Yu 2009] sont plus performants dans ces configurations.

Pour accélérer la procédure, il est possible de travailler sur des images sous-résolues. Les opérations sont alors beaucoup plus rapides, mais sujettes à des dérives (Figure 58). En réduisant les images d'un facteur 4, les dérives sont relativement maîtrisées. Sur un jeu de 180 images, le gain de temps de calcul pour la détection est appréciable (1h30 contre 36h en pleine résolution), et d'autant plus pour le calcul des orientations (5h30 contre 123h), alors que 540 Mo de RAM sont nécessaires dans le premier cas, contre 5,4 Go dans le second.

Face à ces constats, deux voies s'ouvrent :

- optimiser les algorithmes de détection et d'appariement afin de limiter la quantité de points tout en veillant à leur bonne répartition dans les images ;
- optimiser le calcul des orientations afin d'obtenir des résultats conformes aux attentes en utilisant des images sous-résolues.

La première voie sous-entend que la sous-résolution des images implique un bruit de détection, source des dérives altimétriques paraboliques constatées sur les ouvrages linéaires. Aucune étude n'ayant à notre connaissance prouvé cette théorie, nous avons cherché à l'évaluer par la voie d'une simulation numérique.

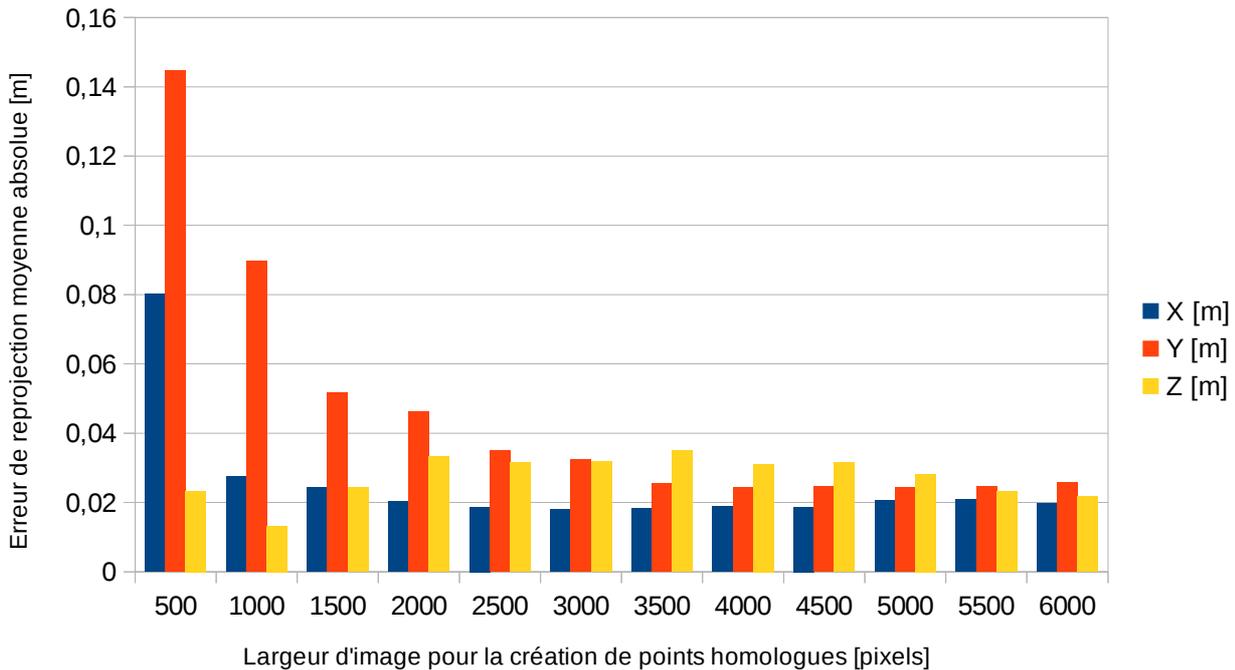


Figure 58: Évolution de la dérive en fonction de la sous-résolution des images utilisées pour la détection des points homologues. Sur une acquisition où la courbure de bande est relativement maîtrisée, le diagramme montre logiquement que plus les images sont compressées (largeur initiale de 6000 pixels), plus l'erreur est importante. Jusqu'à un facteur de sous-résolution de 4, la perte de précision est relativement acceptable. Au-delà, des dérives planimétriques importantes se manifestent.

4.4.3 SIMULATION

Afin d'analyser l'influence de points homologues bruités sur le calcul des orientations, un simulateur a été créé selon la procédure suivante :+

- création d'un modèle numérique de terrain à partir d'un jeu de 180 images ;
- sélection de points aléatoirement dans une boîte englobante de 50x50 pixels parcourant le MNT ;
- reprojection de ces points 3D dans les images, à partir des orientations utilisées pour calculer le MNT ;
- les orientations initiales sont alors considérées parfaites, et les points reprojétés dans les images forment un jeu de points homologues parfaits (un ajustement des faisceaux en figeant le modèle caméra donne strictement les mêmes orientations externes) ;

- ajout de bruit blanc sur les positions 2D des points homologues, et ajustement des faisceaux en utilisant les données bruitées, le modèle caméra étant figé puisque considéré parfait.

En comparant les orientations « bruitées » avec celles d'origine, on peut donc estimer l'influence d'un bruit blanc sur le calcul des orientations. Pour être cohérent avec la réalité d'une acquisition, la multiplicité des points homologues a été limitée, et des parties cachées simulées.

En fixant diverses valeurs maximales de bruit (de 0,5 à 5 pixels), on observe :

- une détérioration plus marquée sur l'axe Y que sur l'axe X. Cela est explicable par la géométrie du site, principalement étendu le long de l'axe Y ;
- des déformations irrégulières sur l'axe Z, contrastant avec les courbures systématiquement observées sur les jeux de données acquis.

Au regard de la [Figure 59](#), on peut observer qu'en dessous de 2 pixels, le bruit dans les points homologues ne se traduit pas par des dérives paraboliques de grande ampleur. Seuls quelques déplacements supérieurs à 1 cm (taille du pixel terrain et objectif de précision) sont observables en Y. Un bruit blanc de 5 pixels implique quant à lui des déplacements moyens absolus de 5,2 cm en Z, ce qui est bien en deçà des imprécisions métriques mesurées sur les acquisitions par drone.

La précision de l'algorithme SIFT étant subpixelaire selon [[Lingua et al. 2009](#) ; [Apollonio et al. 2014](#)], ces tests amoindrissent la probabilité que le bruit des points homologues soit la source principale de l'incertitude du calcul d'orientations. Il est évident que c'est une source d'erreur, mais les essais menés semblent montrer qu'avec le cœur de calcul utilisé, une précision proche de la résolution pixelaire semble atteignable avec un modèle d'orientation interne parfait.

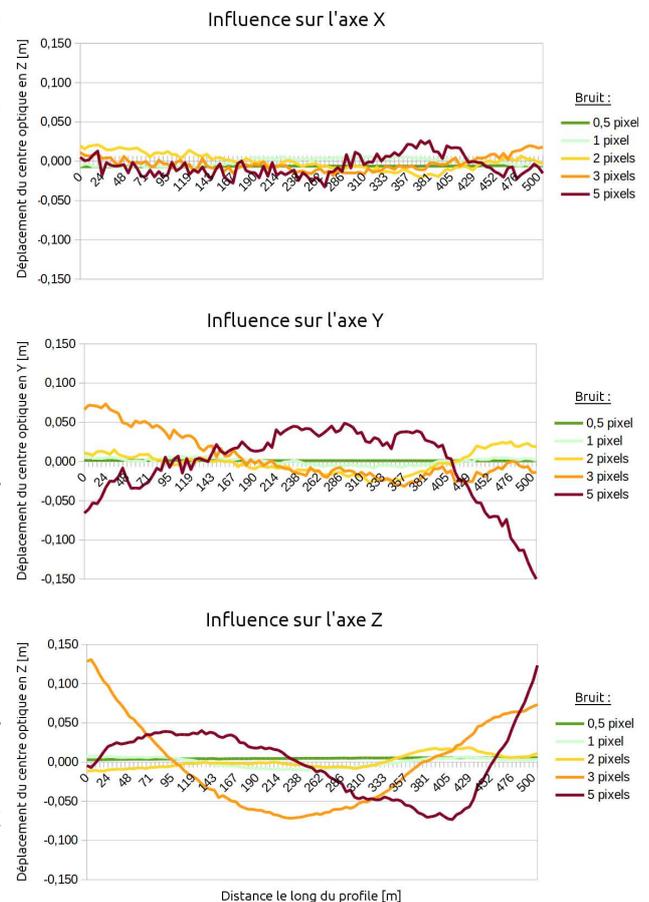


Figure 59: Déplacement des caméras par rapport à un cas parfait, dans l'hypothèse où la détection de points homologues est bruitée selon différentes valeurs. Bien que source d'erreur évidente, le phénomène de courbure n'est pas manifeste

4.5 ORIENTATION INTERNE

Après avoir optimisé le cœur du calcul d'orientations et exclu un bruit aléatoire sur les points de liaison comme source des phénomènes de courbure de bande, il semble légitime d'étudier les modèles d'orientation internes utilisés jusqu'à maintenant, afin d'estimer leur propension à décrire correctement les déformations internes.

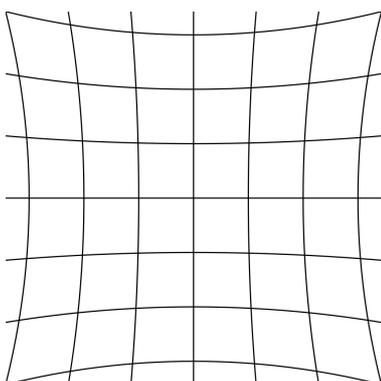
On désigne par calibration l'opération consistant à déterminer un modèle mathématique permettant de modéliser et corriger la direction des rayons perspectifs, principalement perturbée par les distorsions optiques. Ce problème a été le sujet de nombreuses études ; on distingue deux types de correction :

- des modèles composés d'un faible nombre de paramètres, décrivant des propriétés physiques :
 - modèles de correction radiale « basiques » [Brown 1971] ;
 - modèles incluant une correction affine et décentrique [Fraser 1997], particulièrement utilisés en photogrammétrie terrestre ;
- des modèles purement mathématiques incluant de nombreux paramètres (fonctions polynomiales, fonctions de Fourier), pouvant décrire des déformations très fines [Jacobsen 2007 ; Tang 2012], mais sujets à une surparamétrisation du système.

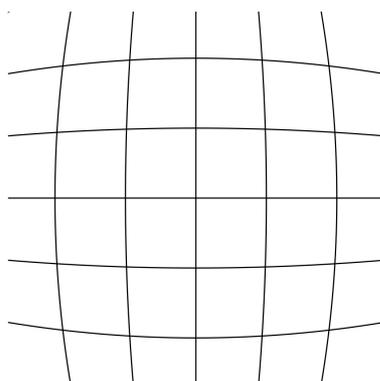
Il est aussi possible de combiner ces deux types de modélisation, par exemple pour corriger les déformations induites par des optiques *fish-eye* (un modèle théorique - équisolide ou équidistant - auquel est additionné un modèle polynomial).

4.5.1 MODÉLISATION PHYSIQUE

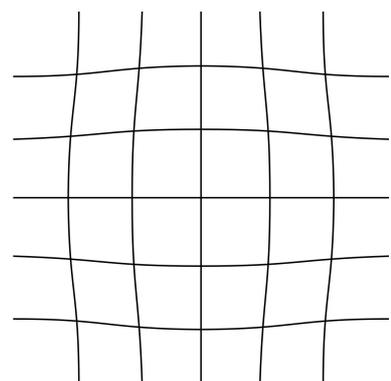
La lumière, dans son voyage du terrain vers le capteur traverse un ensemble de lentilles permettant de contrôler sa trajectoire et son rendu dans l'image (zone nette, flou artistique,...). Les systèmes mis en place créent des distorsions optiques, que l'on peut regrouper selon 3 types :



Distorsion en coussinet



Distorsion en barillet



Distorsion moustache

Les travaux de Brown et Fraser ont permis de mettre au point et d'affiner des modèles mathématiques pour corriger ces phénomènes. *Tapas*, l'interface de calcul des orientations d'*Apero*, propose 5 modèles de distorsion radiale (Table 4). Ils diffèrent selon :

- la distinction (ou non) entre centre de distorsion et centre d'auto-collimation, permettant de prendre en compte les distorsions qui ne s'exercent pas à partir de la projection orthogonale du centre optique sur le capteur ;
- la correction radiale dR appliquée à chaque pixel à partir du point principal de symétrie (PPS) : généralement de la forme $dR = \sum_{i=1}^{i=3} a_{2i+1} R^{2i+1}$ certaines variations proposent de modéliser les déformations jusque R^{11}

$$dR = \sum_{i=1}^{i=5} a_{2i+1} R^{2i+1} \quad (i \text{ étant un nombre entier, et } a_{2i+1} \text{ un nombre réel}) ;$$
- la présence (ou non) de paramètres de correction affine et/ou décentrique, afin de prendre en compte respectivement la non orthogonalité du plan image par rapport à l'axe optique et/ou un potentiel défaut d'alignement des axes optiques des lentilles.

Modèle	PPA / PPS	Correction radiale	Correction affine - décentrique	EMA _z [m]
RadialBasic	Égaux	$a_3R^3 + a_5R^5 + a_7R^7$	Non	1,370 m
RadialStd	Différents	$a_3R^3 + a_5R^5 + a_7R^7$	Non	0,265 m
RadialExtended	Différents	$a_3R^3 + a_5R^5 + a_7R^7 + a_9R^9 + a_{11}R^{11}$	Non	0,248 m
FraserBasic	Égaux	$a_3R^3 + a_5R^5 + a_7R^7$	Oui	0,391 m
Fraser	Différents	$a_3R^3 + a_5R^5 + a_7R^7$	Oui	0,154 m

Table 4: Description des modèles de calibration standards sous l'interface Tapas. Le choix d'un modèle de distorsion va influencer sur la qualité du calcul d'aérotriangulation résultant.

En appliquant tour à tour ces modèles sur le jeu de données Avignon-S1, on s'aperçoit que le choix du modèle de calibration influe directement sur la courbure de bande (Figure 60). Pour notre appareil photographique, le Sony DSC-RX1, les modèles les plus basiques donnent les dérivées les plus fortes. On constate que les résultats s'améliorent lorsqu'on applique :

- une distinction entre PPA et PPS ;
- une correction radiale utilisant un polynôme de degré élevé ;
- une correction affine et décentrique.

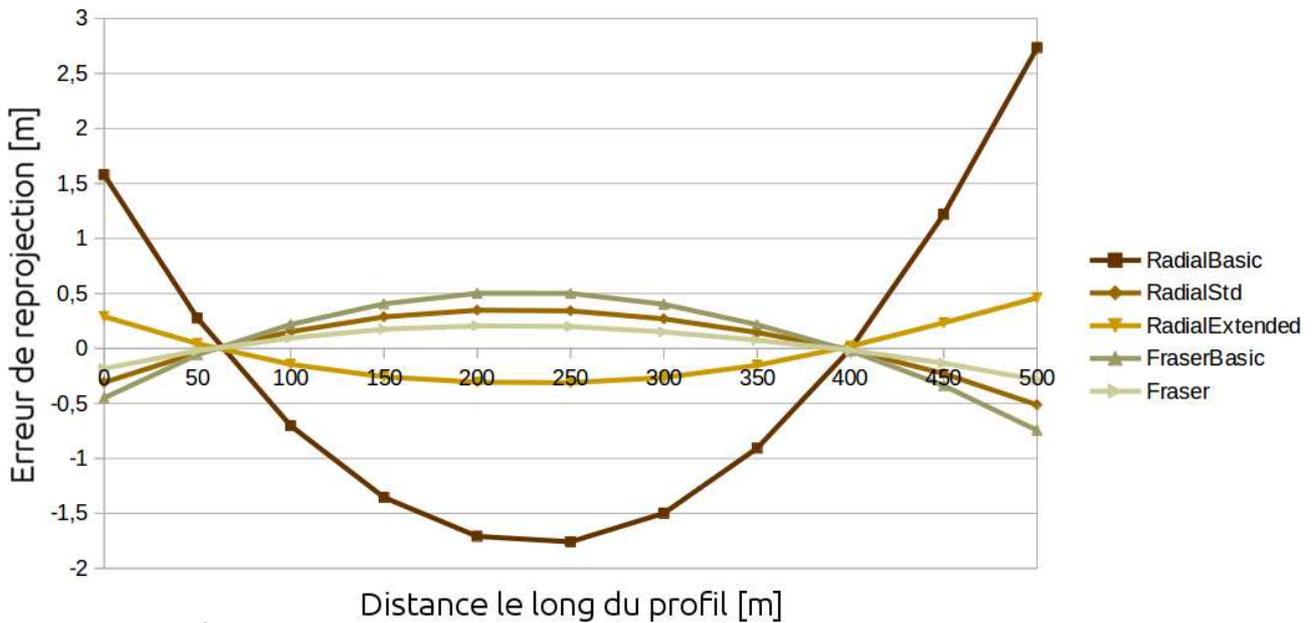


Figure 60: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle le long du profil. Quel que soit le modèle caméra utilisé, on observe un effet de courbure.

Des essais ont aussi été menés avec les modèles de Brown et Ebner [Ebner 1976], modèles paramétriques définis tels que :

- Modèle Brown :

$$\Delta x = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 y^2 + a_5 x^2 y + a_6 xy^2 + a_7 x^2 y^2 + a_{13} \frac{x}{f} x^2 y^2 + a_{14} x(x^2 + y^2)$$

$$\Delta y = a_8 xy + a_9 x^2 + a_{10} x^2 y + a_{11} x y^2 + a_{12} x^2 y^2 + a_{13} \frac{y}{f} x^2 y^2 + a_{14} y(x^2 + y^2)$$

- Modèle Ebner :

$$\Delta x = a_1 x + a_2 y - a_3 \left(2x^2 - \frac{4b^2}{3}\right) + a_4 xy + a_5 \left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_7 x \left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_9 y \left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_{11} \left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) \left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right)$$

$$\Delta y = -a_1 y + a_2 x + a_3 xy - a_4 \left(2y^2 - \frac{4b^2}{3}\right) + a_6 \left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_8 y \left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_{10} x \left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + a_{12} \left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) \left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right)$$

Avec $a_1, a_2, \dots, a_{12}, a_{13}, a_{14}$ des coefficients réels déterminés au cours de l'ajustement. Les résultats atteints avec ces modèles, dont le détail n'est pas présenté ici, n'apportent aucune amélioration face aux modèles testés précédemment. Menés sur les jeux de données Palliere-2014a et Palliere-2015c, les essais montrent des erreurs de reprojection des points de contrôle deux à trois fois plus élevées avec un modèle Brown qu'avec un modèle radial basique. Le modèle d'Ebner semble encore moins adapté puisque les tests aboutissent à des erreurs 4 à fois 10 plus élevées.

4.5.2 ÉVOLUTION DES SYSTÈMES OPTIQUES

Utilisés depuis des décennies en photogrammétrie aérienne, les modèles photogrammétriques standards ont permis de résoudre le problème d'orientation interne rencontré par les photogrammètres. Les caméras utilisées étaient alors généralement des chambres métriques, munies d'objectifs pour lesquels la distorsion et la courbure de champs sont très faibles. Leur rigidité permet aussi d'assurer la perpendicularité entre l'axe optique et le capteur, ou du moins de garantir une certaine invariabilité des paramètres d'orientation interne [Chandelier et al. 2011].

La conception d'optiques a fait l'objet d'avancées remarquables ces dernières décennies [Jiang et Whitehouse 2012 ; Rodgers et Thompson 2004]. Il est désormais possible d'atteindre un niveau de précision nanométrique dans la conception de lentilles [Hansen et al. 2006], qui peuvent être de formes diverses (*free-form lenses*). L'insertion de lentilles asphériques a ainsi dès les années 1960 permis de diminuer sensiblement le flou, les aberrations chromatiques et de manière générale le rapport signal sur bruit des images.

Composées d'une partie conique et d'une partie anamorphique, la fabrication de ce type de lentilles a évolué pour les rendre plus accessibles ; elles sont désormais présentes dans de nombreuses optiques (par exemple, trois lentilles asphériques parmi les huit du Sony DSC-RX1). Ces systèmes optiques, appréciés des artistes, posent problème aux photogrammètres. Les modèles de correction radiaux utilisés jusqu'à aujourd'hui ne sont plus forcément adaptés à ces évolutions.

4.5.3 MODÈLE PHOTOGRAMMÉTRIQUE STANDARD ÉTENDU

Partant du constat précédemment établi qu'un polynôme de degré 11 corrige mieux les distorsions optiques de notre caméra, nous avons cherché à ajouter des degrés supplémentaires à la correction polynomiale radiale :

- modèle Four15x2 :
$$dR = \sum_{i=1}^{i=7} a_{2i+1} R^{2i+1}$$
- modèle Four19x2 :
$$dR = \sum_{i=1}^{i=9} a_{2i+1} R^{2i+1}$$

En appliquant ces polynômes sur un modèle qui différencie PPA et PPS, et applique une correction affine et décentrique, nous constatons une nouvelle amélioration des résultats (Figure 61). Les modèles R^{15} et R^{19} fournissant les mêmes résultats, il semble préférable d'utiliser celui qui a le moins d'inconnues à déterminer, à savoir le modèle R^{15} . Les calculs sont alors plus rapides et le risque de surparamétrisation moindre.

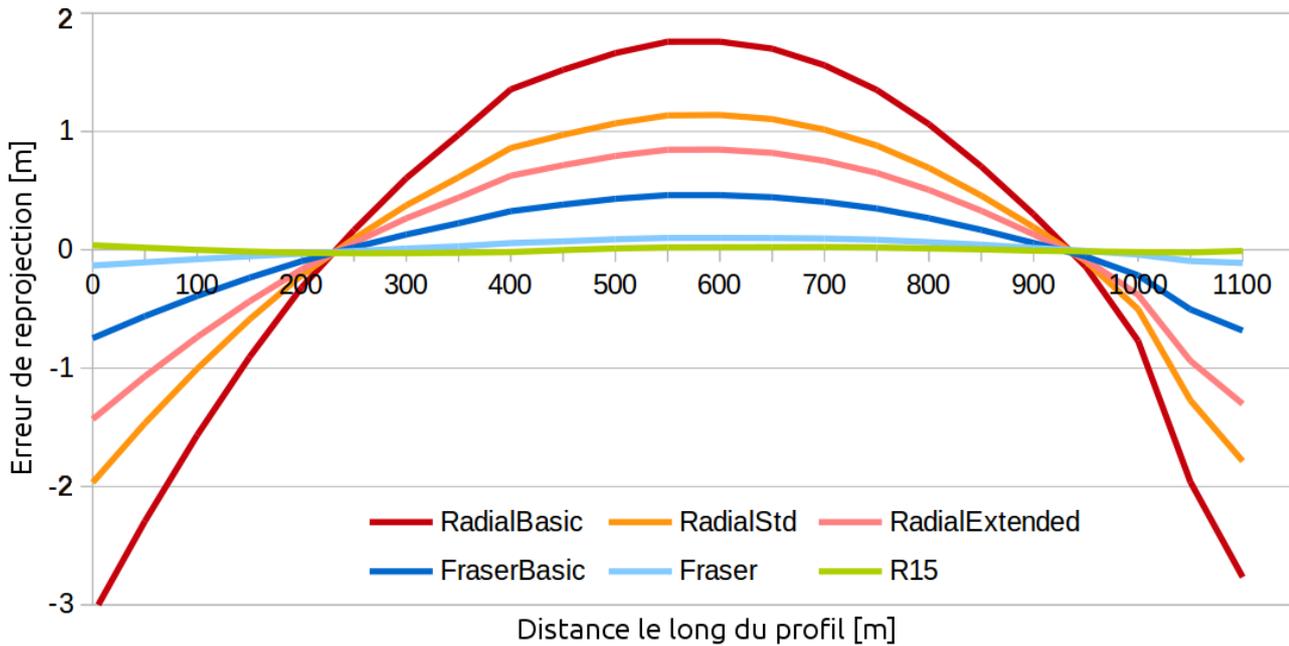


Figure 61: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle en fonction du modèle caméra utilisé. L'ajout de degrés de liberté supplémentaires permet ici (Pallière-2015a) de réduire significativement les effets de courbure de bande (cf modèle R15)

De nombreuses variations ont été effectuées, en modifiant le nombre d'images et l'ordre dans lequel les inconnues sont libérées. Il apparaît qu'une pré-calibration est préférable, en utilisant un sous-ensemble de quelques images (une dizaine). La procédure consiste alors à :

- initialiser PPA et PPS au centre de l'image, convertir la focale en pixels (données exif) ;
- déterminer les meilleures orientations externes en figeant le modèle, puis une fois toutes les images orientées, effectuer des itérations en libérant les centres et la focale ;
- figer ce modèle, et libérer les deux premiers coefficients du polynôme de distorsion (a_3 et a_5), itérer ;
- libérer la focale, itérer ;
- libérer le centre de distorsion, itérer ;
- libérer le troisième coefficient polynomial (a_7), itérer ;

Ce modèle initial considère PPA et PPS égaux et applique de manière radiale un polynôme impair de R^3 à R^7 . L'ordre de libération des paramètres internes a une importance certaine. Il semble ainsi nécessaire d'initialiser la correction polynomiale avant de libérer le centre de distorsion. En effet, tant que la distorsion n'est pas corrigée, sa position n'influe pas sur les résultats. Libérer ces paramètres trop tôt peut donc conduire à leur mauvaise initialisation, et amener à des cas de

divergence (ou converger vers une valeur erronée).

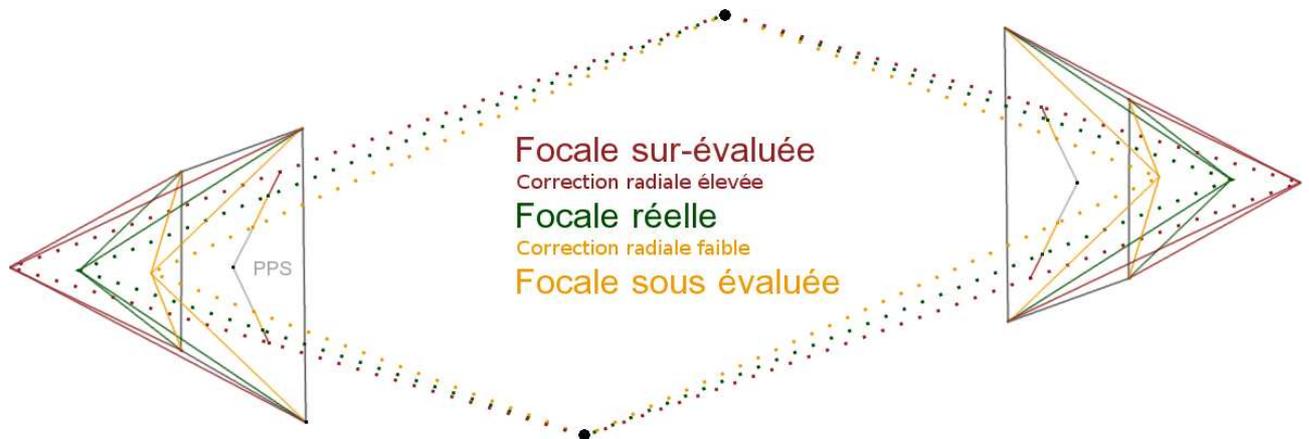


Figure 62: Corrélation entre valeurs de focale et de la correction radiale. Une sous-évaluation de l'un des paramètres est compensée par une surévaluation de l'autre ; il est alors très complexe de déterminer quelle est la meilleure solution (intersections quasi-identiques).

De même, la valeur de la focale et le polynôme appliqué vont influencer directement sur la direction des rayons. Une erreur sur la focale peut être corrigée en adaptant la correction radiale (Figure 62). En initialisant les deux premiers coefficients avec une valeur de focale fixe, le risque de divergence est amoindri. L'étude menée par [Clarke et al. 1998] montre qu'un coefficient de corrélation de plus de 94 % existe entre la valeur de la focale et le premier paramètre du polynôme (a_3), mais que les paramètres suivants sont de moins en moins corrélés (86 % avec a_5 , 78 % avec a_7).

En utilisant maintenant toutes les images, le modèle standard est utilisé comme valeur initiale pour orienter la série, puis raffiné ainsi :

- libérer les deux premiers coefficients du polynôme de distorsion (a_3 et a_5), itérer ;
- libérer la focale, itérer ;
- libérer le point principal, itérer ;
- libérer le troisième coefficient polynomial (a_7), itérer ;
- libérer les paramètres de correction décentrique et affine, itérer ;
- libérer un à un les coefficients polynomiaux jusqu'au niveau de détail souhaité (a_{15} pour notre caméra), itérer.

On obtient alors un modèle distinguant PPA et PPS, appliquant une correction décentrique et affine, et pour lequel la distorsion est corrigée selon un modèle polynomial impair de \mathbb{R}^3 à \mathbb{R}^{15} . Cette procédure permet une amélioration des résultats sur la grande majorité de nos jeux de données. Cependant, il existe certains cas pour lesquels un polynôme de degré limité est plus efficace. L'incertitude associée à la longueur focale étant dans une certaine mesure

compensée par un modèle polynomial, on constate que certaines déformations semblent mieux modélisées par des modèles de degrés élevés. Cependant, les résultats atteints (de l'ordre du décimètre) ne sont pas encore satisfaisants.

4.5.4 CORRECTION NON RADIALE DES DÉRIVES RÉSIDUELLES

Les modèles décrits précédemment font l'hypothèse d'un système optique à symétrie de révolution, pour lesquels le non alignement des centres optiques et l'inclinaison du capteur sont pris en compte par les paramètres de correction décentrique et affine. D'autres phénomènes peuvent toutefois se manifester : un capteur dont les photosites ne sont pas parfaitement coplanaires, des photosites de taille hétérogène, des défauts induits par la présence de filtres optiques,... Ces phénomènes peuvent engendrer des déviations qui ne seront pas correctement corrigées par un modèle photogrammétrique standard.

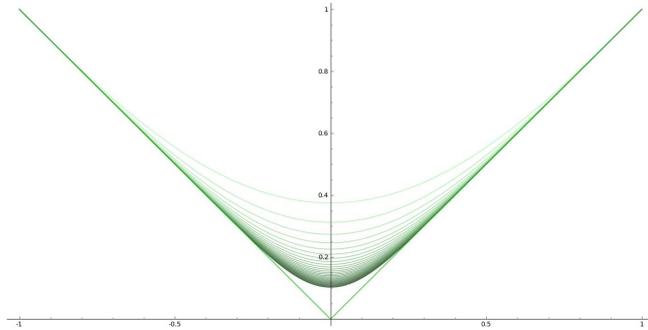


Figure 63: Illustration du théorème de Stone-Weierstrass avec la fonction $f(x)=|x|$ pour x défini sur l'intervalle $[-1;1]$. Une suite polynomiale converge vers la fonction cible. Source du graphique : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Sequence_of_polynomials_converging_uniformly_to_the_absolute_value.png (dernier accès le 25/09/2015)

Nous souhaitons modéliser ces déformations résiduelles par des fonctions mathématiques. À ce titre, le théorème de Stone-Weierstrass [Stone 1948 ; De Branges 1959] stipule que toute fonction continue sur un espace donné peut être approximée par une fonction polynomiale (Figure 63).

Si l'on considère que les déformations résiduelles sont définies par une fonction f définie dans l'intervalle $[x,y]$ de l'image, alors le théorème de Stone-Weierstrass stipule que pour tout $\varepsilon > 0$, il existe une fonction polynomiale p définie dans le même intervalle, telle que $|f(x,y) - p(x,y)| < \varepsilon$.

On recherche donc à estimer $p(x,y)$ telle que :

$$p(x,y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} \cdot x^i \cdot y^j \text{ avec } [i,j,m,n] \in \mathbb{N} \text{ et } a_{ij} \in \mathbb{R}$$

À travers de nombreux essais, nous avons constaté que l'utilisation de ces modèles pouvaient améliorer sensiblement les précisions atteintes. Les données montrent que limiter la somme des monômes et polynômes au degré 4 est généralement suffisant (pour la caméra testée).

Cependant, le degré 7 offre une plus grande souplesse puisque testé sur tous les jeux de données, ce modèle a délivré les meilleurs résultats (identiques au degré 4 dans plusieurs cas). Le risque de surparamétrisation étant conséquent avec de tels

modèles, nous recommandons d'initialiser les premiers paramètres pendant le calcul d'un modèle photogrammétrique standard étendu.

4.5.5 PROCÉDURE PROPOSÉE : SYNTHÈSE

L'utilisation de modèles de calibration inappropriés semble être la cause principale des phénomènes de courbure de bande relatifs aux acquisitions linéaires. Démonstré par [Wu 2014], une sous-estimation des paramètres d'orientation interne induit une courbure concave, et une sur-estimation induit une courbure convexe. Notre étude présente une méthode en trois étapes permettant de contourner le phénomène :

- estimation d'un modèle physique avec peu de paramètres, sur un échantillon d'image (une dizaine) ;
- le premier modèle est utilisé pour orienter l'ensemble des images, puis raffiné en libérant de nouveaux paramètres : PPA et PPS distincts, coefficients polynomiaux jusque R^{15} , correction de décentrement et affine ;
- en figeant le second modèle, une surcouche mathématique, composée d'une somme de monômes et polynômes, permet de corriger les déformations résiduelles.

4.6 TRAITEMENTS AVEC IMAGES OBLIQUES

La nature même des digues est problématique, puisque le faible dénivelé des ouvrages les rapproche des scènes planes. La littérature [Triggs 1998 ; Fraser 1987] recommande pour ces acquisitions une forte redondance des mesures (recouvrement tel qu'un point soit vu dans au moins dix images), ainsi que des mesures inclinées d'au moins $10-20^\circ$.

En fixant un recouvrement latéral de 80 %, les images verticales permettent de voir chaque point dans 5 images. La réalisation de deux bandes parallèles permet donc de voir chaque point depuis 10 images. Cependant, l'inclinaison des rayons incidents est faible.

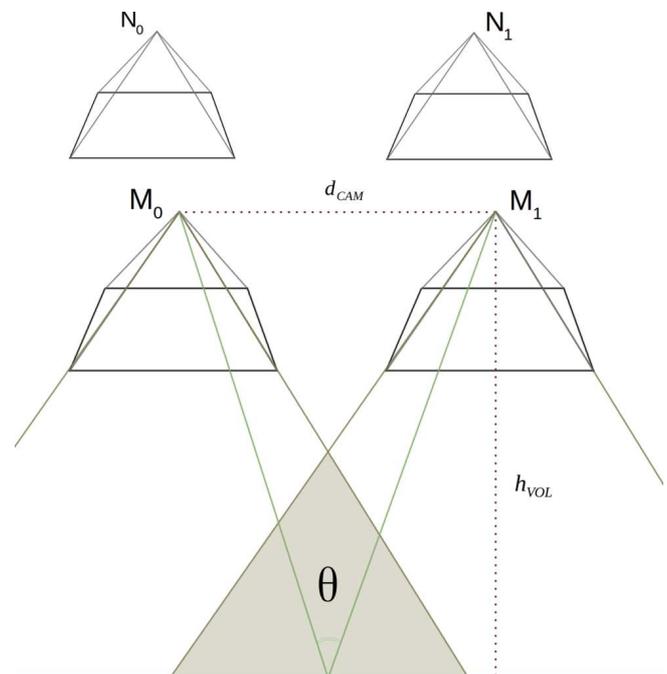


Figure 64: Illustration des angles d'intersection entre les rayons perspectifs

Notons d_{CAM} la distance entre deux sommets de prise de vue verticaux, et h_{VOL} la

hauteur de vol. Le point au centre de la zone de recouvrement est le point pour lequel l'angle d'incidence θ des rayons perspectif est maximal. Sa valeur est de :

$$\theta_{MAX} = 2 * \arctan\left(\frac{\left(\frac{d_{CAM}}{2}\right)}{h_{VOL}}\right)$$

Soient N_o le centre d'une caméra sur l'axe principal, M_o le centre d'une caméra sur l'axe secondaire (Figure 64), N_i et M_i les i -ièmes centres le long de leurs axes respectifs. En considérant les paramètres de vol présentés (§3.4.1), on observe que l'angle d'incidence dépasse légèrement 30° dans le meilleur des cas (Table 5).

N_0	N_1	N_2	N_3	N_4
$0,0^\circ$	$7,6^\circ$	$15,2^\circ$	$22,6^\circ$	$29,9^\circ$
M_0	M_1	M_2	M_3	M_4
$7,6^\circ$	$10,8^\circ$	$17,0^\circ$	$23,8^\circ$	$30,7^\circ$

Table 5: Angle d'incidence maximal des rayons perspectifs entre N_o et une caméra donnée

De nombreux chercheurs se sont depuis penchés sur la question et ont cherché à analyser l'influence d'images obliques dans les acquisitions linéaires [James et Robson 2014 ; Nocerino et al. 2013 ; Nocerino et al. 2014]. Ces études montrent que ce type d'image permet d'améliorer sensiblement la qualité des orientations.

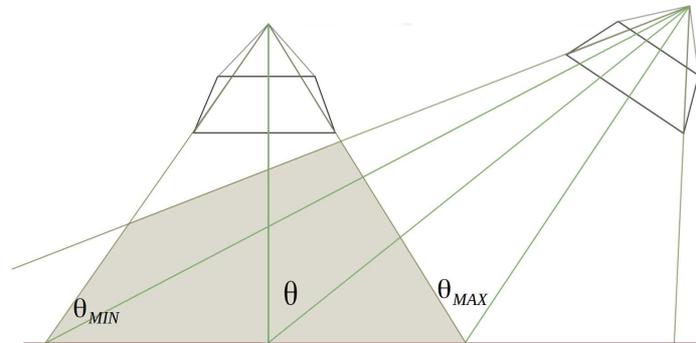


Figure 65: L'ajout d'images obliques permet d'augmenter l'angle d'intersection entre les rayons perspectifs

Nous avons cherché à valider ce constat sur les acquisitions 2014 de La Pallière. En ajoutant des images obliques, basculées de 45° par rapport à un plan horizontal et acquises sur deux axes en sens inverse, on obtient des intersections plus franches, dont certaines à 90° (Figure 65). Comme le montrent la Table 6 et la Figure 66, l'ajout de ces images en complément d'images verticales permet de minimiser considérablement les erreurs de reprojection des points de contrôle sur le jeu de 2014, même en utilisant des modèles de caméra standards.

		Nadir	Obliques	Nadir & Obliques
Écart moyen absolu	X [m]	0,039	0,034	0,012
	Y [m]	0,118	0,047	0,014
	Z [m]	0,185	0,043	0,103
	XYZ [m]	0,248	0,080	0,107

Table 6: Précisions atteintes dans différentes configurations. L'utilisation des seules images obliques est préférable à celle des seules images nadir. La combinaison des deux permet d'atteindre une excellente précision planimétrique. Les meilleurs résultats en altimétrie sont atteints lorsque seules des images obliques sont utilisées.

Ces données nous montrent aussi que traitées seules, les images obliques donnent de meilleurs résultats que les images verticales seules. Alors que les modèles de caméra standards sont inadaptés à ce dernier cas, la procédure de calibration présentée permet quant à elle d'obtenir des résultats relativement satisfaisants même dans des configurations dégénérées (Figure 66).

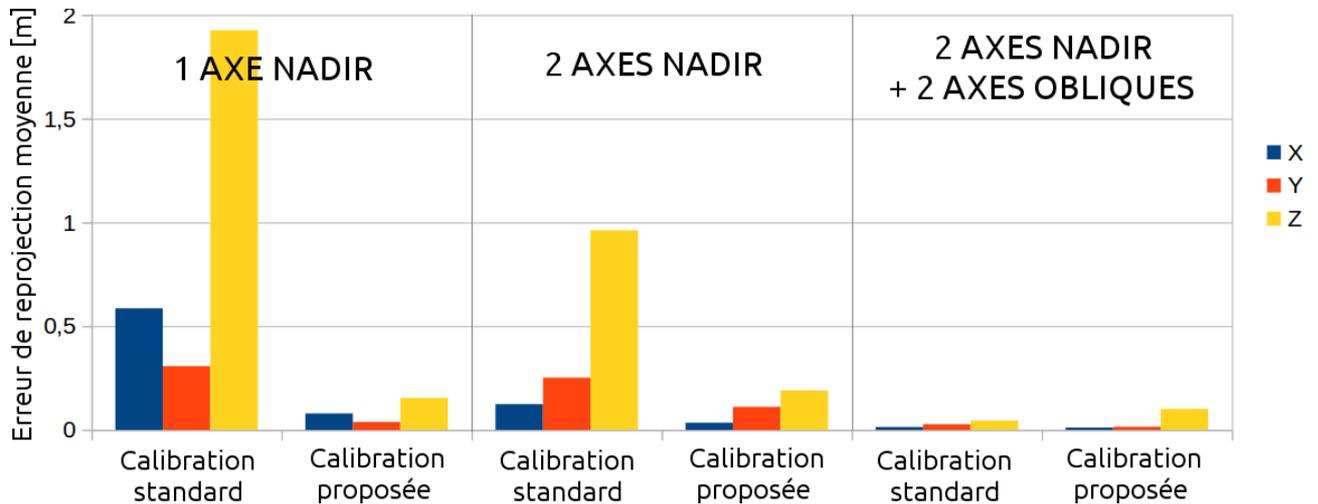


Figure 66: Erreur moyenne absolue de reprojection selon diverses configurations de vol (jeux de données Palliere-2014), et selon la procédure de calibration employée. Alors que les images obliques apparaissent comme cruciales avec les modèles photogrammétriques standards, la procédure présentée permet de mieux exploiter des images acquises dans une configuration dégénérée.

Selon [Apollonio et al. 2014], les angles d'intersection faibles ont un effet négatif sur la qualité du calcul d'orientations. Un tel gain pourrait s'expliquer en modélisant une erreur sur un rayon perspectif (point homologue bruité, mauvaise orientation interne) par un cône. Plus l'angle d'incidence est faible, plus l'incertitude sera forte, spécifiquement sur la composante altimétrique. La meilleure intersection étant obtenue à partir de deux rayons perpendiculaires.

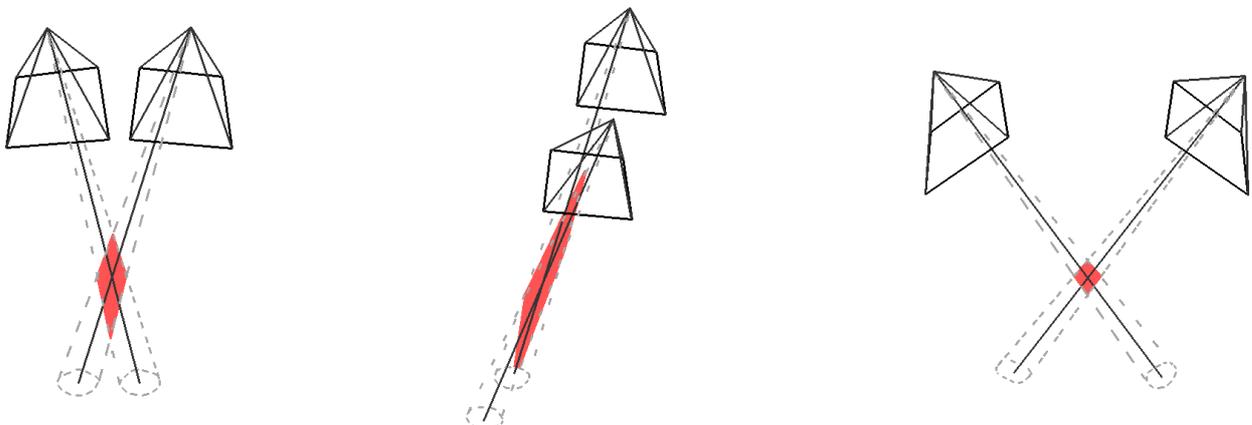


Figure 67: Intersection de rayons perspectifs selon plusieurs géométries. L'imprécision de calibration interne est représentée par un cône dans l'espace. Lorsque l'angle d'incidence entre les rayons est faible, l'incertitude (en rouge) est forte. Au contraire, une intersection à angle droit est favorable.

Une autre hypothèse, notamment soutenue par [Clarke et al. 1998], repose sur la corrélation très forte entre la valeur de la focale et celle de la hauteur de vol (coefficient de corrélation supérieur à 94%). En ajoutant des images obliques, la profondeur de champ plus importante pourrait briser la corrélation entre ces paramètres, et ainsi expliquer l'amélioration des résultats.

Plusieurs tests ont été menés pour comprendre l'origine de cette amélioration. Nous n'avons pas trouvé d'explication rationnelle et nous contenterons donc de recommander, de manière empirique, d'ajouter des images obliques aux acquisitions linéaires. Ce constat est spécifiquement valable lorsque des logiciels commerciaux sont utilisés (§5.6).

4.7 CAMLIGHT – UN PROTOTYPE DE CAMÉRA PHOTOGRAMMÉTRIQUE POUR DRONE

Pour répondre à des besoins de plus en plus divers, l'IGN est amené à développer ses propres matériels. L'expertise dans le développement de caméra a permis par le passé de mettre au point les caméras photogrammétriques utilisées pour relever le territoire national [Thom et Souchon 1999 ; Souchon et al. 2010].

Bien avant le décollage de la filière drone, l'institut a ciblé un besoin en capteur léger, performant, rapide, et permettant une restitution photogrammétrique fidèle. Baptisé Camlight, le projet de conception d'une caméra photogrammétrique ultra-légère pris son envol en 2010 [Souchon 2015]. Les caractéristiques permettant de la distinguer des solutions actuellement commercialisées sont :

- un capteur plein format (bon compromis entre poids et qualité d'image professionnelle) ;
- une monture Leica pour des objectifs de qualité reconnue et interchangeables ;
- une masse de 300g avec une optique de 35mm, soit le poids d'une petite caméra à objectif rétractable ;
- une capacité d'enregistrement en RAW de 10 images par seconde, afin de pouvoir embarquer l'appareil sur des drones à voilure fixe et garantir un taux de recouvrement optimal. Des développements sont aussi en cours, dans le cadre d'une thèse menée par Ahmad Audi, afin d'intégrer des algorithmes de traitement d'image temps réel ;
- un obturateur central afin d'enregistrer tous les pixels au même instant.

Début 2015, nous avons pu tester le premier prototype sur le site de La Pallière. En organisant un vol similaire à celui réalisé la veille en embarquant le Sony DSC-RX1 (mêmes points de passage), il a été possible de faire une première évaluation

des résultats de ce système d'imagerie.

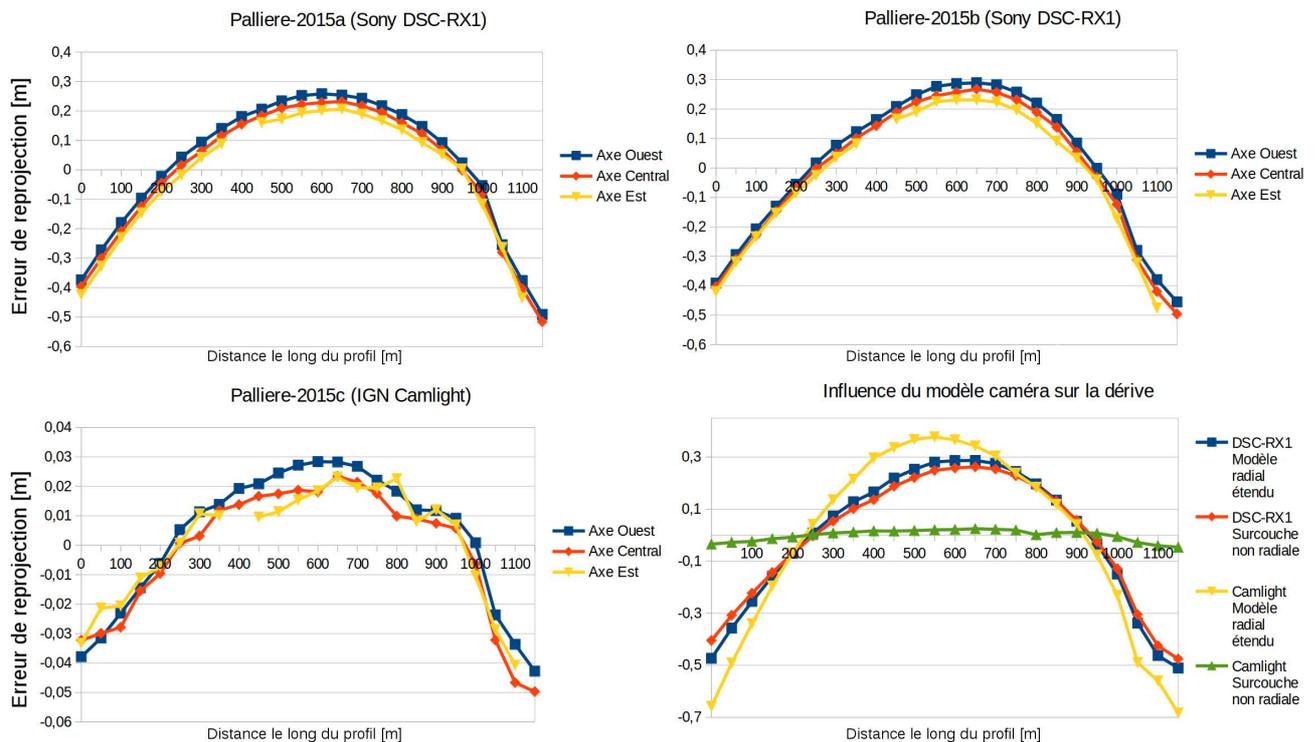


Figure 68: Les jeux acquis avec le RX1 font tous deux apparaître des dérives similaires. L'apport de la correction non radiale est ici minime, hormis pour la Camlight pour laquelle la dérive se limite alors à quelques centimètres.

En reprenant la procédure de calibration en trois étapes (§4.5.5), on s'aperçoit qu'en utilisant un modèle photogrammétrique standard étendu (fin de la seconde étape), les erreurs de reprojection sont légèrement plus fortes pour la Camlight que pour la caméra Sony. L'application de la dernière couche de correction non radiale permet quant à elle de limiter drastiquement les erreurs de reprojection de la Camlight. On observe alors une dérive dix fois moindre avec ce modèle qu'avec la caméra grand public (Figure 68).

Ces résultats sont très encourageants mais il est encore trop tôt pour décrypter ce qui pourrait permettre un tel gain, et extrapoler sur des classes de précision atteignables. La conception de caméras photogrammétriques adaptées aux besoins et contraintes des utilisateurs est néanmoins un signe prometteur quant à l'amélioration des résultats produits avec ce type de matériel.

4.8 CONCLUSION

La méthode proposée consiste à corriger au maximum les distorsions de manière radiale, en adaptant les modèles physiques utilisés jusqu'à aujourd'hui avec un polynôme de degré plus élevé, qui semble minimiser un peu mieux les erreurs de reprojection. Les principales déformations étant corrigées, les imperfections

résiduelles ne se manifestent plus forcément de manière radiale. Une nouvelle couche est ajoutée, somme des monômes et polynômes jusqu'à un degré donné (le degré 7 apporte les meilleurs résultats pour les deux caméras évaluées).

Appliqué sur des optiques complexes, les distorsions semblent nettement mieux corrigées. On constate un facteur d'amélioration variant de 5 à plus de 100. L'utilisation de tels modèles pourrait être un outil pour la réduction des erreurs systématiques, et apporter ainsi une amélioration significative des produits photogrammétriques.

Une procédure d'acquisition spécifique est un second levier. En basculant l'axe de prise de vue, l'intersection des faisceaux est plus robuste, et réduit drastiquement les dérives mesurées. Dans une configuration avec des images obliques à 45° (deux axes en sens inverse), les modèles de calibration standards donnent de bons résultats.

Sur de longues acquisitions, l'utilisation de la procédure présentée est la plus efficace. Ces modèles montrent aussi leur intérêt dans les configurations les plus dégénérées, lorsque seules des images verticales ont été acquises.

Enfin, sur une note un peu plus spéculative, on peut penser que l'émergence du drone et d'une filière professionnelle va créer un besoin de capteurs de plus en plus légers et performants. Le développement à l'IGN d'une caméra métrique ultra-légère en un des exemples. Les premiers résultats atteints avec ce système demandent à être confirmés. Ils sont néanmoins particulièrement encourageants quant à l'amélioration des traitements photogrammétriques (Figure 69).

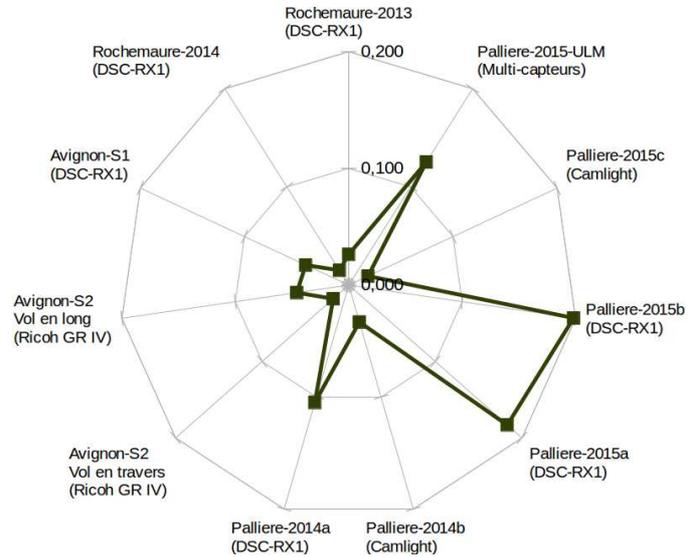


Figure 69: Erreurs de reprojection (moyennes absolues, en mètres) des orientations avant compensation sur les points d'appui. D'écart initial métrique, la méthode proposée réduit l'incertitude à quelques centimètres voire décimètres, pour les linéaires les plus importants (Palliere-2015).

CHAPITRE 5

5 - COMPENSATION ET MISE EN CORRESPONDANCE

Lors du [Chapitre 3](#), nous avons présenté diverses procédures d'acquisition par drone et ULM. Le [Chapitre 4](#) a permis d'illustrer les problèmes liés à ces géométries d'acquisition, et a apporté des solutions afin d'optimiser les calculs d'orientations relatives. Ces données peuvent être utilisées ainsi pour générer des modèles 3D visuellement sans défaut. À des fins de communication, d'illustration, ou de reproduction, les orientations relatives peuvent être suffisantes.

Cependant, pour des applications métrologiques, l'utilisation de mesures terrain est nécessaire pour trois raisons :

- pour contrôler la précision d'un calcul (§4.2) ;
- pour géoréférencer un chantier et ainsi faciliter les analyses diachroniques (§5.1) ;
- pour compenser d'éventuelles dérives (§5.2).

5.1 TRANSFORMATION DE HELMERT

La similitude spatiale est l'opération dans laquelle sont combinées trois translations et rotations, ainsi qu'une homothétie ([Figure 70](#)). Cette transformation est considérée comme rigide, puis les angles et les ratios de distances sont conservés. La transformation de Helmert est une similitude spatiale adaptée aux cas imparfaits, le principe étant de minimiser l'écart moyen quadratique entre les observations. En notant respectivement A et A' les matrices contenant les coordonnées (X, Y, Z) d'un point mesuré sur le terrain, et (X', Y', Z') ses coordonnées dans le système relatif, T et R les matrices de translation et rotation, et k un nombre réel caractérisant le facteur d'homothétie, la transformation s'écrit :

$$A = A' * R * k + T \quad \text{avec} \quad A = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad A' = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R_X & 0 & 0 \\ 0 & R_Y & 0 \\ 0 & 0 & R_Z \end{bmatrix}$$

En notant respectivement α , β , γ les angles de rotation autour de X, Y, et Z la matrice de rotation peut s'écrire :

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

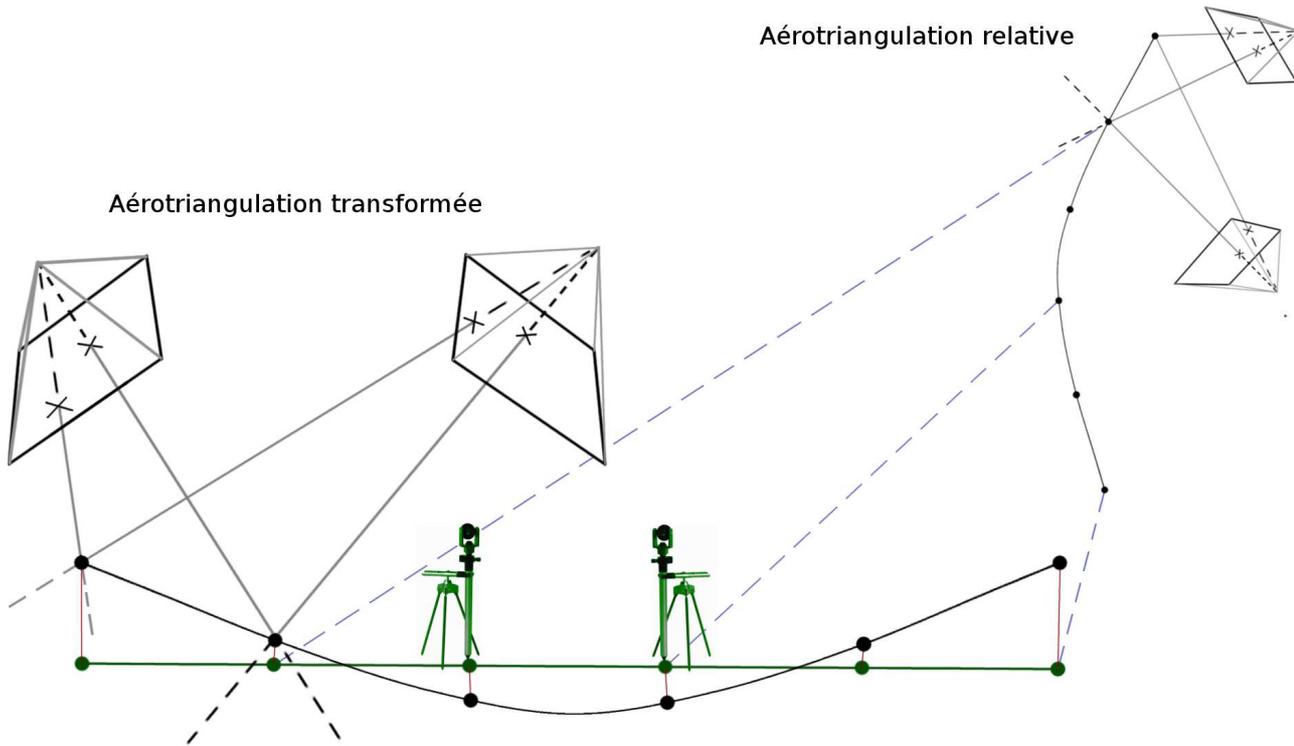


Figure 70: La transformation de Helmert à sept paramètres nécessite la correspondance entre trois points terrain (au minimum) et leurs emplacements dans trois images. Il s'agit d'une transformation rigide et non d'une compensation.

La transformation de Helmert consiste à trouver R , T et k tels que la somme des erreurs de reprojection soit minimale. Cette transformation est largement utilisée en topographie pour recaler un élément dans un système de coordonnées à partir de points communs. En photogrammétrie, elle permet de géoréférencer un jeu d'orientations. Cette transformation ne permet cependant pas de s'affranchir des erreurs de calcul. Un jeu d'orientations courbé sera ainsi géoréférencé, mais les dérives observées ne seront pas corrigées.

5.2 COMPENSATION SUR LES MESURES TERRAIN

La transformation d'Helmert est une transformation à 7 paramètres permettant de géoréférencer un jeu d'orientations relatives. Les rotations, translations, et la mise à l'échelle sont des transformations rigides qui ne permettent pas de rectifier un jeu d'orientations présentant un effet de courbure, mais de minimiser son impact. Une solution de correction largement utilisée en photogrammétrie consiste à effectuer un nouvel ajustement des faisceaux, dans lequel est ajoutée à la fonction

d'énergie E à minimiser (cf §4.1.1) un terme permettant de minimiser l'erreur terrain, telle que :

- Orientation relative pure (observations des points homologues) :

$$E = \sum_{k=1}^n \frac{(I_k - \mathfrak{I}(\pi(R_k(T_k - C_k))))^2}{\sigma_{pix}}$$

- Orientation absolue compensée (miniser de l'écart sur les mesures terrain) :

$$E = \sum_{k=1}^n \frac{(I_k - \mathfrak{I}(\pi(R_k(T_k - C_k))))^2}{\sigma_{pix}} + \sum_{l=1}^m \frac{(GCP_{mesuré}^l - GCP_{projeté}^l)^2}{\sigma_{GCP}}$$

avec l un ensemble de points $GCP_{mesuré}^l$ mesurés sur le terrain avec une précision σ_{GCP} , et $GCP_{projeté}^l$ la projection dans l'espace terrain de ces repères à partir de leur saisie (ou détection) dans les images

La difficulté de ce problème, inhérente à la résolution par la méthode des moindres carrés, consiste à trouver la meilleure pondération des observations. Les points homologues n'étant pas de qualité égale, il est nécessaire de procéder à une compensation individuelle de ceux-ci (points homologues et mesures terrain) :

- trop faible, la dérive ne sera pas correctement compensée ;
- trop forte, les orientations vont coller aux points terrain et créer un phénomène de vaguelettes entre les mesures.

Dans la suite *MicMac*, un outil nommé *Campari* propose une compensation par défaut. L'outil permet de choisir les paramètres de pondération entre points terrains et points homologues, le poids affecté à chaque point homologue en fonction de leur incertitude, d'inclure des données issues d'un récepteur GNSS, de choisir quels paramètres internes relâcher,...

Cette procédure a été adaptée pour fonctionner sur la plupart des jeux de données, permettant de corriger dans une certaine mesure un jeu d'orientations courbées. Néanmoins, des améliorations semblent possibles afin d'améliorer ce processus de compensation.

5.3 OPTIMISATION DE LA COMPENSATION

La difficulté du problème repose sur la variété des observations à compenser. Comme le montrent [Lingua et al. 2009 ; Apollonio et al. 2014], la précision des détecteurs de points homologues varie en fonction des caractéristiques des images et de leur condition d'acquisition (angle entre les points de vue, texture de la scène, ...).

De nombreuses expériences ont été menées afin de trouver une solution

universelle, pouvant être appliquée par défaut pour corriger de manière optimale les chantiers linéaire sujets à des effets de courbure. Cet objectif n'a pas été atteint, puisque le nombre et la répartition des points homologues et des points terrain varie d'un chantier à un autre. Pour chaque jeu de données, les meilleures précisions ont été atteintes en utilisation une paramétrisation différente à chaque calcul (certaines améliorations étant infimes). Néanmoins, les caractéristiques suivantes ont eu un effet positif sur tous les jeux évalués :

- libérer le modèle de caméra en relâchant toutes les inconnues du modèle polynomial non radial (la surcouche de calibration, présentée au §4.5.4) ;
- rejeter les points homologues qui présentent des résidus supérieurs à un pixel ;
- pondérer chaque point homologue individuellement en fonction de son erreur de reprojection au cours de l'ajustement. Cela permet de donner plus de poids aux mesures les plus justes et d'amoinrir celui des données les plus bruitées. Une fonction de pondération $W(R_i)$ est appliquée, telle que :

$$W(R_i) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{R_i}{k}\right)^2\right)}}$$

avec i = identifiant d'un point homologue
 R_i = résidus (pendant l'ajustement) du point i
 k = nombre réel permettant d'influer sur la courbe de sélection

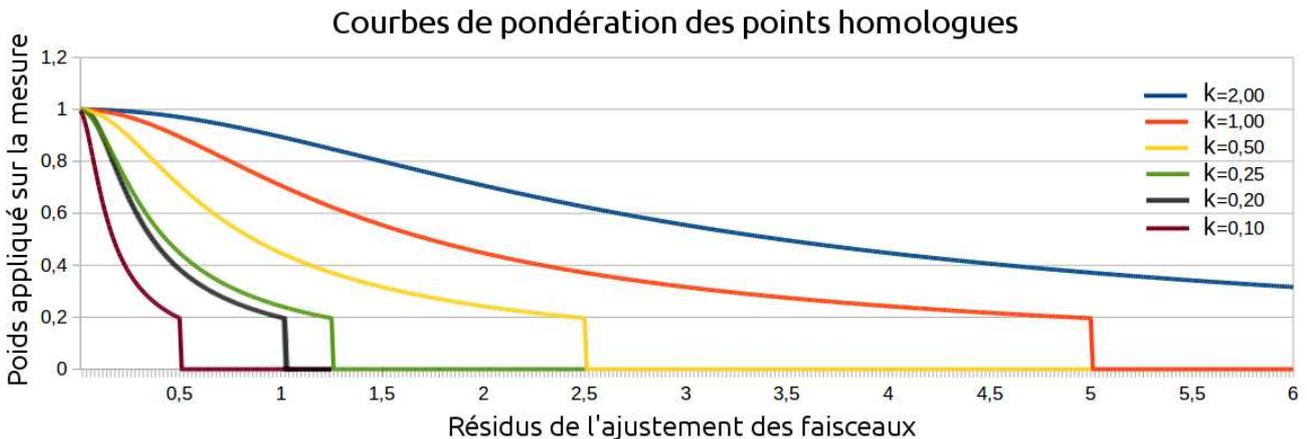


Figure 71: Pondération des points homologues en fonction de leurs résidus, fonction . La nouvelle pondération des points homologues affecte la valeur 0.2 au coefficient k, et accepte un écart maximal de 5 fois ce coefficient. En fixant k=1, la sélection est plus souple et les dérives moins bien maîtrisées.

Les deux premiers paramètres ont apporté des améliorations sur tous les chantiers étudiés. Le paramètre k fixé à 0.2 permet un compromis efficace assurant une amélioration globale des orientations. Ce paramètre étant fonction du nombre de points homologues, de leur qualité et de celle des orientations, il est complexe de déterminer une valeur optimale applicable à tous les chantiers (Figure 72). Dans le

cas où un besoin fort en précision serait exigé, nous encourageons le lecteur à itérer plusieurs fois l'opération, en faisant varier ce paramètre (nos essais ont montré les meilleurs résultats avec des valeurs comprises entre 0,05 et 0,20) afin d'agir sur la courbe de sélection des points (Figure 71)

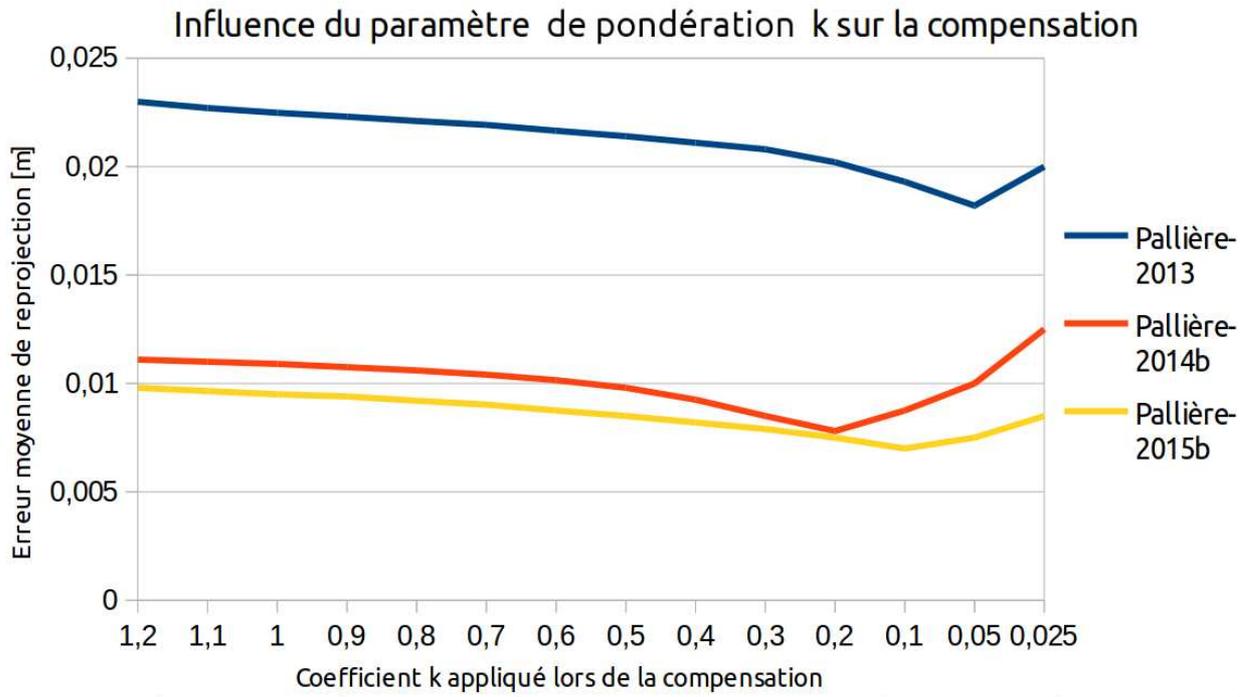


Figure 72: Selon les chantiers, de nombreux paramètres entrent en compte lors de la compensation (nombre et qualité des points homologues, angles d'intersection, multiplicité, nombre et qualité et des points d'appui,...). Le paramètre k optimal semble varier d'un chantier à un autre

5.4 CORRECTION PAR UN MODÈLE QUADRATIQUE

L'imprécision des acquisitions en bandes est causée par des erreurs systématiques, mais aussi des erreurs irrégulières. Le modèle caméra propose de corriger les déformations systématiques, mais un défaut lors de son calcul peut engendrer une courbure parabolique du modèle [Wu 2014 ; James et Robson 2014]. Selon [Brandenberger 1958], ce systématique résiduel peut être corrigé en appliquant un polynôme de degré deux ou supérieur.

Cette démarche, connue depuis plus d'un demi-siècle, reste marginale en photogrammétrie. Afin d'estimer cette correction, l'approche que nous avons développée se base sur les erreurs de reprojection des points de contrôle. Pour corriger d'éventuelles anisotropies, un repère de coordonnées local est calculé, dans lequel l'axe O_x est défini par les deux caméras les plus éloignées le long du profil. En reprenant les notations de la Figure 73, une correction P peut être appliquée si et seulement si : $P(J_i)=G_i$

avec J_i = point i projeté dans l'espace terrain
 G_i = point i mesuré sur le terrain

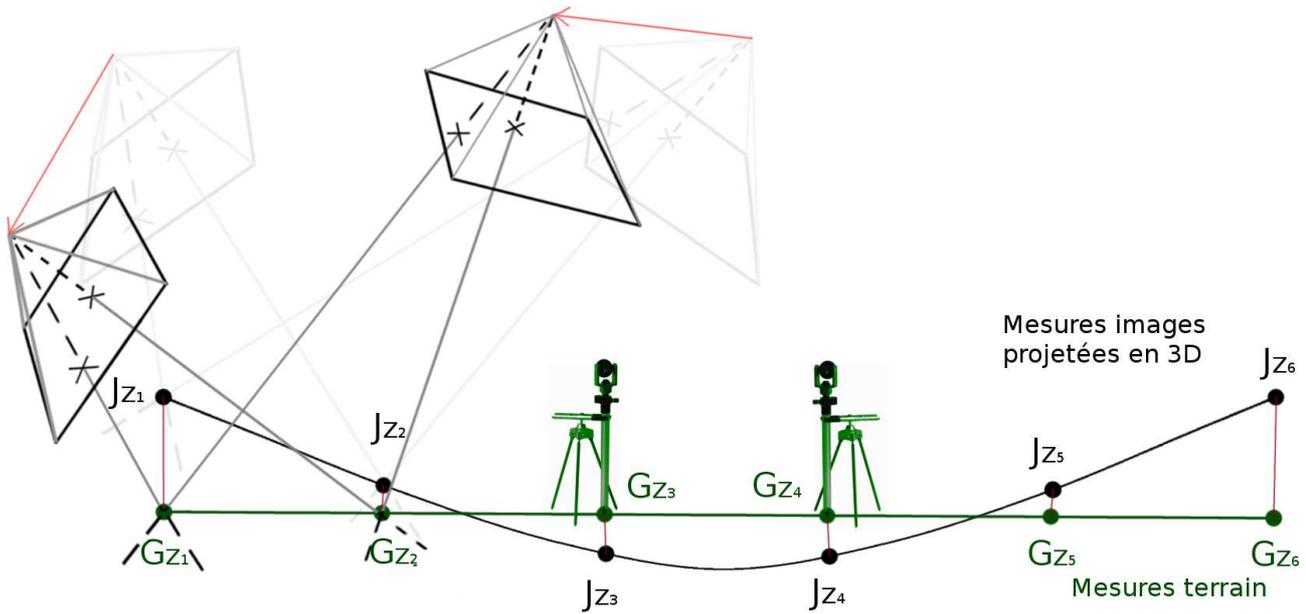


Figure 73: Estimation de la dérive altimétrique par un modèle quadratique calculé à partir des erreurs de reprojection, et correction des orientations sur des mesures terrain

Ainsi, une correction quadratique sur l'axe Z s'écrit : $J_{Z_i} + a + b \cdot J_{X_i} + c \cdot J_{Y_i} + d \cdot J_{X_i}^2 = G_{Z_i}$

Ou plus simplement : $a + b \cdot J_{X_i} + c \cdot J_{Y_i} + d \cdot J_{X_i}^2 = G_{Z_i} - J_{Z_i}$

- avec a, b, c, d = nombres réels, coefficient du polynôme
- $J_{X_i}, J_{Y_i}, J_{Z_i}$ = coordonnées X, Y, Z reprojetées du point i
- $G_{X_i}, G_{Y_i}, G_{Z_i}$ = coordonnées X, Y, Z mesurées pour i
- $G_{Z_i} - J_{Z_i}$ = erreur de reprojection altimétrique du point I

Étant donné les quatre coefficients du polynôme à estimer, cette technique requiert au moins quatre points d'appui pour être appliquée. Les dérives systématiques en planimétrie, plus marginales mais rencontrées sur certains jeux de données, peuvent aussi être corrigées avec cette transformation (Figure 74). Nous avons cherché à évaluer la précision de cette solution face à la procédure d'ajustement originelle, ainsi que face à la procédure d'ajustement optimisée.

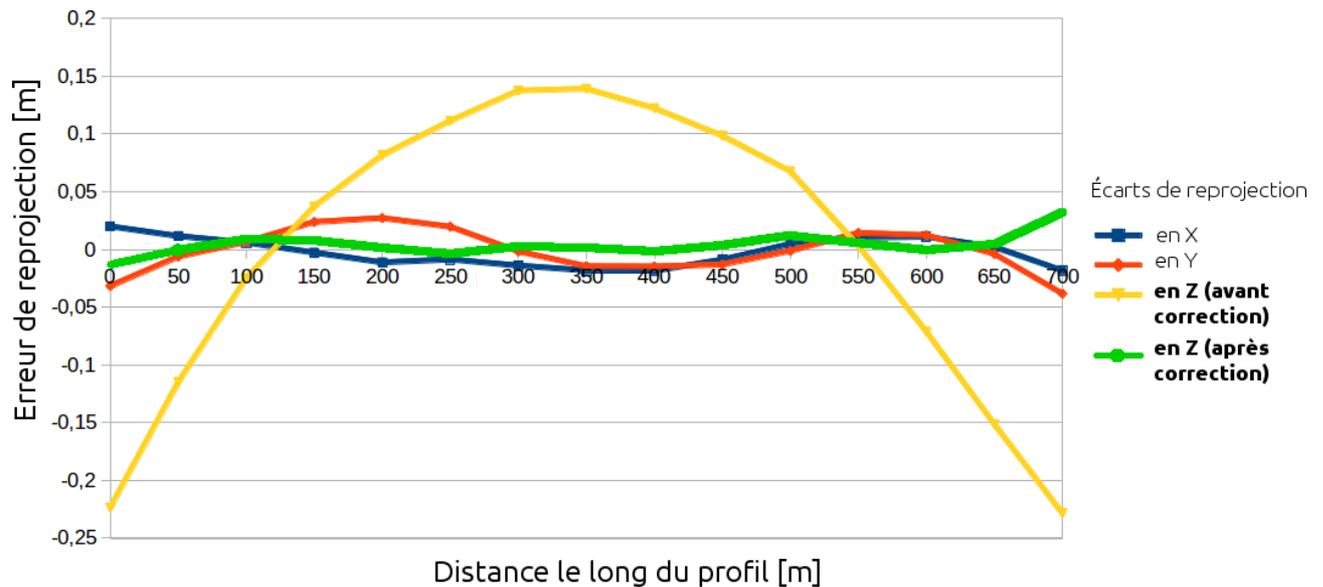


Figure 74: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle le long du profil, sur Pallière-2014. Ici, la dérive altimétrique peut être estimée et corrigée efficacement par un modèle quadratique.

5.5 RÉSULTATS

Le calcul des orientations relatives sur les chantiers linéaires fait apparaître des effets de courbure. Dégradant la précision des modèles 3D ainsi dérivables, une adaptation sur des mesures terrain est nécessaire. Nous présentons ici les résultats atteints en appliquant les méthodes présentées précédemment sur les 600 mètres linéaires du jeu de données Pallière-2014a, en utilisant 6 points d'appui et 19 points de contrôle (schéma d'implantation Figure 92), puis d'autre jeux de données en gardant un point d'appui tous les 100 mètres linéaires.

Les conclusions que nous tirons de ces expérimentations sont encore ambiguës. D'une part, la méthode quadratique permet d'apporter une correction en quelques secondes (face à quelques heures pour un ajustement classique). Les déformations essentiellement paraboliques telles que constatées sur certains jeux sont ainsi bien corrigées (Figures 74, 75 et 77). Cependant la procédure semble moins robuste pour corriger les dérives de forme plus irrégulières (Figures 76 et 78), pouvant résulter de conditions ponctuellement dégradées (vibrations, vent sur la végétation, changement de luminosité,...). Un modèle polynomial plus complexe pourrait permettre d'apporter une correction appropriée, mais cela nécessiterait davantage de points de contrôle, ce que nous cherchons à minimiser dans cette étude. Dans ce dernier cas, un ajustement classique est alors préférable.

Figure 75: Lorsque seules des images verticales sont utilisées, les résultats sont particulièrement dégradés. La correction quadratique semble apporter sur ce jeu les meilleurs résultats, hormis sur l'axe Y (gain marginal par rapport à Helmert)

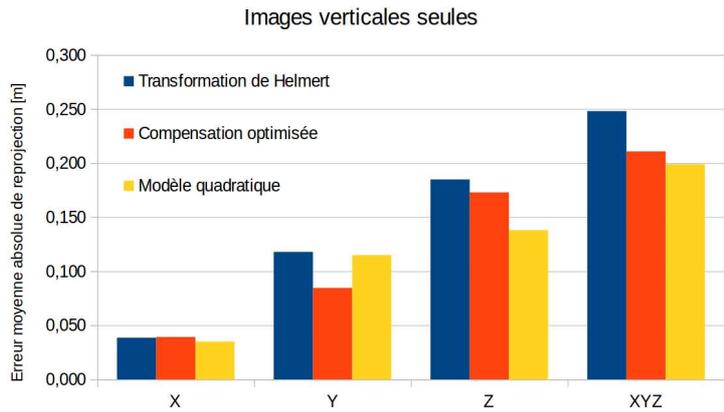


Figure 76: Entre images verticales seules ou images obliques seules, le calcul d'aérotriangulation est plus précis dans le second cas. Les précisions atteintes ne sont toutefois pas suffisantes pour répondre au besoin d'une précision centimétrique identifié par la CNR

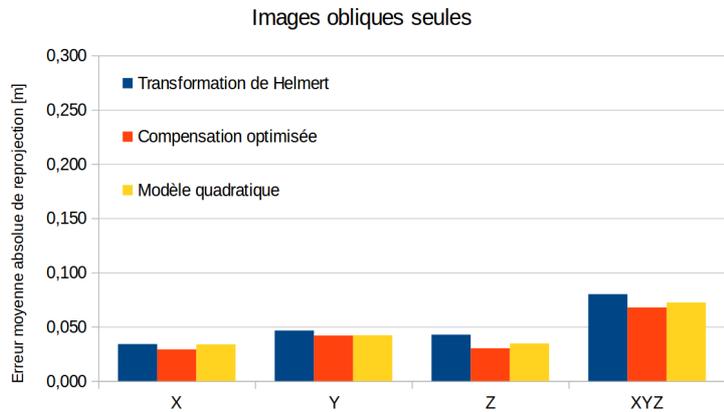


Figure 77: Lorsque des images obliques et verticales sont utilisées, on constate que les dérivées planimétriques sont maîtrisées et la compensation efficace. La méthode quadratique donne des résultats légèrement meilleurs qu'une compensation optimisée (par défaut)

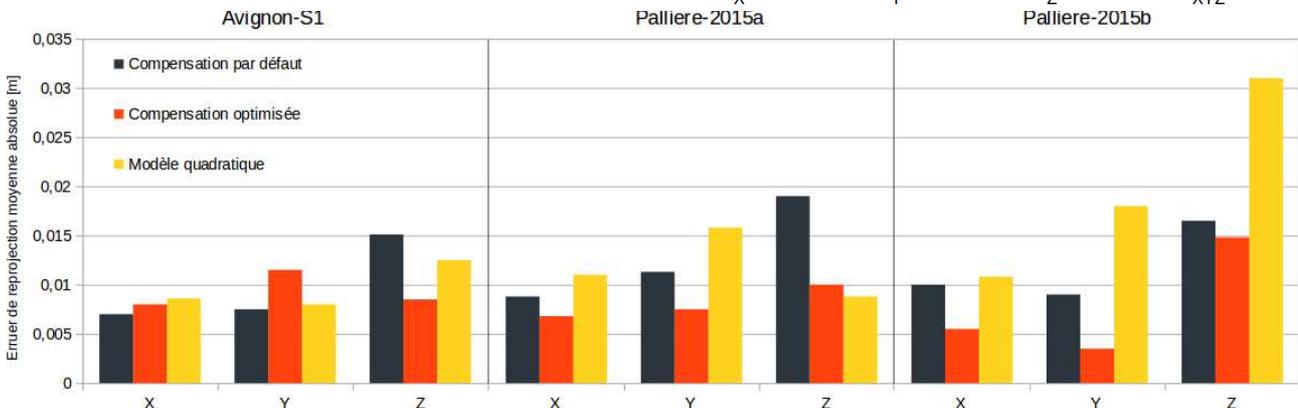
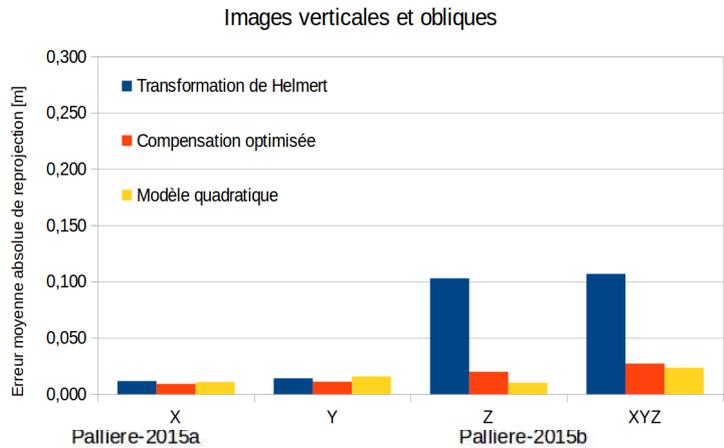


Figure 78: La compensation par défaut (§5.2) est presque toujours moins performante que l'optimisation présentée (§5.3). La méthode quadratique (§5.4) est encore plus bénéfique dans certains cas, mais elle est inadaptée dans d'autres

	Jeux de données	Linéaire	EMA _z [m]		Images verticales / Images obliques	Points d'appuis / Points de contrôle
			Avant compensation	Après compensation		
Vols à 150 m	Palliere-2015-ULM	1100 m	0,125	0,010	372 / 0	11 / 60
	Avignon-S2_long	600 m	0,046	0,028	160 / 0	6 / 15
	Avignon-S2_travers	600 m	0,018	0,017	153 / 0	6 / 13
Vols à 60 m	Avignon-S1	600 m	0,041	0,013	180 / 0	6 / 29
	Rochemaure-2013	600 m	0,026	0,002	104 / 0	6 / 18
	Rochemaure-2014	600 m	0,015	0,004	327 / 0	6 / 18
	Palliere-2013	1100 m	1,082	0,018	215 / 0	11 / 34
	Palliere-2014a	600 m	0,105	0,010	277 / 293	6 / 22
	Palliere-2014b	600 m	0,033	0,008	298 / 323	6 / 22
	Palliere-2015a	1100 m	0,183	0,013	577 / 538	11 / 60
	Palliere-2015b	1100 m	0,198	0,007	321 / 308	11 / 60
	Palliere-2015c	1100 m	0,019	0,004	437 / 430	11 / 60

Table 7: Récapitulatif des précisions atteintes sur chaque jeu de données, après application du workflow présenté en *Annexe 2* du second Tome. Hormis les jeux de Palliere-2013 (images de qualité moyenne) et Palliere-2015a (météo agitée), la méthode présentée permet – en utilisant un point d'appui par tranche de 100m – d'obtenir une précision altimétrique (EMA) meilleure que le centimètre.

5.6 ÉVALUATION DE LA PROCÉDURE FACE AUX SOLUTIONS EXISTANTES

Nous avons présenté au cours du *Chapitre 4* une procédure d'auto-calibration en trois étapes. Son utilisation dans la chaîne de calcul *MicMac* permet de limiter considérablement les effets de dérives sur les ouvrages linéaires. Dans ce chapitre, nous avons présenté deux procédures de compensation sur points d'appui.

Nous cherchons ici à évaluer l'apport de ces avancées face aux solutions commercialisées. Il existe de nombreuses études comparant les résultats de logiciels de photogrammétrie [*Remondino et al. 2013 ; Dall'Asta et Roncella 2014*]. À notre connaissance, les géométries d'acquisition linéaires n'entrent pas dans le cadre de ces études comparatives.

Jeux de données	Type d'image	Points d'appuis	Photoscan		MicMac	
			EMA_Z [m]	EMA_XYZ [m]	EMA_Z [m]	EMA_XYZ [m]
Palliere-2015a DSC-RX1	Obliques & nadir	6	0,059	0,083	0,006	0,010
		11	0,043	0,068	0,007	0,011
		71	0,035	0,040	0,002	0,007
Palliere-2015-ULM Phase One iXA 180	Nadir	6	0,049	0,141	0,007	0,011
		11	0,027	0,111	0,006	0,010
		71	0,016	0,030	0,003	0,007
Palliere-2015-ULM DSC-RX1	Nadir	6	0,264	0,268	0,017	0,020
		11	0,211	0,219	0,009	0,013
		71	0,065	0,069	0,006	0,009

Table 8: Erreurs de reprojection après compensation sur les points d'appui. Même en utilisant tous les points d'appui disponibles, les résultats obtenus par Photoscan sont insuffisants pour répondre aux objectifs visés.

Nous avons fait appel à Sintégra, société d'ingénierie et de topographie, pour calculer les orientations à partir de trois jeux d'images. On rappelle que lorsque tous les points d'appui sont utilisés (configuration avec 71 points), les résultats présentés [Table 8](#) correspondent aux erreurs de reprojection de ces mêmes points (et non des points de contrôle puisqu'il n'y en n'a plus). Dans un cas parfait, cette erreur devrait donc être inférieure à la précision du relevé terrain (centimétrique).

Ces résultats sont flatteurs et semblent confirmer que la procédure présentée permet effectivement une avancée face aux solutions existantes. N'ayant pas eu la main sur les calculs du logiciel d'Agisoft, nous pouvons cependant être confiants quant à leur paramétrage, tant le logiciel a été simplifié et ne laisse que peu de choix dans les options de calcul.

Des tests ont aussi été menés par Francesco Nex de l'Université de Twente avec le logiciel Pix4D sur les jeux de données 2014-Palliere. Il semblerait que le logiciel ne soit pas optimal lorsqu'il n'existe pas de bonne approximation de la position initiale. Ainsi, le calcul échoue lorsque seuls 6 points d'appui sont utilisés ([Figure 79](#)). Avec 25 points d'appui, le résultat est visuellement parfait, et les erreurs de reprojection de ces points inférieures au centimètre, vérifiant que l'ajustement est effectif sur ces mesures, mais ne pouvant vérifier la présence d'oscillations éventuelles entre ces mesures. Deux parades peuvent néanmoins être mises en place :

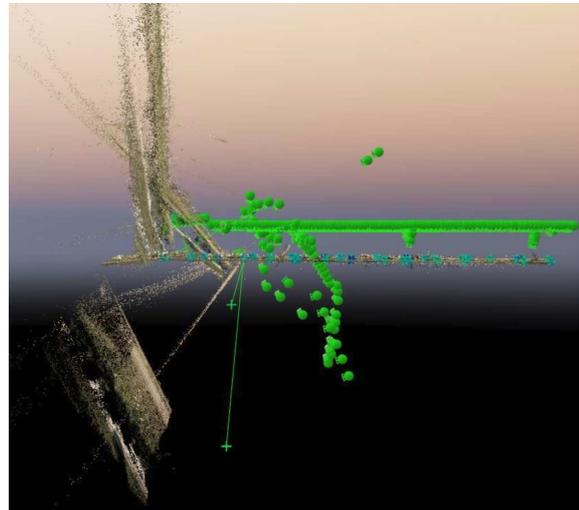


Figure 79: Bug impactant le calcul des orientations avec Pix4D

- la vérification par itération : calcul de 25 aérotriangulations en utilisant 24 points d'appui. Il existe alors pour chaque orientation 1 point de contrôle (différent pour chaque jeu), soit 25 mesures de contrôle permettant de calculer un indicateur.
- la vérification par comparaison avec une vérité terrain surfacique : cela nécessite de générer un modèle terrain et de le comparer avec une vérité terrain plus précise (cf [Chapitre 6](#))

Faute de temps, nous n'avons pas pu effectuer tous les tests que nous souhaitions. Nous rappellerons néanmoins que de nombreux logiciels (Correlator3D, Acute3D, PhotoModeler,...) n'ont pu être testés, mais aussi que les résultats obtenus avec les solutions évaluées peuvent être améliorés en fonction de la présence d'une calibration initiale, d'une trace GPS, ou encore en ajoutant les images de manière incrémentale.

5.7 MISE EN CORRESPONDANCE

Les parties précédentes ont présenté une procédure pour orienter les jeux d'images et corriger les dérives. Nous nous intéressons désormais à la mise en correspondance des photographies, qui est le problème consistant à localiser un pixel dans deux ou plusieurs clichés. En identifiant ainsi des pixels communs sur un jeu d'images orientées, la reconstruction 3D d'une scène devient possible.

L'automatisation de ce problème intéresse les photogrammètres depuis plus d'un demi-siècle [Hobrough 1959 ; Williams 1959]. Les premières expériences ont été menées dans le cadre de la restitution analogique, puis les concepts de géométrie épipolaire et de *cross-correlation* furent développés [Helava 1978]. De nombreuses recherches conduites dans les années 1980 ont permis de réduire l'intervention des opérateurs aux opérations de reconnaissance visuelle (points homologues, stéréorestitution), aboutissant à des solutions logicielles commerciales et à l'émergence de la photogrammétrie numérique.

Les diverses solutions trouvées à ces deux derniers problèmes permettent désormais la reconstruction entièrement automatisée d'un modèle numérique de terrain à partir d'une série d'images orientées. [Remondino et al. 2014a] propose un état de l'art développé des méthodes qui co-existent.

Par défaut, l'approche empruntée par la suite *MicMac* est une méthode multi-image et multi-résolution (possibilité d'utiliser du MinCut/MaxFlow [Roy et Cox 1998]). Elle se base sur le *Semi-Global Matching* développé par [Hirschmüller 2005]. La mise en correspondance d'un pixel est effectuée au regard des pixels environnants et par l'approximation d'une contrainte de lissage (Figure 80). Un algorithme de régularisation est mis en place proposant de minimiser la fonction de coût $E(Z)$ telle que : $E(Z) = \sum A(x, y, Z(x, y)) + \alpha * F(\vec{G}(Z))$

avec Z l'altitude (dans le cas aérien) recherchée ;

α un nombre réel, permettant de pondérer l'importance de la régularité du terrain ;

$A(x, y, Z)$ le terme caractérisant la ressemblance des pixels pour le point de coordonnées (x, y, Z) . Le terme vaut 1 – le score de *cross-correlation*, tel que décrit dans [Lewis, 1995] ;

$F(\vec{G}(Z))$ une fonction de régularisation caractérisant la régularité de la surface valant $F(\vec{G}(Z)) = |Z(x+1, y) - Z(x, y)| + |Z(x, y+1) - Z(x, y)|$.

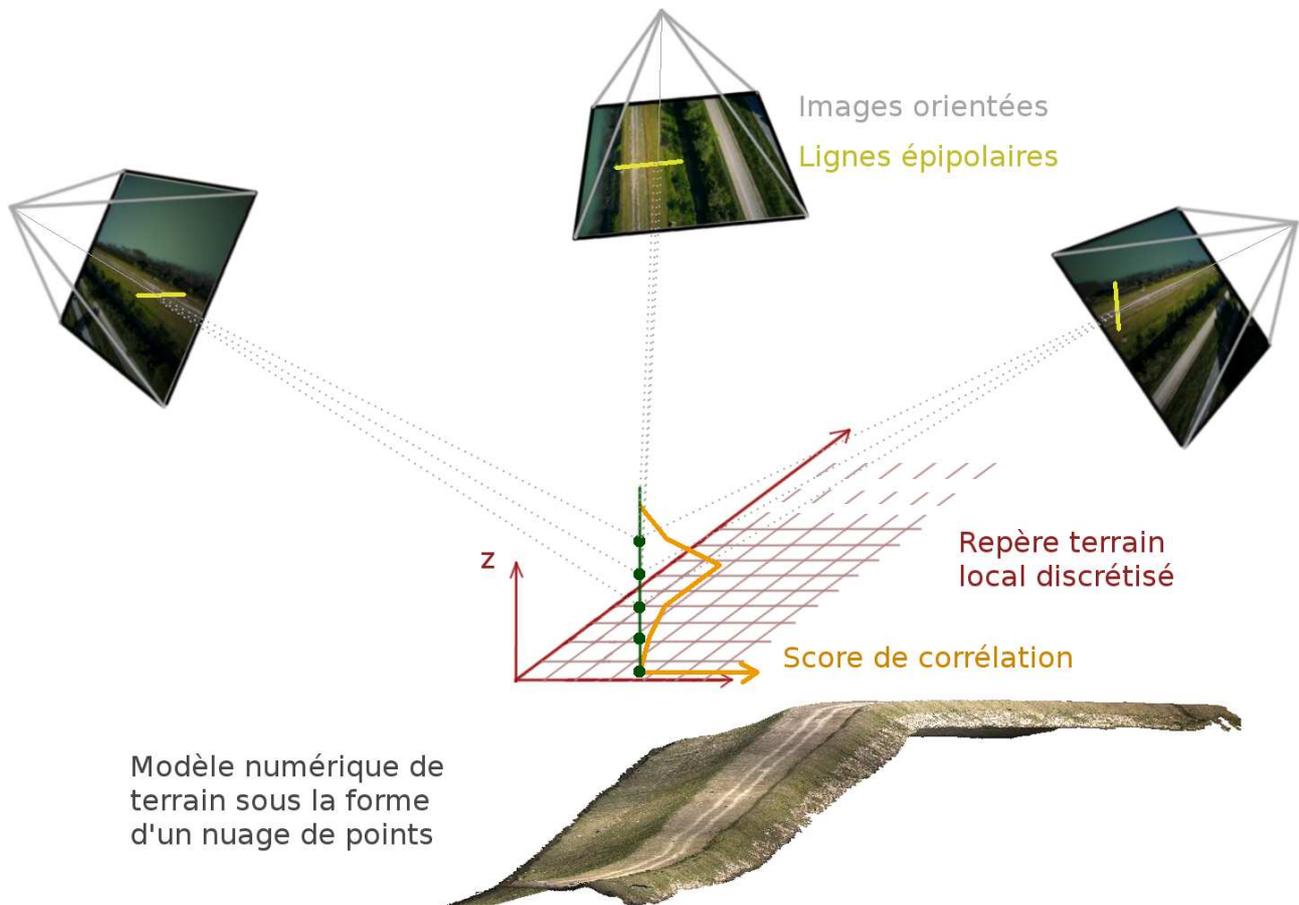


Figure 80: Création d'un modèle numérique de terrain par corrélation dense en géométrie terrain. Après avoir discrétisé un repère terrain local, chaque nœud de la grille est projeté dans les images individuelles à différents niveaux de parallaxe. Un score de corrélation est calculé pour chaque altitude d'un nœud donné, permettant de sélectionner les pixels les plus ressemblants.

[Roy et Cox 1998] fut la première étude à donner une solution à la minimisation de ce problème, en se basant sur la théorie des graphes. Sa lenteur et sa propension à requérir beaucoup de mémoire sont contournées en limitant l'espace de recherche à des boîtes englobantes de taille réduite. Cela est possible par la mise en place d'une stratégie multi-échelle (construction d'une pyramide d'images sous-résolues d'un facteur 2 jusqu'à 2^n ; avec $n \in \mathbb{N}$), pour laquelle les solutions calculées à basse échelle sont réutilisées dans les étapes suivantes.

Ce processus permet de calculer pour chaque site un modèle numérique d'élévation de type grille $2D + 1$. Au format tif, un fichier xml décrit les paramètres de géoréférencement, de sorte que chaque pixel de l'image puisse être géoréférencé dans l'espace.

[McHenry et Bajcsy 2008] propose une étude des formats de données ainsi générés. Trois formats présentent un intérêt :

- les modèles grille au format $2D + 1$, résultat « brut » de la mise en correspondance (généralement au format image) ;

- les nuages de points, dérivés des modèles grille (fichiers PLY, DXF,...) ;
- les modèles maillés, reliant des points 3D selon un maillage (réalisé à partir d'un nuage ou d'un modèle grille).

Les différents avantages associés à chaque type de modélisation sont rappelés par [Boudon et al. 2015]. On notera que le format grille est apprécié des scientifiques, qui disposent des outils nécessaires à leur manipulation et préfèrent généralement les données brutes. L'industriel va privilégier une représentation plus graphique. Le nuage de points, coloré par l'orthophotographie, répond à cet objectif et offre l'avantage d'être utilisable par de nombreux logiciels, notamment des outils open-source comme [CloudCompare 2015 ; Girardeau-Montaut 2006] ou [Meshlab 2015 ; Cignoni et al. 2008].

Le modèle maillé (*mesh* en anglais) propose de reconstruire un maillage à partir d'un modèle numérique, en créant des facettes triangulaires reliant des points caractéristiques. On peut distinguer le maillage global - pour lequel entre quatre coins d'une grille, deux triangles seront reconstitués - du maillage allégé - limitant le nombre de facettes selon des critères de pente, de distance entre deux points, ou de distance entre un point et un plan. [Singh et Fiume 1998 ; Xu et al. 2006 ; Sorkine et Alexa 2007], l'algorithme va donc simplifier certaines zones selon des paramètres dont l'utilisateur peut garder le contrôle. Dans *MicMac* et *CloudCompare*, l'algorithme utilisé est le *Screened Poisson Surface Reconstruction* [Kazhdan et Hoppe 2013]. Générant des fichiers lourds, le maillage global offre l'avantage de ne faire aucune approximation.

5.8 CONCLUSION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une méthode permettant de réduire les dérives altimétriques des ouvrages linéaires. Cette méthode n'étant pas infaillible, des points d'appui sont utilisés pour contrer les dérives résiduelles.

Nous avons rappelé le principe du géoréférencement. Le calcul d'une transformation d'Helmert consiste à trouver la similitude spatiale minimisant les écarts de reprojection des points d'appui. Dans le cas d'une aérotriangulation imprécise, cette transformation n'est pas suffisante pour contrer les dérives.

Deux méthodes de correction ont été présentées. L'inclusion de points d'appui dans l'ajustement des faisceaux est la méthode la plus populaire en photogrammétrie numérique. Le problème consiste alors à trouver la meilleure pondération entre points homologues et mesures terrain. Nous avons revu la fonction de pondération utilisée de manière à favoriser les points aux résidus faibles. Nos essais ont aussi démontré que libérer les paramètres d'orientation interne permet de diminuer la dérive.

Dans une seconde approche, nous avons proposé une procédure simplifiée pour corriger les déformations spécifiques aux ouvrages linéaires. En appliquant une fonction de correction polynomiale, on peut d'une certaine façon aplatir le repère caméra et contrer les dérives paraboliques. La procédure est plus rapide et donne de bons résultats lorsque l'imprécision est due à une mauvaise estimation du modèle caméra. Afin de contrer les dérives de forme plus irrégulière, des polynômes de degré plus élevé pourraient permettre d'améliorer encore les résultats, au prix de points d'appui supplémentaires.

Enfin, à partir de ces orientations précises, nous pouvons générer des modèles 3D. Le principe de la mise en correspondance par corrélation dense étant entièrement automatisé, nous allons chercher à en estimer la précision. Nous pourrions ainsi vérifier si ces modèles permettent effectivement de répondre aux objectifs de précision.

CHAPITRE 6

6 - ÉVALUATION

La création de modèles 3D permet aujourd'hui de nombreux usages. Utilisé comme outil de communication ou dans l'industrie du divertissement, la qualité visuelle sera le principal critère de qualité recherché [Lavoué, 2011 ; Wang et al. 2012]. Utilisé à des fins d'auscultation industrielle, de mesure ou de reproduction fidèle, la qualité métrique du modèle est essentielle.

Un calcul d'orientation précis est une étape nécessaire à ce dernier objectif. Une fois les images positionnées et orientées, le calcul de la position 3D d'un détail saisi sur plusieurs images est aisé (pseudo-intersection de faisceaux). Les avancées algorithmiques de cette dernière décennie permettent désormais l'appariement automatique des pixels d'une série d'images [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis 2006 ; Snavely et al. 2006 ; Wu 2011], aboutissant non plus à la création de plans ou de modèles 3D filaires (néanmoins toujours possibles), mais à celle de modèles surfaciques plus complets.

Cette automatisation nécessite toutefois des procédés de contrôle afin de vérifier que la qualité du modèle numérique soit du même ordre que celle du calcul d'aérotriangulation. Nous présentons dans cette partie des méthodes de contrôle de modèles surfaciques. Les méthodes de comparaisons entre modèles 3D et leur évaluation sont discutées puis appliquées aux jeux de données présentés dans les chapitres précédents. Les résultats obtenus avec d'autres logiciels sont mis en relief avec ceux obtenus via le *workflow* proposé en [Annexe 2](#) du second Tome, et une illustration de l'intérêt de ces données pour un suivi d'évolution diachronique des ouvrages hydrauliques est présentée.

6.1 MÉTHODES DE COMPARAISONS

Les modèles 3D peuvent recouvrir de multiples formats (§5.7), et il existe donc de nombreuses méthodes de comparaisons. L'intérêt de comparer des modèles 3D consiste à effectuer des analyses diachroniques (comparaison avec un modèle antérieur) ou en contrôler la précision géométrique (comparaison avec une vérité terrain). Partant de données sous la forme de nuage de points, nous nous intéressons dans cette partie aux comparaisons :

- avec un modèle grille ;

- avec un second nuage de points ;
- avec un modèle maillé.

Il est nécessaire avant toute analyse, d'identifier les éléments à comparer, ainsi que leur présence dans les deux modèles. Pour surveiller l'évolution d'une digue au cours du temps, il faudra par exemple isoler la structure dans les deux modèles, en retirant les zones ne présentant pas d'intérêt. Les surfaces hydrauliques éventuellement modélisées seront donc retirées, au même titre que la végétation (arbres, herbe non rase,...), les véhicules sur place,... On veillera aussi à ce que le modèle de référence « englobe » le modèle à évaluer (Figure 81). Le cas échéant, l'analyse d'évolution d'un ouvrage peut être perturbée (exemple : Figure 98).

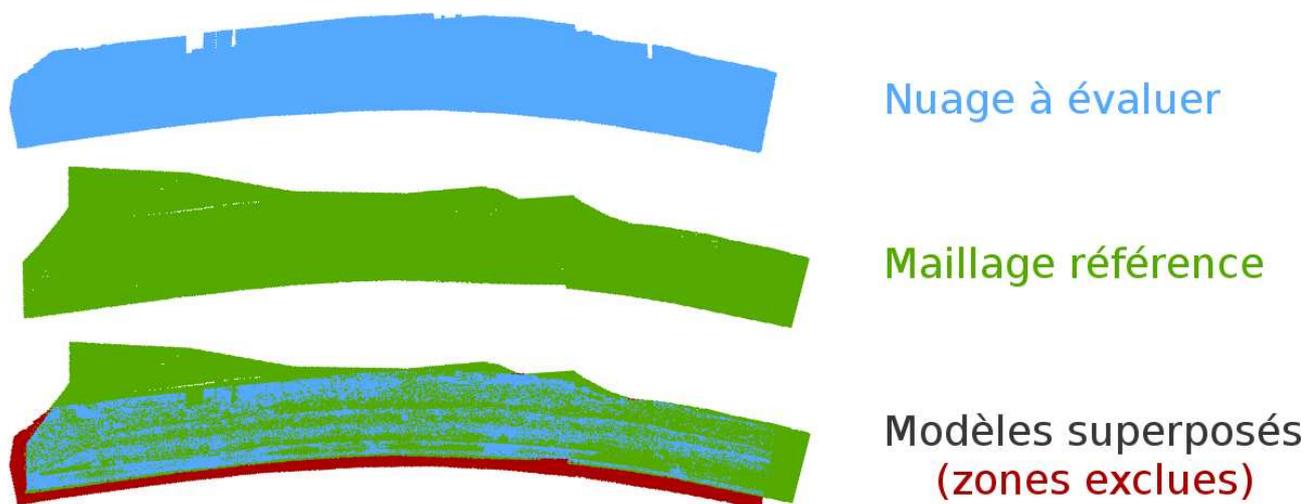


Figure 81: Le modèle de référence doit être plus vaste que le modèle à évaluer.

6.1.1 COMPARAISON AVEC UN MODÈLE GRILLE :

La comparaison entre des modèles grille (Figure 82) se déroule en deux étapes :

- la grille à évaluer est transformée afin d'être superposable à la grille de référence (origine, orientation, nombre de pixel et résolution identiques), une seule valeur étant conservée par nœud (aucun surplomb donc dans le cas d'un modèle aérien) ;
- pour chaque nœud, une simple soustraction entre les données altimétriques permet d'identifier un changement altimétrique.

La comparaison grille à grille est particulièrement utilisée pour la détection de changements résultants d'imagerie satellite [Rosu et al. 2015 ; Barisin et al. 2009]. Cette méthode se limite à analyser des déplacements 1D, altimétriques dans le cas aérien/spatial, et dans le sens de la profondeur dans le cas terrestre. Elle est très adaptée pour détecter des « *flashes* » (exemple : nombre et hauteur de bâtiments neufs dans une zone en construction).

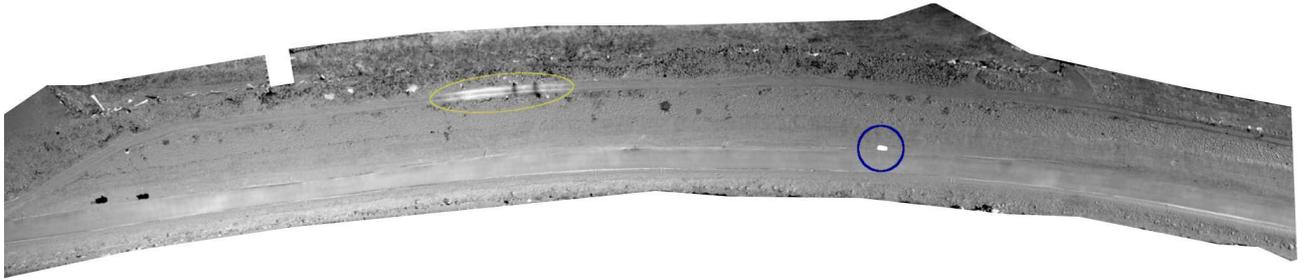


Figure 82: Comparaison grille à grille effectuée via la suite MicMac. Un gradient indique la dispersion des écarts entre deux MNE, le blanc indiquant des changements importants. On repère la présence d'un véhicule (cercle bleu), d'un flash correspond à des travaux d'aménagement (ellipse jaune).

6.1.2 COMPARAISON AVEC UN NUAGE DE POINTS :

Il existe de nombreuses stratégies pour comparer deux nuages de points [Girardeau-Montaut et al. 2005]. L'approche utilisée par CloudCompare consiste à calculer pour chaque point du nuage à évaluer la distance de Hausdorff avec le nuage de référence. Il s'agit de la distance au plus proche voisin, et non de la distance par rapport à un plan, ce qui est problématique dans les zones où le nuage de référence est de faible densité (Figure 83).

Particulièrement inadaptée à l'évaluation des résultats de scans lasers pour lesquels la densité est fonction de la distance par rapport à la station de scan (Figure 88), cette technique peut montrer un intérêt pour les nuages de points issus de la photogrammétrie. En utilisant deux modèles de résolution égale et constante, cette méthode est plus robuste, bien que sujette à la précision du calage.

Pour être rigoureuse, la comparaison entre deux nuages de points nécessiterait des données de densité plus fine que les déplacements recherchés, ce qui implique un accroissement des données et complexifie un problème qui peut être résolu par d'autres moyens. Ce type de comparaison est aussi problématique dans les zones lacunaires, comme peuvent l'être des zones ponctuellement

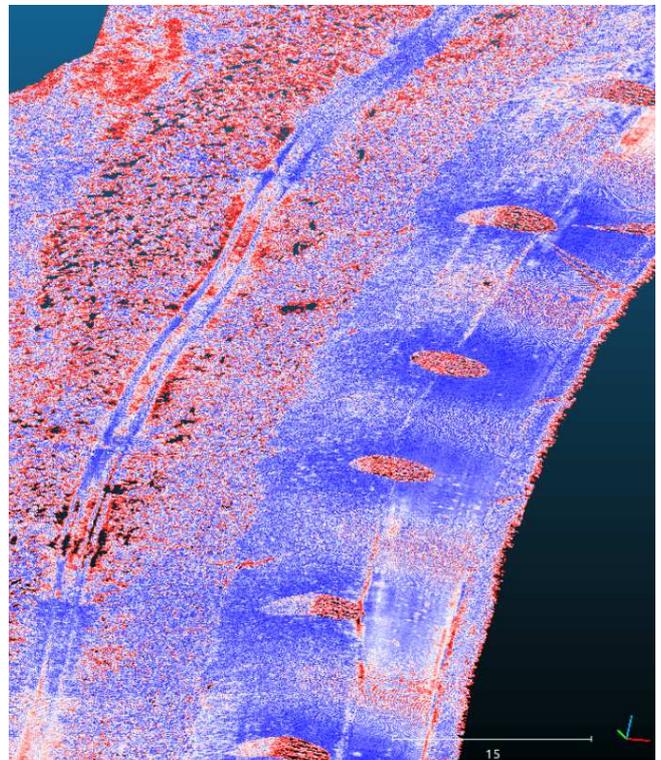


Figure 83: Comparaison entre deux nuages de points issus d'un scan laser terrestre. On détecte des écarts importants sous les stations de scan, où la densité de points est minimale. Les écarts les plus importants n'indiquent pas forcément une déformation de la surface, ce qui pourrait perturber un suivi diachronique.

surexposées dans les images, des zones végétalisées,...

6.1.3 COMPARAISON AVEC DES MODÈLES MAILLÉS :

La comparaison avec un maillage tridimensionnel permet de contourner la faiblesse de la comparaison nuage à nuage dans les zones lacunaires. À ces endroits, une triangulation permet de reconstruire une surface et ainsi d'effectuer des mesures par rapport à ce plan (Figure 84).

À travers ces mesures, on calcule donc la distance par rapport au modèle lui-même, et non par rapport au plus proche voisin. Il s'agit d'une distance 3D, robuste aux zones lacunaires (pourvu qu'elles soient remaillées) ainsi qu'aux changements de densité, et permet de prendre en compte d'éventuels surplombs. La comparaison avec un maillage tridimensionnel est à privilégier pour les problématiques de détection de changements sur des objets 3D (ex : une statue modélisée à 360°, la méthode grille est complexe à appliquer et la comparaison nuage à nuage sujette aux défauts précédemment énoncés).

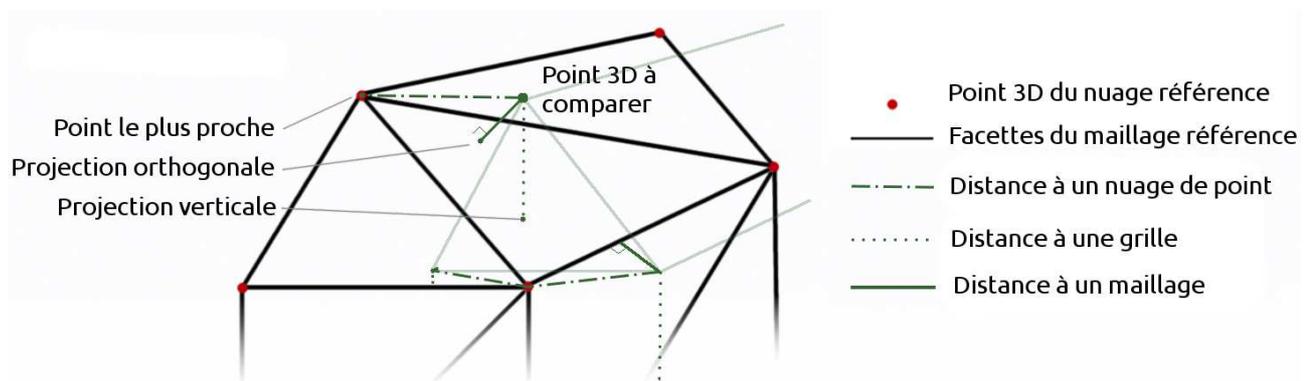


Figure 84: Comparaison des différentes méthodes de comparaison. Il faut être vigilant à sélectionner une méthode appropriée

Étant accessible dans plusieurs logiciels (CloudCompare, 3DReshaper,...), ce type de comparaison a été sélectionnée en accord avec la Compagnie Nationale du Rhône pour évaluer la précision des modèles 3D ou en faire un suivi diachronique.

6.2 MÉTHODES D'ÉVALUATION

Selon [BIPM et al. 2008], l'incertitude qualifie la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande. Jusqu'ici, nous avons analysé l'évolution des erreurs de reprojction de points de contrôle pour estimer la précision des orientations calculées. La somme de ces écarts étant nulle, il est judicieux d'utiliser d'autres indicateurs :

- l'écart moyen absolu (EMA) : $EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}|)$ avec n la taille du mesurande, X_i l'écart pour le point i , et \bar{X} l'écart moyen

- l'écart moyen quadratique (EMQ) : $EMQ = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$

Suivant l'analyse développée par [Willmott et Matsuura 2005], l'utilisation de l'écart moyen absolu nous semble préférable à celle de l'écart moyen quadratique. Le premier donne une mesure moyenne permettant de quantifier la magnitude moyenne des écarts, alors que le second est utile pour caractériser leur dispersion par rapport à la moyenne. Deux indicateurs supplémentaires sont utiles pour qualifier la distribution d'écarts suivant une loi de distribution normale :

- l'écart moyen : $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
- l'écart-type : $\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2\right)}$

Raisonné en termes d'écart moyen et d'écart-type permet, lorsque le cas s'y prête effectivement, d'en déduire les fourchettes de précisions :

- 68,2 % des écarts dans l'intervalle $[\bar{X} - \sigma; \bar{X} + \sigma]$
- 95,4 % des écarts dans l'intervalle $[\bar{X} - 2\sigma; \bar{X} + 2\sigma]$
- 99,6 % des écarts dans l'intervalle $[\bar{X} - 3\sigma; \bar{X} + 3\sigma]$

6.3 CONTRÔLE PONCTUEL

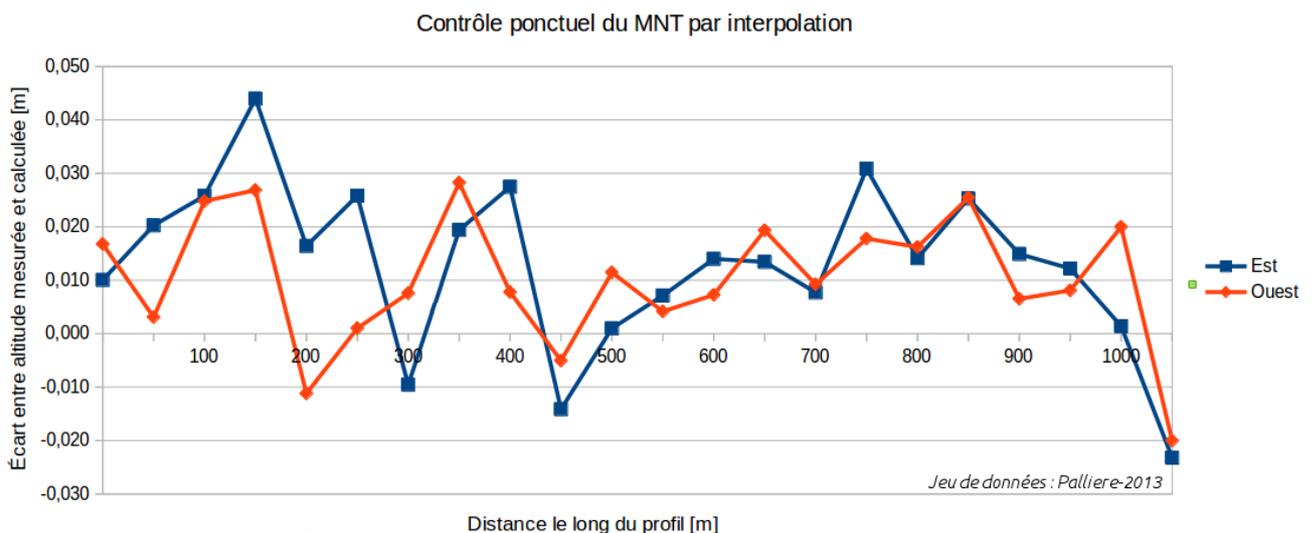


Figure 85: Évolution des écarts entre mesure terrain et point calculé par photogrammétrie. Le graphique montre des écarts importants, posant la question de la pertinence de ce type de contrôle

Historiquement, la précision des résultats issus de la photogrammétrie est estimée à partir de points de contrôle [Grussenmeyer 1994]. Utilisés lors du calcul d'aérotriangulation pour en estimer la justesse, ces mesures sont aujourd'hui

exploitées pour vérifier la qualité du processus de mise en correspondance. Trois méthodes peuvent être distinguées :

- interpoler « à l'aveugle » le modèle numérique à l'emplacement XY de chaque point de contrôle pour en extraire les altitudes calculées que l'on va comparer à celles mesurées sur le terrain (comparaison 1D, idem comparaison avec une grille, Figure 85) ;
- identifier sur le nuage de points ou l'orthophotographie la position de ces références pour en extraire ses coordonnées 3D, à partir desquelles une comparaison 3D devient possible (idem comparaison nuage à nuage) ;
- comparer un nuage de points de contrôle à un maillage tridimensionnel (idem comparaison nuage à maillage, Figure 86).

La première méthode nécessite un modèle numérique d'une précision planimétrique supérieure à la résolution pixellaire. Elle peut par exemple être automatisée en utilisant les outils disponibles dans la suite *MicMac* (quelques lignes de script) ou de la bibliothèque *ÉLISE* (développement C++).

La seconde méthode est plus accessible, mais aussi plus coûteuse. Elle nécessite qu'un opérateur parcourt le modèle numérique et y repère visuellement les références. Elle permet néanmoins de s'affranchir des défauts planimétriques et même de les quantifier. Ce processus est fastidieux, et nécessite des nuages de points à très haute résolution et des cibles de dimensions suffisamment importantes pour être correctement modélisées.

Le repérage sur orthophotographie est

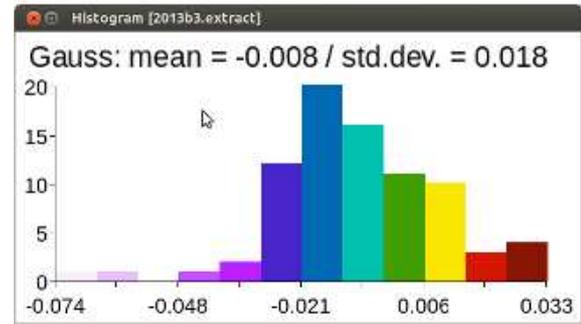
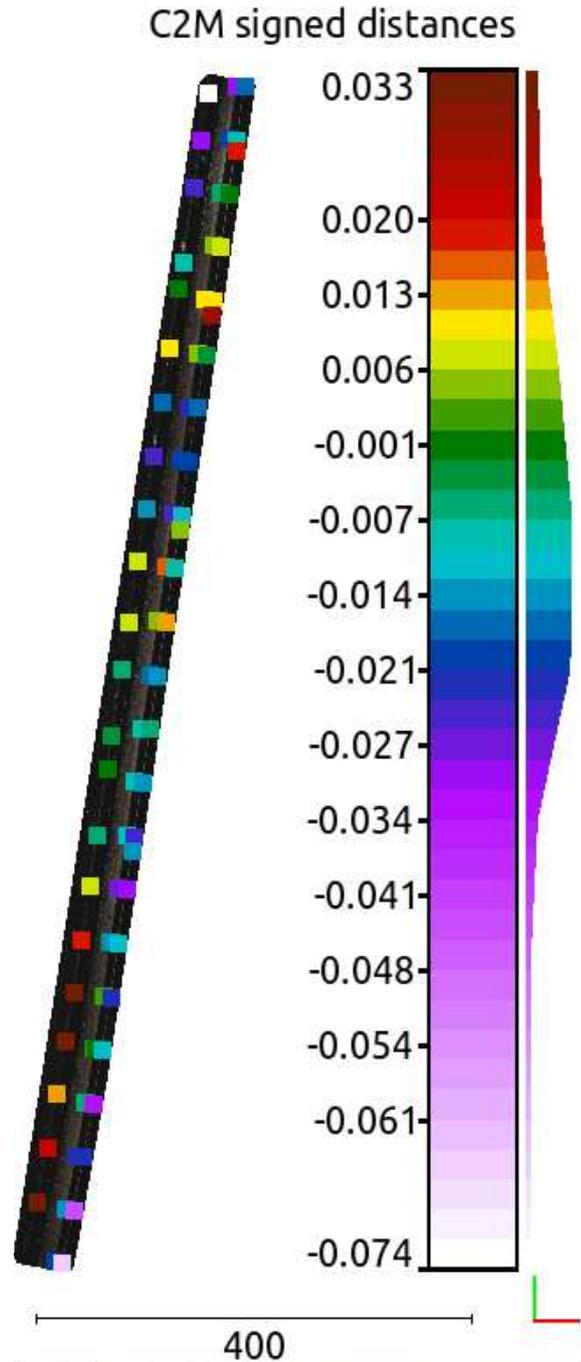


Figure 86: Contrôle ponctuel avec un maillage sur Pallière-2013 (11 appui)

soumis aux même contraintes (fichiers lourds et difficiles à manipuler). En utilisant les coordonnées images du MNT, on peut alors appliquer la première méthode en interpolant le MNT non plus « à l'aveugle », mais afin d'extraire des points effectivement identifiés.

La troisième méthode est certainement la plus accessible, les outils nécessaires étant implémentés dans divers logiciels (nous avons retenu le logiciel libre et ouvert Cloud Compare). Il s'agit d'effectuer une comparaison entre le maillage reconstitué à partir des images drone, et un fichier contenant les coordonnées des points de contrôle.

Ces méthodes de contrôle sont toutefois sujettes à des erreurs de modélisation ponctuelles. L'approche multi-échelle employée fait intervenir un facteur de régularisation. Afin de limiter le bruit présent dans la modélisation, le processus va comparer l'altitude calculée pour un pixel donné avec celle affectée à ses voisins. Si l'écart est inférieur à une certaine limite (définie par le facteur de régularisation), le point est validé. Sinon, une altitude intermédiaire est calculée, ce qui a un effet de lissage sur le modèle global.

Les mesures terrain étant généralement implantées dans le sol, elles peuvent former une petite butte qui va être lissée lors du calcul du modèle (Figure 87). Au vu de ces éléments, l'évaluation des modèles par le biais de points de contrôle semble inadaptée. Les comparaisons effectuées font apparaître des écarts importants qui ne nous semblent pas significatifs de l'exactitude des modèles générés.

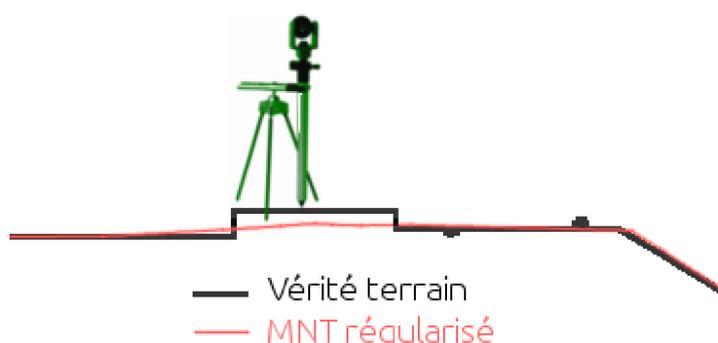


Figure 87: La régularisation du MNT engendre un lissage qui permet de réduire le bruit du modèle. Cependant, il rend obsolète le contrôle ponctuel des modèles lorsque les références ne sont pas implantées au niveau du sol

6.4 ÉVALUATION AVEC RELEVÉ LiDAR TERRESTRE

L'évaluation d'un modèle 3D par des points de contrôle étant sujette à des erreurs ponctuelles, il semble nécessaire de recourir à des vérités terrain de même nature (modèles surfaciques). Une évaluation de la capacité du LiDAR terrestre à mesurer des déplacements fins est le point de départ de cette étude.

Menés en 2013 par la société 3DScanMap, deux relevés ont été conduits sur la digue de Rochemaure [Robin 2013], en fixant l'objectif de précision à 3 cm (à deux sigmas). L'opération, a nécessité environ une journée par tranche de 200 mètres linéaires (pour chaque lever).

En se référant à la répartition des points sur l'ouvrage (Figure 88), on constate que

les méthodes de comparaison nuage à nuage ne sont pas adaptées. En effet la couverture LiDAR présente des zones de faible densité (sous les stations de scan : moins de 100 points/m²). La comparaison point à point ferait apparaître des écarts 3D, alors qu'aucun changement altimétrique n'a été mesuré.

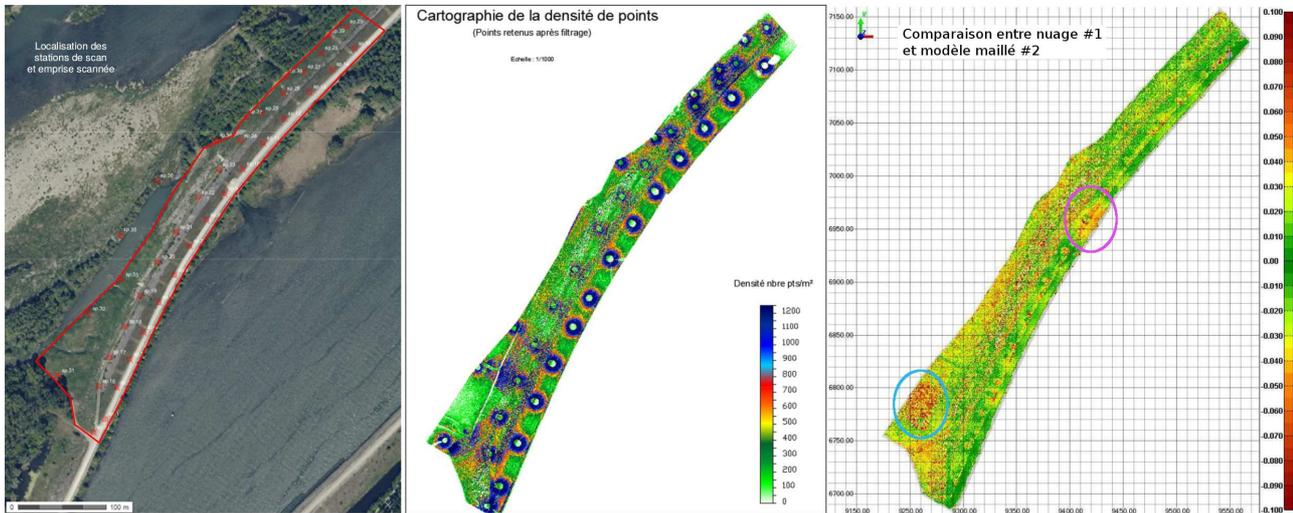


Figure 88: Relevé LiDAR terrestre effectué par 3D Scan Map, avril 2013. Plan de localisation des stations (à gauche), densité de points résultante (au centre), et comparaison entre deux relevés terrestres (à droite). Le test montre des écarts importants sur les zones végétalisées et de faible densité (ellipse bleue), mais aussi sur des zones stables à forte densité (ellipse rose) ce qui représente un faux positif.

Deux modèles ont été générés par photogrammétrie : un premier en utilisant les 24 points d'appui (plus aucun point de contrôle), et un second avec seulement 6 points (un point par tranche de 100 mètres linéaires, et donc 19 points de contrôle). Visuellement parfaits, nous allons chercher à estimer la précision géométrique de ces données en les comparant avec les scans LiDAR.

Considérant le LiDAR comme la référence, ces nuages de points ont été transformés en maillage tridimensionnel en appliquant la méthode de Delaunay [Borouchaki et al. 1997]. Les comparaisons nuage drone à maillage terrestre font apparaître des écarts importants (Table 9). Ceux-ci sont explicables par la présence de couverture végétale s'étalant le long de la digue et des zones humides présentes. Deux mois séparant le relevé LiDAR du relevé photogramétrique, il est tout à fait normal de constater une évolution de la zone.

Nuage de point photogramétrique	Maillage tridimensionnel sur toute la zone			
	LiDAR 1		LiDAR 2	
	μ [mm]	σ [mm]	μ [mm]	σ [mm]
28 points d'appuis	1,2	35,7	-1,5	34,4
6 points d'appuis	2,0	36,2	-1	35
Nuage de point photogramétrique	Maillage tridimensionnel sur zone stable			
	LiDAR 1		LiDAR 2	
	μ [mm]	σ [mm]	μ [mm]	σ [mm]
28 points d'appuis	1,4	19,6	-0,7	18,4
6 points d'appuis	0,2	21,3	-1,1	19,5

Table 9: Évaluation des résultats obtenus par photogrammétrie face à ceux obtenus par LiDAR

On remarquera cependant que la réduction du nombre de points d'appui retenus pour le calcul du nuage drone ne semble pas être source de dérive, signe que le calcul d'orientation et de compensation est adapté avec peu de références. Il est également rassurant de constater que sur la quasi-totalité des enrochements, au même titre que sur la piste de crête (les zones stables - en rose sur la Figure 89) les indicateurs statistiques sont plus flatteurs : les écarts-types sont réduits d'environ 40 % (environ 20 mm), avec des écarts moyens relativement faibles. Malgré le délai séparant les acquisitions, ces zones semblent les plus adaptées à une évaluation.

La comparaison de la photogrammétrie par drone et du scan laser terrestre fait donc apparaître des écarts faibles, et finalement assez proches de l'objectif de précision du relever LiDAR terrestre. Il est en fait relativement complexe d'établir avec ces technologies des vérités-terrain dont l'incertitude est encore plus faible. Il faudrait pour cela raffiner le protocole de relevé (trépieds lourds, beaucoup de répétabilité dans les mesures topographiques, système LiDAR plus précis, ...), ce qui aurait un impact certain sur le coût de telles acquisitions. Deux méthodes de contrôle alternatives sont présentées afin de contourner l'imprécision du contrôle ponctuel et le coût d'une vérité-terrain précise.

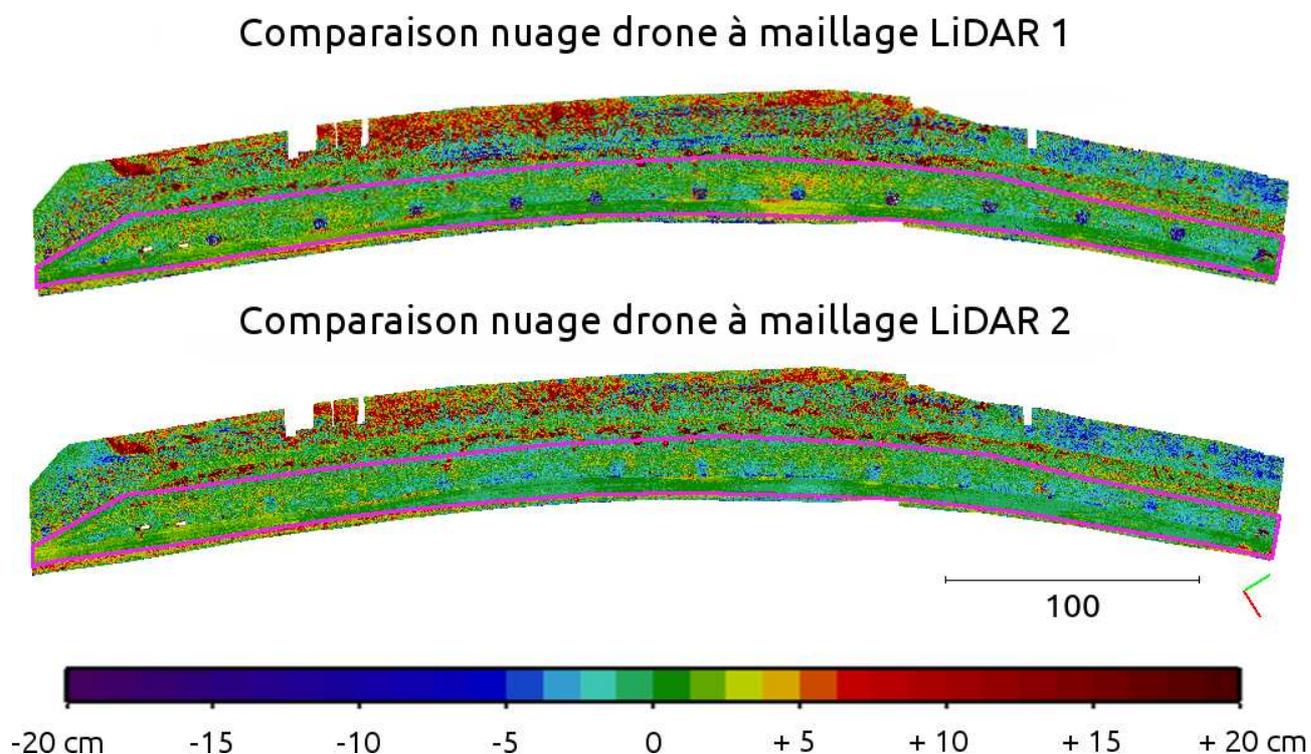


Figure 89: Comparaison entre le nuage de points issu de la transformation des images drone (1 point d'appui tous les 100 mètres, soit 6 points), par rapport aux maillages tridimensionnels reconstitués à partir de scans lasers terrestres. Outre les zones où la végétation est dense, on constate des écarts importants sous les stations de scan (LiDAR 1), dus à des difficultés de remaillage. La zone entourée en rose est relativement dépourvue de végétation ; elle permet une évaluation cohérente des résultats.

6.5 CONTRÔLE PAR RÉPÉTABILITÉ

Le contrôle d'un modèle à partir de points de contrôle pouvant être faussé par des défauts de modélisation ponctuels, et l'établissement d'une vérité terrain par LiDAR terrestre étant coûteux et de précision limitée, les analyses menées précédemment ne sont pas forcément adaptées à notre problématique. Une méthode alternative consiste à organiser deux relevés d'une même zone indépendamment. Dans un cas parfait, la comparaison entre les deux modèles ne devrait faire apparaître aucun écart.

Le relevé LiDAR terrestre sur Rochemaure (§6.4) et les acquisitions photogrammétriques Avignon-S2, Pallière-2014 et Palliere-2015 ont fait l'objet d'une telle évaluation. Le premier jeu a pour but d'évaluer la répétabilité du système LiDAR employé ainsi que sa faculté à ausculter des digues. Le second jeu, pour lequel la société Redbird est intervenue pour la phase d'acquisition, a permis de déployer un système drone à voilure fixe. Les jeux acquis sur La Pallière couvrent respectivement un linéaire de 600 et 1100 mètres, survolé par un drone à voilure tournante embarquant successivement le Sony DSC-RX1 (Palliere-2014 a et b, Palliere-2015 a et b) et la Camlight de l'IGN (Palliere-2015c). Enfin et sur le même site, l'Hélicoptère ULM, exploité par Vinci Construction Terrassement, a été expérimenté afin d'évaluer sa capacité à relever de long linéaires (§3.3.3).

En organisant des acquisitions à quelques heures d'intervalle, des modèles 3D ont été générés en utilisant le *workflow* présenté en [Annexe 2](#) du second Tome (points d'appui identiques). Un modèle est transformé en maillage tri-dimensionnel, le second en un nuage de point. Les comparaisons nuage à maillage font apparaître des écarts que l'on peut caractériser avec une loi normale. La [Table 10](#) résume les indicateurs relatifs à chaque acquisition. On y constate qu'à travers cette méthode, les relevés LiDAR terrestre sont de précision légèrement plus faible que ce qui était prévu (environ 4 cm à 2 sigmas).

Les précisions des calculs d'aérotriangulation atteintes avec le système Gatewing UX-100 sur Avignon semblaient encourageantes ([Table 7](#), écarts moyens absolus de 1,7 et 2,8 cm). Le test de répétabilité montre que les résultats atteints sont convaincants avec 23 points d'appui, mais que des dérives sont bien plus importantes lorsque que la quantité de points d'appui décroît.

L'expérimentation menée sur Palliere-2014, sur un linéaire relativement similaire à celui d'Avignon, confirme que les résultats sont logiquement meilleurs en volant plus bas, avec un appareil photographique de bonne qualité, et en ajoutant des images obliques. Lorsque le nombre de points d'appui diminue, les résultats restent relativement maîtrisés. Ce test est néanmoins entaché d'erreurs de modélisation sur le bas de la digue, où des herbes hautes perturbent l'analyse des écarts ([Figure 98](#)). Lorsque ces zones sont exclues, les écarts-types sont diminués d'environ 50 %, et les écarts moyens relativement plus faibles.

Chantier	Nombre de points d'appuis utilisés		Moyenne [mm]	Écart-type [mm]
	Maillage référence	Nuage comparé		
Rocheмаure – LiDAR Terrestre – 600 m linéaires	7	10	-2,9	19,2
	10	7	2,0	19,6
Avignon-S2 Ricoh GR IV – h=150m 600 m linéaires	23	23	15,2	27,8
	23	6	55,7	163,8
	6	6	30,2	159,5
Pallière-2014a-b Sony DSC-RX1 – h=60m 600 m linéaires	28	28	6,6	19,1
	28	6	13,3	23,0
	6	6	-7,7	31,7
Pallière-2015a-b Sony DSC-RX1 Hauteur = 60 m 1100 m linéaires	71	71	2,7	20,6
	71	11	9,0	25,0
	11	11	-4,4	20,5
	6	6	-2,5	23,9
	71	6	-6,2	23,1
Pallière-2015a-c Référence = RX1 Comparé = CamLight Hauteur = 60 m 1100 m linéaires	71	71	-4,0	19,7
	71	11	-4,5	21,0
	11	11	-4,3	14,6
	6	6	-7,1	15,1
	71	6	-2,9	15,4

Table 10: Résultats des tests de répétabilité menés en faisant varier le nombre et la répartition des points d'appui

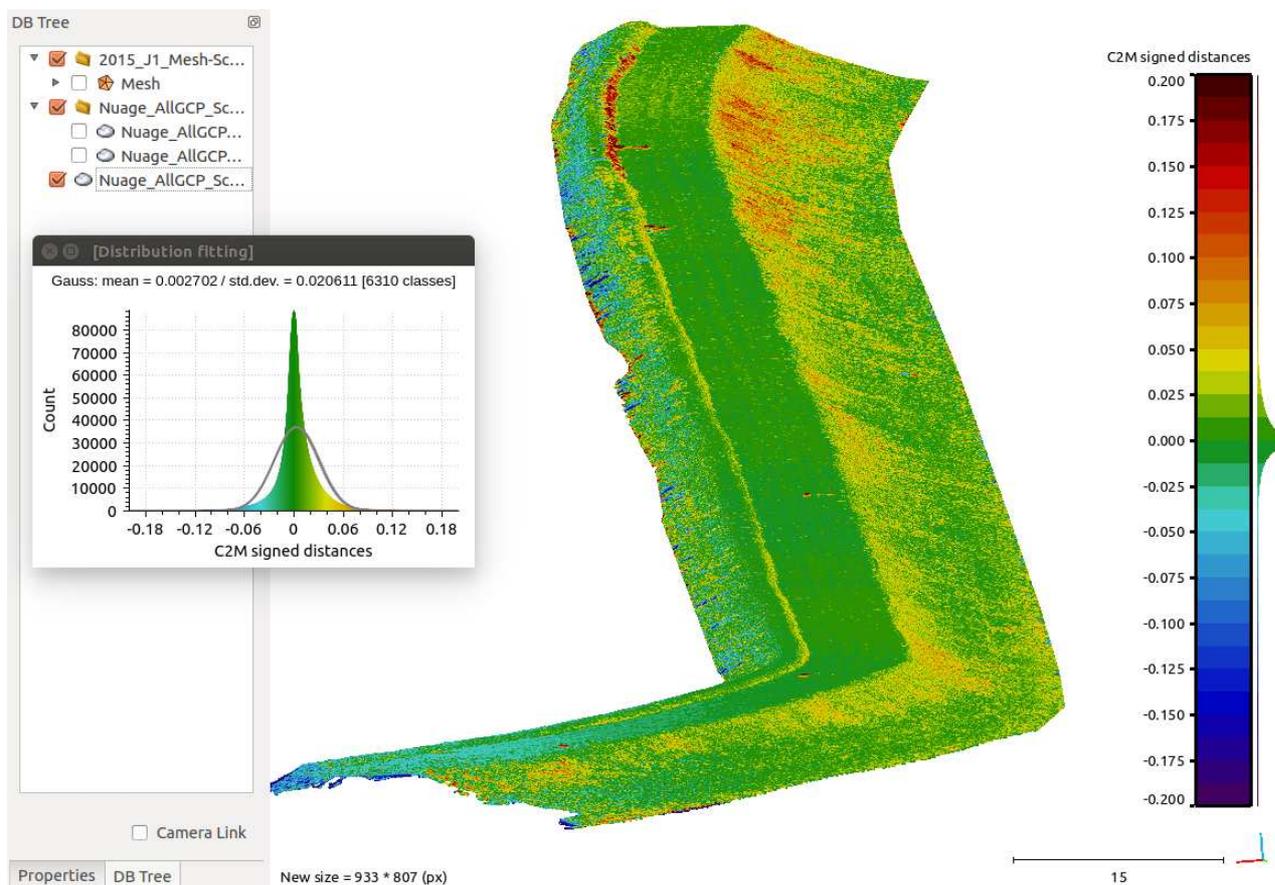


Figure 90: Test de répétabilité entre Palliere-2015a et Palliere-2015b, tous générés en utilisant 71 points d'appui. La comparaison nuage à maillage, effectuée avec le logiciel CloudCompare, fait apparaître de faibles écarts sur le chemin, dépourvu de végétation. En revanche, les zones enherbées sont plus complexes à modéliser.

Sur la comparaison entre les jeux Palliere-2015a-b-c, ce sont des rejets sur le bord du cavalier qui viennent détériorer l'analyse (Figure 91). Les données montrent cependant qu'en utilisant un point d'appui par tranche de 100 mètres linéaires, la photogrammétrie par drone permet d'atteindre des mesures de précision comparable (voire supérieure) à celles atteintes par LiDAR terrestre.

La comparaison entre des modèles établis avec des appareils photographiques et des optiques différents (Pallière-2015, acquisitions au Sony DSC-RX1 et avec la Camlight) sont encourageants. Ils montrent une fois de plus que les mesures effectuées avec le premier prototype de Camlight sont de bonne qualité. Les écarts avec le modèle maillé issus des images du Sony DSC-RX1 sont les plus faibles mesurés.



Figure 91: Présence de rejets inadaptés à l'auscultation photogrammétrique aérienne. Pour de meilleurs résultats, une tonte fine est préférable.

Dans les parties où la mise en correspondance est complexe (principalement la végétation), il est normal que les écarts y soient plus importants. En restreignant l'étude de répétabilité aux zones les plus stables, les indicateurs sont plus favorables. La Figure 90 montre que même en utilisant tous les points d'appui disponibles, le processus de corrélation dense est imprécis dans ces zones. Ce test de répétabilité est néanmoins satisfaisant sur les enrochements et les pistes en gravier.

Le test de répétabilité peut donc être utilisé pour dissocier les zones dans lesquelles le calcul de mise en correspondance est efficace. Par raisonnement opposé, on peut ainsi estimer les zones sur lesquelles la nature du terrain complique le suivi d'évolution diachronique. Cette méthode permet aussi de repérer d'éventuels systématismes (par exemple, un défaut de calibration impliquera une courbure d'au moins un des deux modèles).

Le contrôle par répétabilité donne une mesure de la dispersion des résultats. Elle est cependant coûteuse et peut être compliquée à mettre en place, spécifiquement du point de vue d'un donneur d'ordre cherchant à estimer l'exactitude d'un modèle 3D qu'il aurait commandé.

6.6 CONTRÔLES SURFACIQUES PONCTUELS

Le contrôle ponctuel d'un modèle surfacique n'étant pas adapté aux défauts de modélisation, et l'établissement d'une vérité terrain surfacique globale étant coûteuse, nous proposons dans ce paragraphe un compromis entre ces méthodes : l'évaluation de modèles 3D par comparaison avec des vérités-terrain surfaciques ponctuelles de taille réduite.

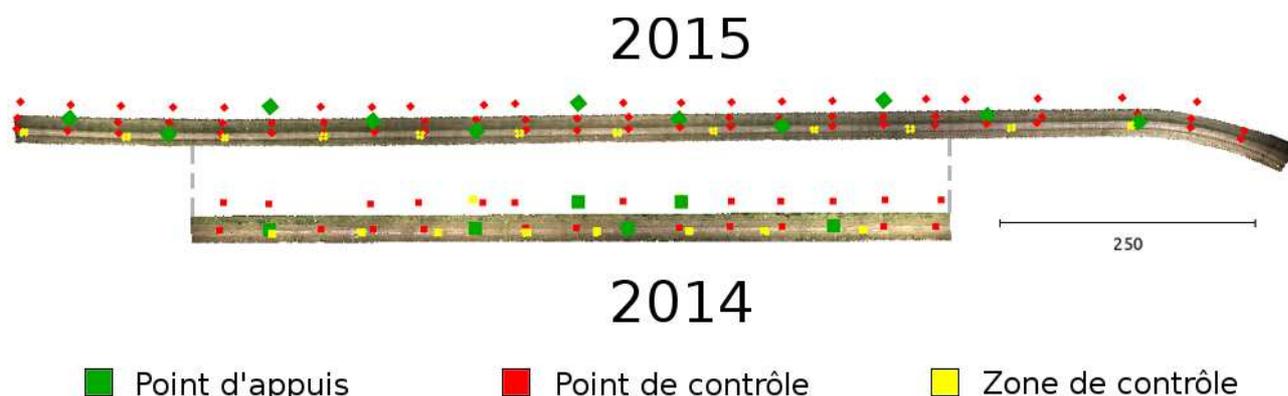


Figure 92: Implantation des zones de contrôle sur les jeux de données Pallière-2014 et Pallière-2015. L'illustration indique également l'emplacement des points d'appui et de contrôle pour les configurations à 6 et 11 points d'appui respectivement.

Sur les jeux de données acquis à La Pallière en 2014 et 2015, nous avons expérimenté la mise en place de zones de contrôle surfacique établies par photogrammétrie terrestre (Figure 92). Matérialisées au sol par quatre cibles aux coins d'un rectangle et une à son centre, une prise de vue terrestre est effectuée afin d'en reconstituer un modèle 3D de résolution submillimétrique. Une zone est utilisée pour déterminer l'orientation interne de l'appareil photographique, à partir d'une prise de vue circulaire (environ 50 images). Cette calibration est figée et appliquée sur les prises de vue suivantes (5 à 8 images sur deux axes de prises de vue en sens opposés, Figure 93).

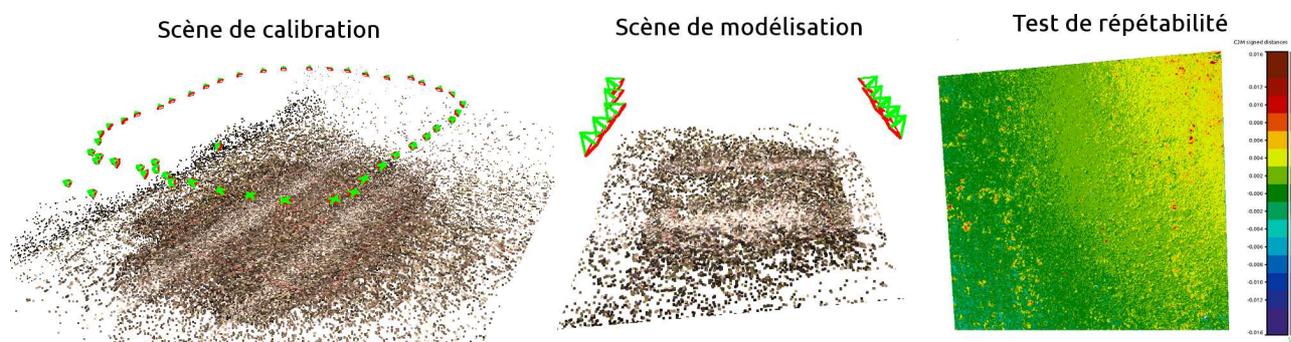


Figure 93: Une prise de vue circulaire (à gauche) permet de déterminer les paramètres d'orientation interne. Les zones suivantes sont modélisées à partir de quelques images (au centre). Un test de répétibilité (à droite) montre un écart moyen de 1 mm et écart-type de 2 mm

Zone	2014				2015			
	Images	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Images	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Z1	10	0,5	0,4	0,3	59	0,6	0,8	2,1
Z2	14	0,3	0,3	0,4	28	2,1	2,1	0,1
Z3	14	0,4	0,2	0,3	28	1,3	1,3	0,6
Z4	51	0,4	0,3	0,5	27	2,4	1,9	0,4
Z5	10	0,2	0,4	0,7	31	2,3	1,7	0,2
Z6	11	0,4	0,7	0,3	35	3,3	3,2	0,1
Z7	10	0,4	0,7	0,4	29	1,7	1,9	0,3
Z8	11	2,5	0,8	0,3	31	0,9	0,9	0,4
Z9	16	0,9	0,8	1,5	27	0,8	1,3	3,6
Z10	15	0,3	0,4	0,1	32	0,8	0,9	0,9
Z11	x	x	x	x	29	1,9	0,7	0,4
Z12	x	x	x	x	30	3,0	0,9	0,5

Table 11: Écart moyen absolu de reprojection des points de contrôle sur les placettes. L'acquisition de 2015, menée avec un appareil photographique de qualité moindre et une focale plus longue, fait apparaître des résidus plus élevés malgré un nombre d'images plus conséquent. Ces indicateurs restent néanmoins de l'ordre de grandeur de la précision du relevé

La méthode permet de calculer des MNT terrestres de résolution et de précision millimétrique (Table 11). Disséminées le long de l'ouvrage, ces zones ont une fonction de vérité terrain ponctuelle sur lesquelles les petites mottes de terres ou petits cailloux sont modélisés. On peut alors les transformer en un maillage, et découper le MNT drone aux emplacements de ces surfaces de contrôle (Figure 94).

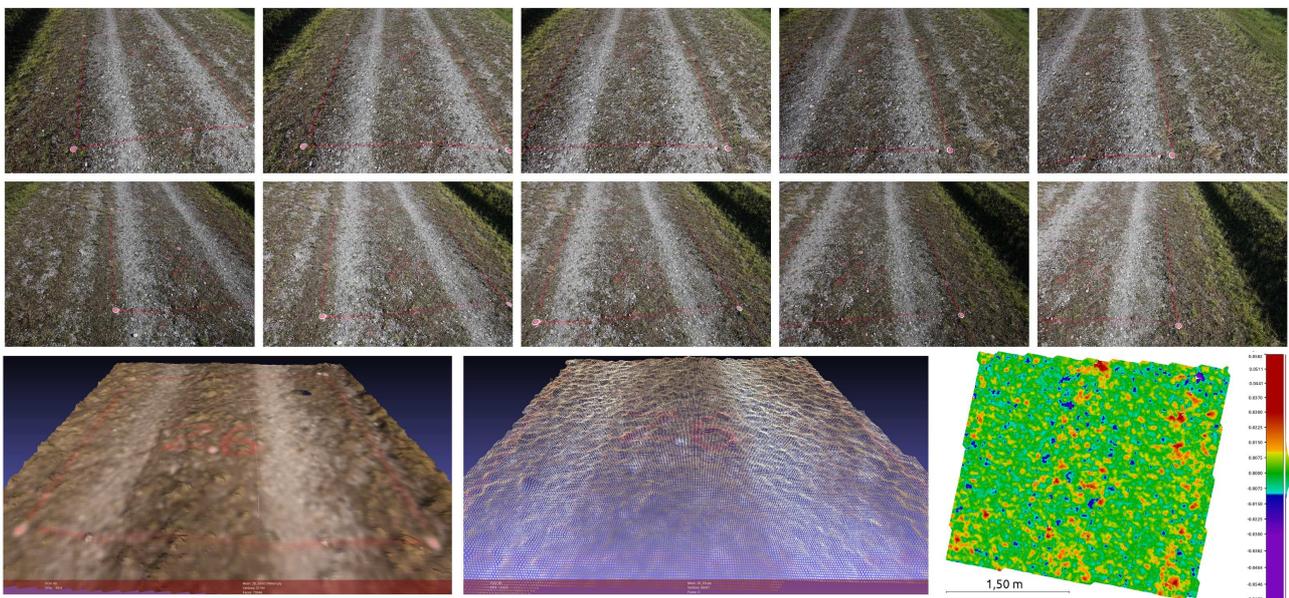


Figure 94 : Images individuelles (en haut), extrait d'une zone de contrôle maillée (bas-gauche), du nuage drone - plus diffus - au dessus de la zone de contrôle (bas-centre), et de la comparaison entre les deux (bas-droite). On constate que les irrégularités du terrain naturel sont modélisées à partir de la prise de vue terrestre, mais sont lissées sur le nuage drone. Cela souligne que le contrôle ponctuel d'un modèle surfacique est inadapté.

La comparaison nuage drone à maillage terrestre fait apparaître pour chaque zone des écarts que l'on peut caractériser par une Gaussienne de moyenne μ_i et d'écart-type σ_i . En considérant que chaque échantillon, indépendamment du nombre d'écarts qui y sont mesurés, représente ponctuellement la précision du modèle, alors on peut qualifier la précision générale par μ , la moyenne des écarts moyens (sur chaque zone), et σ , l'écart-type moyen, tels que :

$$\mu = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_i}{n} \quad \text{et} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n \sigma_i^2}{n}}$$

Jeu	Points d'appuis	Moyenne générale [mm]	Écart-type général [mm]	Écart-moyen minimum [mm]	Écart-moyen maximum [mm]
Pallièrre-2014a 600 m linéaires	23	0,4	5,9	-15,1	8,9
	6	-1,1	6,0	-24,2	10,6
Pallièrre-2015a 1100 m linéaires	71	-0,6	4,8	-13,9	3,1
	11	1,8	4,3	-27,0	25,2
	6	8,4	5,3	-7,9	50,7
Pallièrre-2015c 1100 m linéaires	71	2,2	3,8	0,1	5,5
	11	1,9	4,0	-2,1	7,6
	6	4,2	4,5	-5,8	11,3
Pallièrre-2015-ULM 1100 m linéaires	71	9,7	5,5	-1,0	18,3
	11	16,6	6,1	-1,6	28,3
	6	14,6	8,2	-3,7	28,8

Table 12: Évaluation de la précision des nuages de points (drone) sur les placettes de contrôle (maillage par photogrammétrie terrestre)

La Table 12 illustre pour les quatre acquisitions évaluées selon cette méthode les précisions atteintes. On remarque que, pour les configurations présentées, l'évaluation par cette méthode fait apparaître des moyennes et écarts-types généraux qui correspondent aux attentes de la CNR, à savoir une précision d'un centimètre à 1 sigma. Cependant, l'amplitude entre l'écart-moyen minimum et maximum est à prendre en compte. On constate que certaines zones font apparaître des écarts importants, indépendamment de leur proximité aux points d'appui ou de leur position le long de l'ouvrage.

Lorsque seuls 6 points d'appui sont utilisés pour le calcul du modèle de 2014, on remarque que les placettes Z1 (en bordure) et Z9 (en dehors de la zone d'intérêt), font apparaître les plus gros écarts, en dehors des tolérances (Table 13).

Sur l'acquisition Palliere-2015, les écarts moyens avec les placettes de contrôle sont inférieurs au centimètre, hormis pour Z1 (modèle drone avec 71 points d'appui), Z11 (11 points d'appui), Z7 – Z11 – Z12 (6 points d'appui).

En utilisant la Camlight, seule la configuration avec 6 points d'appui fait apparaître des écarts moyens supérieurs au centimètre (Z2 et Z3, avec des moyennes respectives de 11,3 et 10,4 mm).

Zone	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]
Z1	10,6	7,0
Z2	-0,1	6,3
Z3	2,2	5,6
Z4	2,8	5,8
Z5	0,2	6,2
Z6	1,1	6,6
Z7	-4,7	5,4
Z8	-1,7	5,0
Z9	-24,2	6,8
Z10	2,8	5,3
Général	-1,1	6,0

Table 13: Palliere-2014a - Comparaison entre le nuage calculé en utilisant 6 points d'appui et les placettes de contrôle (maillage)

Enfin, l'acquisition menée par ULM avait pour but d'estimer sa capacité d'intervention sur de longs linéaires pour détecter des évolutions altimétriques de l'ordre de 5 centimètres. Les écarts mesurés sur les placettes de contrôle sont très en deça. Le système déployé (couplage Camlight et DSC-RX1), permettant d'acquérir des images de résolution centimétrique en volant à une hauteur de 150 mètres, donne des écarts relativement similaires à ceux obtenu par drone (Palliere-2015a), même lorsque 6 points d'appui seulement sont utilisés

pour les 1100 mètres linéaires. En effet, les dérives semblent relativement bien maîtrisées puisque les écarts-moyens individuels ne dépassent pas les 3 centimètres, avec des écarts-types de quelques millimètres.

Nous noterons que ces résultats sont possibles grâce à l'application de la procédure d'auto-calibration en trois étapes résumée au §4.5.5 appliqué via MicMac en utilisant le *workflow* en Annexe 2 du second Tome. Ces résultats sont perfectibles, notamment en jouant sur la pondération entre points homologues et points d'appui.

L'évaluation de modèles 3D par comparaison avec des vérités-terrain surfaciques ponctuelles nous semble un compromis intéressant entre le contrôle ponctuel, sujet à des erreurs locales de modélisation, et le contrôle surfacique global, coûteux à mettre en place. Nécessitant en l'état de mesurer plusieurs points par zone de contrôle, la technique peut être améliorée en utilisant par exemple un GPS-RTK. [Daakir et al. 2015] présentent deux méthodes pour calibrer le bras de levier entre centre de phase et centre optique, permettant d'éliminer le recours aux points terrain et de rendre ce type de contrôle viable d'un point de vue économique.

6.7 ÉVALUATION DE MODÈLES 3D PRODUITS À PARTIR DE LOGICIEL COMMERCIAUX

L'automatisation des tâches les plus coûteuses de la photogrammétrie a vu naître un regain d'intérêt pour la discipline. La suite Photoscan développée par Agisoft fait partie des solutions les plus populaires du marché. Forte de plus de 3000 utilisateurs (nombre de membres enregistrés sur le forum), le logiciel intègre de nombreux packs drone + logiciel.

La société Sintégra, à laquelle nous avons fait appel au §5.6 pour calculer les

orientations des chantiers Palliere-2015a, b et ULM, a poussé le processus jusqu'à la création de nuage de points. Neuf nuages ont donc été calculés, en utilisant successivement 6, 11 et 71 points d'appui.

L'évaluation de ces nuages à partir des zones de contrôle est sans appel. Les résultats exposés dans la [Table 14](#) semblent indiquer que ce logiciel, bien que très performants pour de nombreuses applications [[Lisein et al. 2013](#) ; [Remondino et al. 2014b](#)], n'est pas adapté aux chantiers linéaires. Même en utilisant 71 points d'appui (sur 1100 mètres linéaires), les précisions atteintes ne sont pas convaincantes, et moins bonnes que celles obtenues en appliquant la procédure proposée.

Palliere-2015-ULM (Sony DSC-RX1 seul)					
	Logiciel	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Écart-moyen min [mm]	Écart-moyen max [mm]
71 GCP	Photoscan	17,1	11,2	-57,5	84,4
	MicMac	9,7	5,5	-1,0	18,3
11 GCP	Photoscan	42,3	15,0	-24,0	97,6
	MicMac	16,6	6,1	-1,6	28,3
6 GCP	Photoscan	-4,4	17,6	-97,6	108,7
	MicMac	14,6	8,2	-3,7	28,8

Palliere-2015-ULM (PhaseOne iXA 180 seul)					
	Logiciel	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Écart-moyen min [mm]	Écart-moyen max [mm]
71 GCP	Photoscan	1,2	8,6	-18,2	38,2
	MicMac	-4,0	4,5	-11,6	5,2
11 GCP	Photoscan	-6,8	7,6	-53,6	32,5
	MicMac	-6,2	4,9	-14,0	6,0
6 GCP	Photoscan	74,6	17,1	27,2	140,7
	MicMac	4,0	4,9	-9,8	18,1

Palliere-2015a (Sony DSC-RX1 seul)					
	Logiciel	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Écart-moyen min [mm]	Écart-moyen max [mm]
71 GCP	Photoscan	1,1	12,4	-187,7	66,4
	MicMac	-0,6	4,8	-13,9	3,1
11 GCP	Photoscan	17,0	244,2	-453,7	256,2
	MicMac	1,8	4,3	-27,0	25,2
6 GCP	Photoscan	68,7	224,3	-521,1	280,7
	MicMac	8,4	5,3	-7,9	50,7

Table 14: Comparaison entre les nuages produits à partir des acquisitions aériennes, et les 12 zones de contrôle terrestre. Les comparaisons font apparaître pour chaque zone une répartition suivant une loi normale, dont nous donnons ici la moyenne et l'écart-type général, ainsi que les écarts-moyens individuels minimum et maximum (amplitude). De manière générale, les précisions atteintes avec MicMac et 6 points d'appui sont plus satisfaisantes qu'un traitement via Photoscan et 71 points d'appui.

Nous rappellerons que de nombreux logiciels n'ont pu être testés, et que ces résultats ne sont pas significatifs des performances atteignables sur des géométries d'acquisition plus favorables. Nous ajouterons qu'ici, seules les images brutes et points d'appui ont été utilisés, et que les logiciels ne font pas usages des mesures enregistrées par d'autres capteurs (GPS embarqué, centrale inertielle,...)

6.8 SUIVI DIACHRONIQUE

Nous avons présenté des approches pour parvenir à la création de modèles 3D de précision centimétrique. Constitués de centaines de millions de points, ces données à très haute résolution peuvent donc être utilisées pour des applications météorologiques.

Les méthodes actuelles d'auscultation topographique, reposant sur la mesure de repères de nivellement, permettent de dresser des profils dans la longueur de l'ouvrage. En comparant les données récoltées, on peut en tracer l'évolution et repérer, notamment en analysant les vitesses de tassement, des signes précurseurs d'un désordre éventuel.

Le nivellement topographique est de précision satisfaisante (de l'ordre du millimètre), mais sa résolution (1 point tous les 50 mètres linéaires) laisse à désirer. La création de modèles surfaciques par photogrammétrie aéroportée légère est une alternative économiquement viable et de précision comparable aux méthodes LiDAR terrestre.

Deux analyses diachroniques sont présentées ici :

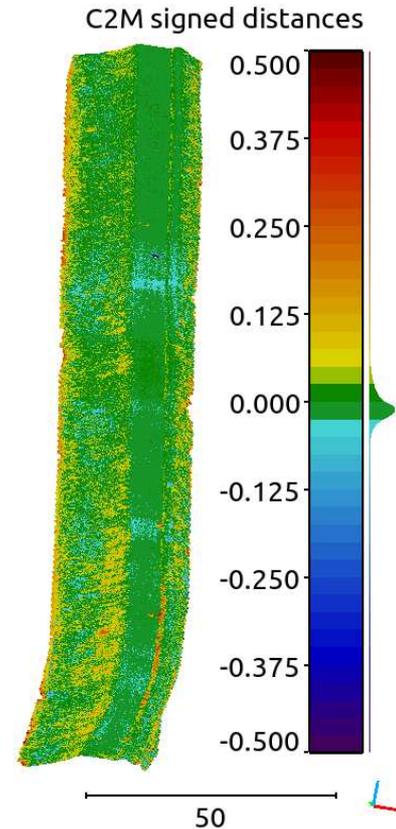


Figure 95: La Pallière -
Vue perspective de la
comparaison entre les
modèles de 2015 (11 points
d'appui) et 2013 (46 points
d'appui)



Figure 96: Modèles reconstitués à partir des prises de vue sur Rochemaure en 2013 (à gauche) et 2014 (à droite). La zone encerclée (en bleu) met en valeur l'arrivée d'eau en pied de digue (à gauche), et l'aménagement réalisé pour prévenir d'une détérioration

- L'évolution de la digue de Rochemaure de 2013 à 2014 (Figure 97) : on constate que l'incident survenu dans le corps de la digue (Figure 96) a pu être comblé par des matériaux. Les évolutions sur le corps de l'ouvrage, de l'ordre de plusieurs centimètres sur la route – a priori stable – pourraient être un signe précurseur d'un défaut interne. Cependant, ce chemin caillouté est emprunté quotidiennement par des dizaines de véhicules poids lourds, se rendant aux travaux de construction aux abords du barrage quelques centaines de mètres plus loin. L'évolution constatée sur ce chemin n'est d'ailleurs pas visible sur les enrochements en contrebas. Or, si une évolution de la structure interne de la digue était responsable des évolutions mesurées sur le chemin, la zone d'enrochements aurait forcément montré des évolutions.

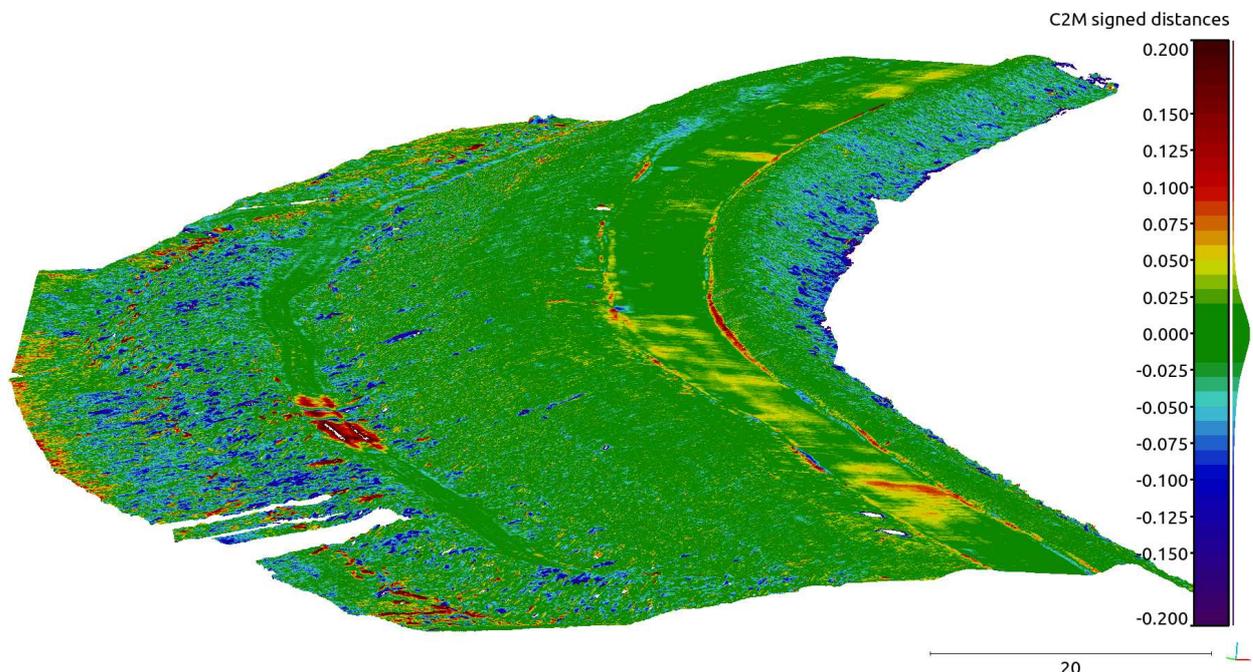


Figure 97: Évolution de la géométrie de la digue de Rochemaure de 2013 à 2014. La zone d'incident (en rouge à gauche) et les changements altimétriques sur la route cailloutée (zones jaunies) ne sont pas corrélées avec des changements sur la zone d'enrochements et le talus en contrebas. Le passage de poids lourds sur un chemin non prévu à cet effet peut être le responsable de ces évolutions.

- L'évolution de la digue de La Pallière de 2013 à 2015 (Figure 95) : les résultats de la comparaison montrent un ouvrage relativement stable. Quelques tassements sont perceptibles sur le corps de l'ouvrage (de l'ordre de 2,5 à 5 cm), sur des zones de quelques mètres carrés. Ces signes pourraient être annonciateurs d'une évolution de la structure interne, mais pourraient aussi n'être que de simples *flashes*. Les changements recherchés concernent des zones de plus vaste amplitude ; ils seront néanmoins l'objet d'une auscultation renforcée. D'une année sur l'autre (comparaisons entre les modèles 2014-2013 et 2015-2014), on constate des écarts importants sur les zones végétalisées, mais aussi bien la route que le talus en contrebas ne

font pas apparaître d'évolution significative (Figure 98).

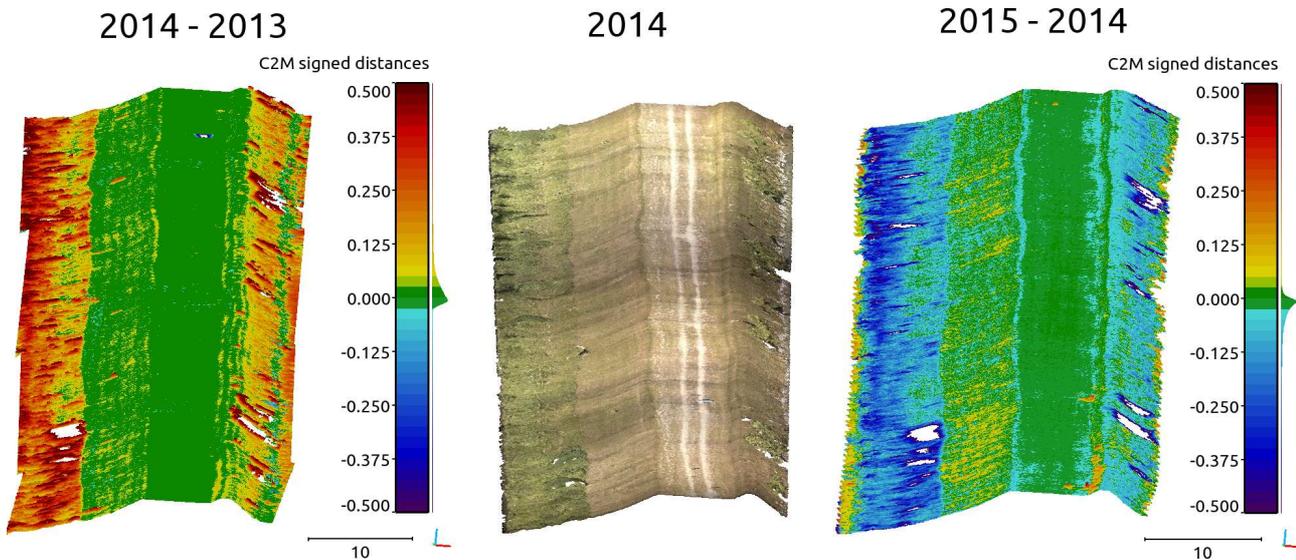


Figure 98: Vue perspective de l'évolution de la partie centrale de la digue de La Pallière, de 2013 à 2015, modèles générés avec 6 points d'appui (hormis le modèle 2014, la « vérité-terrain établie avec 25 points). Les écarts importants sont dus à une tonte irrégulière. Des herbes hautes en bas de talus ainsi que de petits arbustes sur le cavalier de la digue (image centrale) perturbent l'analyse. Une tonte rase est recommandée avant le passage du drone ; à défaut, ces zones doivent être exclues. On remarque néanmoins que la partie centrale présente des indicateurs d'évolution neutres, ce qui est rassurant quant à la stabilité de l'ouvrage, mais valide aussi la précision et l'intérêt de la méthode proposée pour la détection de changements.

6.9 CONCLUSION

Les drones permettent d'acquérir des images à très haute résolution. Avec un traitement photogrammétrique approprié, les photographies peuvent être transformées en des modèles 3D dont nous avons ici cherché à analyser les précisions.

Nous avons vu que le contrôle ponctuel d'un modèle 3D peut être perturbé par des défauts de modélisation locaux dus à la régularisation du modèle numérique affectant certaines mesures. L'établissement d'une vérité-terrain surfacique globale est un second moyen ; néanmoins ce type de contrôle se heurte à un coût économique important, spécifiquement pour les gammes de précision recherchées.

Nous avons présenté l'intérêt d'un test de répétabilité. En acquérant deux jeux de données, deux modèles 3D peuvent être dérivés à faible coût (quasi similaire avec un drone de bonne autonomie). Le test fait apparaître des résultats du même ordre de grandeur que ceux atteints par LiDAR terrestre, mais avec un coût d'acquisition bien plus faible. Les expérimentations menées avec la Camlight, caméra ultra-légère encore en phase de prototypage, confirme les espoirs entrevus dans le chapitre précédent, et montrent une amélioration sensible des précisions atteintes.

Nous avons proposé une méthode de contrôle surfacique ponctuel consistant à répartir le long de l'ouvrage des zones de taille réduite (environ 2 x 2 m) sur lesquels sont produits des modèles numériques de précision millimétrique par photogrammétrie terrestre. Les nuages de points acquis par drone peuvent ainsi être évalués et donner une image de la dispersion des résultats. Cette méthode présente l'avantage de la rapidité d'acquisition et d'un faible coût d'acquisition.

Nous avons montré que la méthode proposée présente un intérêt et une amélioration réelle face aux solutions commerciales évaluées. Aussi bien l'incertitude que la dispersion des résultats sont plus faibles en utilisant la méthode proposée.

Ce chapitre a aussi permis d'isoler la comparaison entre un modèle maillé et un nuage de points comme la méthode la plus effective pour repérer et analyser des écarts tri-dimensionnel. Le suivi métrologique et diachronique des digues est ainsi rendu possible. Pour la CNR, le système répond aux besoins identifiés (auscultation régulière et exceptionnelle, [Table 2](#)), et en prévoit le déploiement opérationnel dès 2016.

CHAPITRE 7

7 - CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le développement fulgurant du drone et des technologies de modélisation 3D (LiDAR, photogrammétrie), permettent désormais d'effectuer des relevés surfaciques à partir de points de vue jusque-là difficilement accessibles, et à un faible coût. À partir de matériels grand public et de logiciels libres et ouverts, nous avons présenté une procédure synthétique permettant d'obtenir une modélisation d'ouvrages linéaires de précision centimétrique, tout en limitant le nombre de points au sol à un seul par tranche de 100 mètres linéaires.

Cette étude a permis de contribuer à la compréhension et à la correction des phénomènes de dérives de bandes. Nous proposons des améliorations relatives à la stratégie d'acquisition, au calcul d'orientation interne, à la compensation sur les points d'appui, et aux méthodes de contrôle des données produites.

15 jeux de données sont présentés à travers cette étude. Des acquisitions ont été menées par drone à voilure fixe et tournante, dans le cadre de plusieurs scénarios législatifs (S1, S2, S4). Nous retiendrons que les systèmes à voilure tournante sont les plus modulables et permettent d'embarquer la charge utile désirée. Leur utilisation est tout à fait adaptée à une utilisation dans le cadre de l'auscultation régulière (besoin n°1, Table 2). Cependant, leur faible autonomie (10 à 20 minutes) et l'impossibilité de les faire évoluer en conditions météorologiques dégradées les limitent aujourd'hui à ausculter de petits zones sous des vents inférieurs à 40km/h.

Type de Porteur	Drone à voilure tournante		Drone à voilure fixe		ULM	
					Hélicoptère	Multiaxe
Législation (H = hauteur ; R = rayon)	H < 150 m R < 100 m	H < 50 m R < 100 m	H < 150 m R < 1000 m	H < 150 m R = ∞	H > 150 m R = ∞	H > 150 m R = ∞
Avantages	Choix de la caméra Prix	Choix de la caméra Grands linéaires	Grands linéaires Vents < 65 km/h		Choix de(s) la caméra(s) Grands linéaires Vents < 80 km/h	Choix de(s) la caméra(s) Grands linéaires Vents < 80 km/h Prix
Inconvénients	Autonomie Vents < 40 km/h Limité aux petits linéaires	Prix Vents < 40 km/h Non testé sur digue	Prix Instabilité en vol Caméras inadaptées Décollage/atterrissage		Prix Peu d'opérateurs	Instabilité en vol Décollage/atterrissage ? Non testé sur digue

Table 15: Retour d'expérience sur les moyens aériens évalués au cours de cette étude

Les drones à voilure fixe permettent de contourner ces restrictions. Les matériels évalués ont cependant présenté l'inconvénient d'une qualité d'image moindre. Quelques années seulement après leur sortie, ces modèles sont déjà dépassés et les nouveaux capteurs embarqués laissent entrevoir des applications météorologiques avec une forte autonomie en vol, permettant de relever de longs linéaires rapidement et notamment en cas de météo agitée (vents jusqu'à 65 km/h).

Soumis à de nombreuses restrictions législatives, le recours à des drones navigant hors de vue est aujourd'hui difficilement envisageable en cas de crise (besoin n°2, [Table 2](#)). L'ULM présente en ce sens un compromis intéressant. Pouvant être déployés avec des vents de 80 à 100 km/h sur plusieurs dizaines de kilomètres, la législation encadrant leur recours est relativement permissive. Les contraintes de hauteur de vol (et donc de résolution d'image) peuvent être contournées en employant des systèmes multi-capteurs.

Nous avons vu que les géométries d'acquisition linéaires sont propices à des phénomènes de dérive altimétrique pouvant aboutir à une modélisation courbée des ouvrages. Deux méthodes sont présentées pour réduire considérablement ces imprécisions.

L'ajout d'images obliques, amenant de la profondeur de champs dans les images et de meilleurs angles d'intersection, permet de consolider la géométrie de la structure, et ainsi d'améliorer sensiblement le calcul d'orientation interne. Les logiciels de photogrammétrie évalués affichent ainsi des indicateurs de précision plus satisfaisants, mais ne répondent pas aux besoins identifiés par la CNR. Le recours à la suite logicielle libre et ouverte MicMac permet un contrôle plus fin sur les calculs effectués.

Partant du constat que les imprécisions résultent principalement de modèles caméras inadaptés, nous proposons une procédure d'auto-calibration en trois étapes. La première étape consiste à calculer un modèle basique et approximatif décrivant les distorsions géométriques sur un sous-ensemble d'images. Ce modèle est raffiné sur l'ensemble des images, en libérant de nouveaux degrés de liberté (correction affine et de décentrement, différenciation PPA/PPS, distorsion radiale jusqu'à R^{15}) et permet une première amélioration du calcul d'orientation face aux modèles standards. Une surcouche de correction est ajoutée, en modélisant les déformations résiduelles par une fonction polynomiale non radiale. Cette dernière permet une amélioration sensible du calcul d'orientation, permettant de réduire le nombre de références topographiques strictement nécessaires.

Le géoéférencement et l'adaptation des orientations à partir de mesures terrain sont présentés. Nous proposons une optimisation des paramètres de compensation implémentés dans la suite logicielle MicMac, permettant une amélioration sur tous les chantiers évalués. Une seconde approche est proposée, consistant à corriger l'effet de courbure par une fonction polynomiale. Les

résultats atteints avec cette méthode sont ambigus (excellents dans certaines applications aux déformations « visuellement paraboliques », contrasté dans d'autres cas). La méthode pourrait néanmoins constituer un axe de recherche pour la problématique des linéaires plus importants ou pour les applications nécessitant une vitesse de calcul accrue.

Ces orientations précises sont utilisées pour générer des modèles numériques de terrain en accord avec les précisions ciblées par l'industriel. Plusieurs méthodes de contrôle sont présentées. Le contrôle ponctuel, sujet à des erreurs de modélisation altimétrique (phénomènes de lissage dus à la régularisation) est inadapté à l'analyse des modèles 3D. La création d'un second modèle surfacique faisant office de vérité-terrain (emploi d'un LiDAR ou répétabilité de l'acquisition) est un levier pour améliorer le contrôle d'un relevé. D'un coût important, cette méthode est limitée à des usages très spécifiques.

Nous proposons un compromis entre ces deux techniques consistant à mener une évaluation sur des modèles surfaciques ponctuels et de taille réduite. Les techniques de photogrammétrie rapprochée sont présentées, permettant la création rapide de vérités-terrain disséminées le long de l'ouvrage, et de donner une image de la précision du modèle généré.

Mises bout à bout, ces améliorations ont permis de proposer un *workflow* type, présenté en [Annexe 2](#) du second Tome. Appliqué tel quel, il permet un calcul adapté aux géométries d'acquisition linéaires, et garantit (sur les acquisitions menées) le calcul d'un modèle numérique de précision centimétrique, en limitant le nombre de points d'appui nécessaires à une référence par tranche de 100 mètres linéaires.

Les contributions de ce manuscrit et des travaux menés tout au long de cette étude voient leur aboutissement dans la volonté, de la part de la CNR, d'inclure les mesures de déformations surfaciques dans le diagnostic de ses ouvrages. Les développements des drones (matériels, législation et structuration du marché), le FUI Didro (auscultation par drone embarquant de multiples capteurs), les travaux de développement de capteurs ultra-légers (Camlight, PhaseOne,...), leur fonctionnement avec des récepteurs GNSS-RTK (Parrot eBee RTK, Gatewing UX5 HP, ...), et les travaux d'implantation de fonctionnalités temps-réel sont autant de perspectives permettant d'envisager la photogrammétrie aéroportée légère comme un outil au service de l'amélioration du suivi d'évolution des digues.

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

École Doctorale Paris-Est
Mathématiques & Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS EST

Domaine : Traitement du Signal et des Images

présentée par **Vincent Tournadre**
pour obtenir le grade de
Docteur de l'UNIVERSITÉ PARIS EST

Métrie par photogrammétrie aéroportée légère, application au suivi d'évolution de digues

Tome II : Annexes

Soutenue publiquement le 21 décembre 2015 devant le jury composé de :

Rapporteurs :

M. Pierre Grussenmeyer

INSA Strasbourg

M. Christian Heipke

Leibniz Universität Hannover

Examineurs :

M. Jean-Michel Morel

ENS Cachan

M. Pascal Monasse

École des Ponts ParisTech

Membre invité :

M. Sylvain Labbé

IRSTÉA Montpellier

Directeur de thèse :

M. Marc Pierrot-Deseilligny

IGN - ENSG Paris-Est

Encadrant industriel :

M. Paul-Henri Faure

CNR - CACOH Lyon

École Nationale des Sciences Géographiques
Laboratoire d'Opto-Électronique et de Métrologie Instrumentale
6, Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes
77420 Champs-sur-Marne
France

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
École Doctorale Paris-Est MSTIC
6, Av Blaise Pascal - Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée cedex 2
France

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

École Doctorale Paris-Est
Mathématiques & Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication

PhD Thesis
of UNIVERSITÉ PARIS EST
Specialty : Signal and Images Processing

presented by **Vincent Tournadre**
to obtain the title of
Docteur de l'UNIVERSITÉ PARIS EST

**Metrology with light aerial photogrammetry,
application to dyke monitoring**

Volume II : Appendix

Presented on December 21st 2015 before the jury composed of :

Rapporteurs :

M. Pierre Grussenmeyer
M. Christian Heipke

*INSA Strasbourg
Leibniz Universität Hannover
ENS Cachan*

Examineurs :

M. Jean-Michel Morel
M. Pascal Monasse

École des Ponts ParisTech

Membre invité :

M. Sylvain Labbé

IRSTÉA Montpellier

Directeur de thèse :

M. Marc Pierrot-Deseilligny

IGN - ENSG Paris-Est

Encadrant industriel :

M. Paul-Henri Faure

CNR - CACOH Lyon

École Nationale des Sciences Géographiques
Laboratoire d'Opto-Électronique et de Métrologie Instrumentale
6, Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes
77420 Champs-sur-Marne
France

Université Paris-Est Marne-la-Vallée
École Doctorale Paris-Est MSTIC
Département Études Doctorales
6, Av Blaise Pascal - Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée cedex 2
France

ANNEXE 1

INTRODUCTION À LA PROGRAMMATION C++ AVEC LA BIBLIOTHÈQUE ξ ise

ORGANISATION DES DOSSIERS, DES FICHIERS, CONVENTIONS

/culture3d/src : contient les fichiers sources (.cpp)

/culture3d/include : contient les en-têtes (.h)

/culture3d/include/XML_MicMac : contient des fichiers XML types pour les outils simplifiés (Tapioca, Tapas, Malt,...)

/culture3d/include/XML_GEN : contient des fichiers XML et leurs en-têtes associées (générés automatiquement)

/culture3d/src/CBinaires/ : contient des exécutables qui peuvent être appelés sans utiliser le préfixe mm3d + Commande (ex : Tapioca, Tapas,...)

/culture3d/src/CBinaires/mm3d.cpp : contient les commandes mm3d, avec quelques commentaires et des informations d'implémentation.

Une classe *toto* dans un fichier XML devient *cToto* en C++

Un membre *toto* dans un fichier XML devient *mToto* en C++

La génération automatique crée également des accesseurs vers les membres privés. Il existe des liens entre l'arbre XML et la structure C++

CRÉER UN COMMANDE mm3d

Dans le dossier **/culture3d/src/TpMMPD**, créer un fichier texte portant l'extension .cpp (ex : CPP_HelloWorld.cpp)

Ajouter l'en-tête et le pied de page MicMac (résumant le logiciel et les conditions d'utilisation), et déclarer la fonction principale HelloWorld ainsi :

```
#include "StdAfx.h"
```

```
int HelloWorld_main(int argc, char ** argv)
{
    std ::cout << "Hello world !" << "\n";
    return 0;
}
```

Il faut alors indiquer au compilateur qu'il existe une nouvelle commande à compiler. Éditer le fichier **Source.cmake** (dans le même dossier que le fichier

.cpp nouvellement créé), et ajouter la ligne suivante :

```
set(Src_TD_PPMD
    ${TDPPMD_DIR}/CPP>HelloWorld.cpp
```

Vérifier que la compilation fonctionne (*cd /culture3d/build/ && make install*)

Éditer le fichier **/culture3d/src/Cbinaires/mm3d.cpp** afin de renseigner la nouvelle commande.

Le vector **getAvailableCommands** contient la liste des commandes accessibles en tapant *mm3d + maCommande*. Il est déclaré par :

```
const std::vector<cMMCom> & getAvailableCommands() {
```

```
Ex : aRes.push_back(cMMCom("GCPBascule",GCPBascule_main," Relative to
absolute using GCP",cArgLogCom(2)));
```

La commande *GCPBascule*,

va rechercher la fonction *GCPBascule_main*,

afficher le commentaire « *Relative to absolute using GCP* »,

« loger » grâce à l'argument *cArgLogCom(2)*, utilisé pour enregistrer la commande dans le logfile (**mm3d-LogFile.txt**, fichier créé dans le répertoire de travail). Attention car certaines commandes récursives pourraient surcharger le fichier.

Le vector **TestlibAvailableCommands** contient la liste des commandes accessibles en tapant *mm3d + TestLib + maCommande*. Il est déclaré par :

```
const std::vector<cMMCom> & TestLibAvailableCommands() {
```

Déclarer la nouvelle fonction au dessus de la déclaration TestLib :

```
extern int HelloWorld_main(int,char **);
```

Ajouter la nouvelle commande dans la section TestLib (pour éviter de surcharger les fonctions directement accessibles après mm3d) :

```
aRes.push_back(cMMCom("HelloWorld",HelloWorld_main,"Bonjour monde !"));
```

Recompiler et taper **mm3d TestLib**. Une nouvelle ligne devrait apparaître et afficher : *HelloWorld Bonjour monde !*

En tapant **mm3d TestLib HelloWorld**, le programme va chercher la fonction

HelloWorld_main, et donc afficher le texte « *Hello world !* ».

CRÉER UN PROGRAMME AVEC ARGUMENTS MANDATAIRES ET OPTIONNELS

Les paramètres `argc` et `argv` sont utilisés pour enregistrer les arguments d'une fonction. Pour le vérifier, éditer le fichier **CPP_HelloWorld.cpp**, et ajouter cette boucle après la déclaration de la fonction :

```
for (int aK=0; aK<argc ; aK++)
{
    std::cout << "Argv[" << aK << "]= " << argv[aK] << endl;
}
```

Recompiler et vérifier le bon fonctionnement en tapant :

mm3d TestLib HelloWorld MyArg1 MyArg2

Le terminal devrait afficher le résultat suivant :

```
Argv[0]=ExoMCI
Argv[1]= MyArg1
Argv[2]= MyArg2
```

Vous pouvez alors supprimer la ligne, dont le but est uniquement éducatif.

La fonction **ElInitArgMain** est utilisée pour spécifier, automatiquement et avec la charte MicMac, les arguments mandataires et optionnels, ainsi que le fichier d'aide disponible en tapant : *mm3d TestLib HelloWorld -help*

La fonction s'implémente ainsi :

```
#include "StdAfx.h"

int HelloWorld_main(int argc,char ** argv)
{
    int I,J;           // déclaration de 2 nombres entiers
    double D=1.0;     // déclaration d'un nombre « double »
    ElInitArgMain
    (
        argc, argv,   // liste des arguments
        LArgMain() << EAMC(I,"Left Operand") // EAMC : argument mandataire
                    << EAMC(J,"Right Operand"),
        LArgMain() << EAM(D,"D",true,"Division factor") // EAM : arg. optionnel
    );
    std::cout << "(I+J)/D = " <<(I+J)/D<< std::endl;
    return 0;
}
```

Recompiler et taper : **mm3d TestLib HelloWorl -help**

Le terminal devrait afficher :

```
*****
* Help for Elise Arg main      *
*****
```

Mandatory unnamed args :

```
* int :: {Left operand}
```

```
* int :: {Right Operand}
```

Named args :

```
* [Name=D] double :: {Division factor}
```

Taper : **mm3d TestLib HelloWorld 1 4**

Le terminal devrait afficher : $(I+J)/D = 5$

Taper : **mm3d TestLib ExoMCI 1 4 D=2**

Le terminal devrait afficher : $(I+J)/D = 2.5$

CHARGER UN FICHIER XML ET LIRE SES INFORMATIONS

Prenons l'exemple du dataset MiniCuxha (se référer aux jeux de données inclus avec les sources du logiciel, cf DocMicMac.pdf).

Le jeux de données contient un fichier avec les coordonnées de points d'appui, dont voici les 7 premières lignes :

```
<?xml version="1.0" ?>
<DicoappuiFlottant>
  <OneappuiDAF>
    <Pt>2.4167787000000003 42.59595130000003 496.2352999999995</Pt>
    <NamePt>12060100_172</NamePt>
    <Incertitude>1 1 1</Incertitude>
  </OneappuiDAF>
```

Vous pouvez vérifier que sa mise en forme respecte les conventions décrites dans le fichier **culture3d/include/XML_GEN/ParamChantierPhotogram.xml** :

```
<DicoappuiFlottant Nb="1" Class="true">
  <OneappuiDAF Nb="*">
    <Pt Nb="1" Type="Pt3dr"> </Pt>
    <NamePt Nb="1" Type="std::string"> </NamePt>
    <Incertitude Nb="1" Type="Pt3dr"> </Incertitude>
  </OneappuiDAF>
</DicoappuiFlottant>
```

Le paramètre **Nb** peut être fixé à :

- '1' : signifie que le tag doit apparaître une fois (et seulement une fois)
- '?': le tag est optionnel

- '*': le tag peut apparaître autant de fois que nécessaire

Le paramètre **Type** se réfère aux conventions C++ classiques, auxquelles on peut ajouter les objets de la librairie $\mathcal{E}\mathcal{L}\mathcal{S}\mathcal{E}$ (ex : Pt3dr = point 3D composé de 3 nombres réels ; Pt2di = point 2D composé de 2 nombres entiers,...).

La fonction `StdGetFromPCP(aStr,aObj)` effectue la liaison entre un fichier XML et sa description dans le code (PCP = ParamChantierPhotogram.h). La fonction est déclarée dans le fichier : `/culture3d/include/private/files.h`

`/culture3d/src/TpMMPD/ExoMM_CorrelMulImage.cpp` contient un exemple d'une structure pouvant être utilisée pour charger et manipuler un fichier au format XML. Effectuer une sauvegarde du fichier et remplacer le code par le suivant :

```
#include "StdAfx.h"
int ExoMCI_main(int argc,char ** argv)
{
    std::string aNameFile;    // variable pour stocker le nom de fichier
    double D=1.0;            // valeur par défaut de l'argument optionnel
    ElInitArgMain            // affecte une ligne de commande à des arguments
    (
        argc, argv,          // Liste des arguments
        LArgMain() << EAMC(aNameFile,"Left Operand"), // fichier à charger
        LArgMain() << EAM(D,"D",true,"Unused")
    );
    cDicoappuiFlottant aDico= StdGetFromPCP(aNameFile,DicoappuiFlottant);
    // Le fichier de points d'appui étant initialisé par le tag XML
    DicoappuiFlottant, il faut utiliser la classe cDicoappuiFlottant permettant de
    convertir (automatiquement) les tags en code C++
    std::cout << "NbPts = " << aDico.OneappuiDAF().size() << std::endl;
    return 0;
}
```

Recompiler et taper la commande **mm3d TestLib ExoMCI**

Le terminal devrait afficher : `NbPts = 11`

Pour accéder aux éléments individuels et afficher les noms et coordonnées de chaque point, il suffit d'ajouter une boucle et parcourir chaque tag XML de type OneappuiDAF (et donc cOneappuiDAF en C++) :

```
std::list<cOneappuiDAF> & aLGCP = aDico.OneappuiDAF();
for (
    std::list<cOneappuiDAF>::iterator iT = aLGCP.begin();
    iT != aLGCP.end();
    iT++ ) // tant qu'il existe des cOneappuiDAF → ...
```

```

{           // ... → afficher le nom du point et ses coordonnées
  std::cout << iT->NamePt() << " " << iT->Pt() << "\n";
  // NamePt et Pt sont les noms des classes dans le XML
}

```

LISTER LES FICHIERS DANS UN DOSSIER, SÉPARER LE RÉPERTOIRE DU NOM DES IMAGES

```

/culture3d/src/TpMMPD/ExoMM_CorrelMulImage.cpp :
#include "StdAfx.h"

```

```

//Liste des classes
class cMCI_Appli;
// class cMCI_Ima;

```

```

//Déclaration des classes

```

```

class cMCI_Appli
{
public :
  cMCI_Appli(int argc,char ** argv);
private :
  std::list<std::string> mLFile;
  std::string mFullName;
  std::string mDir; // Directory in which we are working
  std::string mPat; // Pattern of images
  cInterfChantierNameManipulateur * mICNM;
};

```

```

/*****/
/*           cMCI_Appli           */
/*****/

```

```

cMCI_Appli::cMCI_Appli(int argc,char ** argv)

```

```

{
  bool aShowArgs=true;
  ElInitArgMain
  (
    argc, argv, //Liste des arguments
    LArgMain() << EAMC(mFullName,"Full Name (Dir+Pat)"),/
    LArgMain() << EAM(aShowArgs,"Show",true,"Gives details on arguments")
  );

```

```

  SplitDirAndFile(mDir, mPat, mFullName);
  mICNM = cInterfChantierNameManipulateur::BasicAlloc(mDir);
  mLFile = mICNM->StdGetListOfFile(mPat);

```

```

  if (aShowArgs) ShowArgs();
}

```

```

void cMCI_Appli::ShowArgs()

```

```

{
  std::cout << "DIR = " << mDir << "Pat = " << mPat << "\n";
  std::cout << "Nb Files " << mLFile.size() << "\n";
  for (
    std::list<std::string>::iterator itS=mLFile.begin();
    itS != mLFile.end();
    itS++)
    { std::cout << "  F = " << *itS << "\n"; }}

/*****
/*                               */
cMCI_Camera
/*****/

int ExoMCI_main(int argc,char ** argv)
{
  cMCI_Appli anAppli(argc,argv);
  return 0;
}

```

Recompiler, et lancer depuis le répertoire MinCuxha la commande :

mm3d TestLib ExoMCI ".*jpg"

Le terminal devrait afficher :

```

Nb Files 48
F = Abbey-IMG_0173.jpg
F = Abbey-IMG_0191.jpg

```


ANNEXE 2

WORKFLOW TYPE ADAPTÉ AUX OUVRAGES LINÉAIRES

Ce *workflow* type est adapté aux caméras étudiées, spécifiquement le Sony DSC-RX1 et la Camlight de l'IGN. De nombreux raffinements sont possibles (se référer au manuscrit et/ou à la documentation du logiciel).

CALCUL DES POINTS HOMOLOGUES MULTI-ÉCHELLES

mm3d Tapioca MulScale "imagesPattern" 500 1500

Pour de meilleurs résultats (mais un temps de calcul accru et une augmentation conséquente des données à charger dans la RAM), augmenter le dernier argument (par exemple de 1500 à 3000, voire -1 pour des résultats en pleine résolution).

Il est possible d'accélérer le processus en utilisant l'option File de Tapioca, et de spécifier un fichier XML recensant les couples d'images.

CALCUL DES ORIENTATIONS INTERNES ET EXTERNES EN 3 ÉTAPES

**mm3d Tapas Four15x2 "10imagesPattern" DegRadMax=3 DegGen=0
Out=Calib**

Calcul d'un modèle basique décrivant la géométrie de la caméra sur un sous-ensemble d'images. Le choix des images ne semblent pas être prépondérant dans la qualité des résultats, mais en cas de résultats aberrants, tester avec de nouveaux sous-ensembles.

**mm3d Tapas Four15x2 "imagesPattern" InOri=Calib DegGen=2
Out=F15**

Utilisation du modèle basique pour orienter l'ensemble des images, puis les degrés de liberté sont relâchés (correction radiale jusque R^{15} , correction affine et décentrique, PPA et PPS distincts). Pour certaines caméras (ex : Ricoh GR IV), une correction « classique » jusque R^7 apporte de meilleurs résultats. On peut alors jouer sur le paramètre DegRadMax.

mm3d Tapas AddPolyDeg7 "imagesPattern" InOri=F15 Out=F15P7

À partir des caméras orientées avec un modèle étendu, on fige le modèle radial et on ajoute une couche polynomiale non radiale permettant de corriger les déformations résiduelles, en relâchant progressivement les coefficients.

COMPENSATION SUR LES POINTS D'APPUI

mm3d GCPBascule "imagesPattern" F15P7 Bascule CTA.xml

CIA.xml

Géoréférencement des orientations relatives (l'effet de courbure -si existant- n'est pas encore corrigé).

CTA.xml = coordonnées terrain des points d'appui

CIA.xml = coordonnées image des points d'appui

**mm3d Campari "imagesPattern" Bascule Compensé_faisc
GCP=[CTA.xml,1,CIA.xml,0.5] AllFree=1 SigmaTieP=0.2**

Ajustement par la méthode des faisceaux avec prise en compte des mesures terrain. Cette méthode permet de s'affranchir (ou de réduire) des dérives éventuelles en adaptant les orientations internes et externes aux contraintes terrain. Il est possible de raffiner cette méthode en jouant sur le paramètre SigmaTieP.

**mm3d GCPBascule "imagesPattern" Bascule Compensé_polyn
CTA.xml CIA.xml PatNLD=".*" NLDegZ=[1,X,Y,X2]**

Ajustement quadratique des orientations en calculant une correction polynomiale. Il est possible de jouer sur le polynôme en spécifiant dans la balise NLDegZ (fonctionne aussi avec X et Y) une combinaison de tags parmi : 1, X, Y, XY, X2, Y2

CONTRÔLE DES ORIENTATIONS

mm3d GCPCtrl "imagesPattern" Compensé_faisc CTC.xml CIC.xml

mm3d GCPCtrl "imagesPattern" Compensé_polyn CTC.xml CIC.xml

On contrôle à partir des points terrain non utilisés pour l'ajustement quelle méthode permet d'obtenir les meilleures orientations.

CTC.xml = coordonnées terrain des points de contrôle

CIC.xml = coordonnées image des points de contrôle

SÉLECTION DE LA ZONE D'INTÉRÊT SUR UN TABLEAU D'ASSEMBLAGE

mm3d Tarama "imagesPattern" Compensé

mm3d SaisieMasq TA/TA_LeChantier.tif

Création d'un tableau d'assemblage sur lequel on trace un masque sur la zone d'intérêt. L'option Gama=2 dans SaisieMasq peut être utile pour améliorer le contraste et avoir une vision plus claire.

CALCUL DE CORRÉLATION DENSE, ORTHOPHOTOGRAPHIE ET NUAGE DE POINTS COLORÉ

mm3d Malt Ortho "imagesPattern" Compensé

Malt est l'outil de corrélation dense. Des résultats temporaires peuvent être la source de nombreux bugs. En cas de doute, supprimer (ou déplacer) tous les dossiers autres que les orientations compensées et le tableau d'assemblage (s'assurer qu'il correspond bien aux orientations utilisées), et relancer la commande.

mm3d Tawny Ortho-MEC-Malt/

Mosaïquage des orthophotographies individuelles. Le format d'image tif est limité en taille, et les orthophotographies créées seront probablement découpées en tuiles.

Exemple : Ortho-Eg-Test-Redr.tif → fichier de quelques centaines d'octets permettant d'organiser les tuiles

Ortho-Eg-Test-Redr_Tile_0_0.tif → tuile bas gauche (ex : 668 Mo)

Ortho-Eg-Test-Redr_Tile_1_0.tif → tuile bas centre

Ortho-Eg-Test-Redr_Tile_2_0.tif → tuile bas droite

mm3d Nuage2Ply MEC-Malt/Nuage*9.xml Attr=Orth-MEC-Malt/Ortho-Eg-Test-Redr.tif

Nuage2Ply est l'outil permettant d'interpoler la carte de profondeur afin d'en produire un nuage de points géoréférencé. En utilisant l'orthophotographie comme attribut, chaque point du nuage sera coloré à partir de l'orthophotographie.

Il est possible que certains résultats soient biaisés en cas d'utilisation de coordonnées Lambert non tronquées. L'option 64B=true permet alors d'enregistrer les valeurs en évitant les effets d'arrondi, mais les logiciels de manipulation de nuages de points devront être compatibles à ce format.

ANNEXE 3

REPRODUCTION D'UNE ACQUISITION TYPE AVEC CONNAISSANCE DES ORIENTATIONS EXTERNES



Participants : V. Tournadre, J. Beilin (ENSG), J. Cali (ESGT)

Dates : du 30 septembre 2013 au 3 octobre 2013

	lun. 30/9	mar. 1/10	mer. 2/10	jeu. 3/10
GMT+01				
07:00				
08:00		08:00 – 12:00 Installation des cibles et cartes de texturation	08:00 – 12:00 Relevé des cibles	08:00 – 09:00 Polygo
09:00				09:00 – 12:00 Prises de vue + mesures de déplacement de l'appareil photo
10:00				
11:00				
12:00				
13:00	13:00 – 15:00 Déplacement au Mans	13:00 – 15:00 Installation des cibles et cartes de texturation	13:00 – 18:00 Relevé des cibles	13:00 – 15:30 Rangement du matériel
14:00				
15:00	15:00 – 17:30 Reconnaissance des lieux, déchargement du matériel	15:00 – 18:00 Relevé des cibles		15:30 – 18:30 Retour à Marne-la-Vallée
16:00				
17:00				
17:30	17:30 – 18:30 Achat de petit matériel (cutter, scotch)			
18:00				
19:00				

Illustration 1: Planning de la mission

BUT ET INTÉRÊT DE L'OPÉRATION

Reproduire une acquisition linéaire en faisant glisser un appareil photographique sur un rail rectiligne, en mesurant les déplacements entre chaque sommet de prise de vue à l'aide d'un interféromètre (précision : $0,5 \mu\text{m} + 1\text{ppm}$).

Analyser la précision du calcul d'aérotriangulation à travers une comparaison entre les données relevées, et celles calculées par ajustement des faisceaux.



MATÉRIEL

- Leica TS30 (précision angulaire : $2,42 \cdot 10^{-6}$ radians, précision distances : $0,6\text{mm} + 1\text{ppm}$)
- Leica TCA 2003 (précision angulaire : $2,42 \cdot 10^{-6}$ radians, précision distances : $1\text{mm} + 1\text{ppm}$)
- 7 trépieds lourds (fabrication IGN)
- Prismes GPH1P
- Sony RX1 (35mm f/2.0)
- Olympus OM-D EM-5 (14-42mm f/3.5-5.6)
- Interféromètre Renishaw XL-80 (précision mesure de déplacement : $1 \mu\text{m} + 0,05 \text{ppm}$, soit $3,5 \mu\text{m}$ sur 50m)

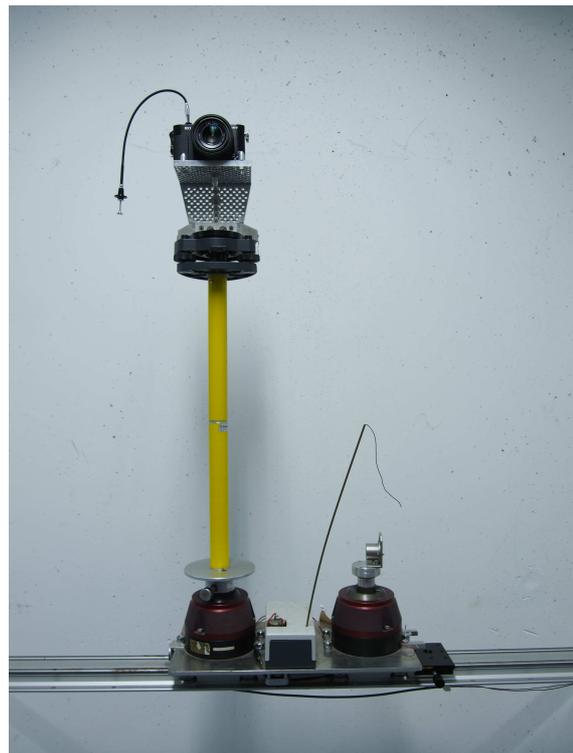


Illustration 2: Appareil photo prêt à glisser sur le rail. Les éléments jaunes permettent d'ajouter de la hauteur (25cm), et ainsi d'acquérir plusieurs axes

PROCÉDURE

Nécessité de texturer les murs blancs pour que les algorithmes de détection de points homologues soient efficaces.

Nécessité de mesurer les cibles avec une précision de $0,5 \text{mm}$ → mise en place de

10 stations sur piliers/trépieds lourds, cibles visées en double retournement (8 à 14 visées sur chacune d'elles).

PRISE DE VUE

Photographies prises en faisant glisser un appareil sur un chariot le long d'un rail. En ajoutant des éléments verticaux sur le chariot, quatre axes de prises de vue ont ainsi pu être acquis.

L'interféromètre permettant des mesures de déplacement, nous disposons pour chaque axe des distances relatives entre les sommets de prise de vue, avec une précision de quelques microns. Les distances entre des sommets d'axe différents ne peuvent pas être mesurés avec cette méthode.

RÉSULTATS

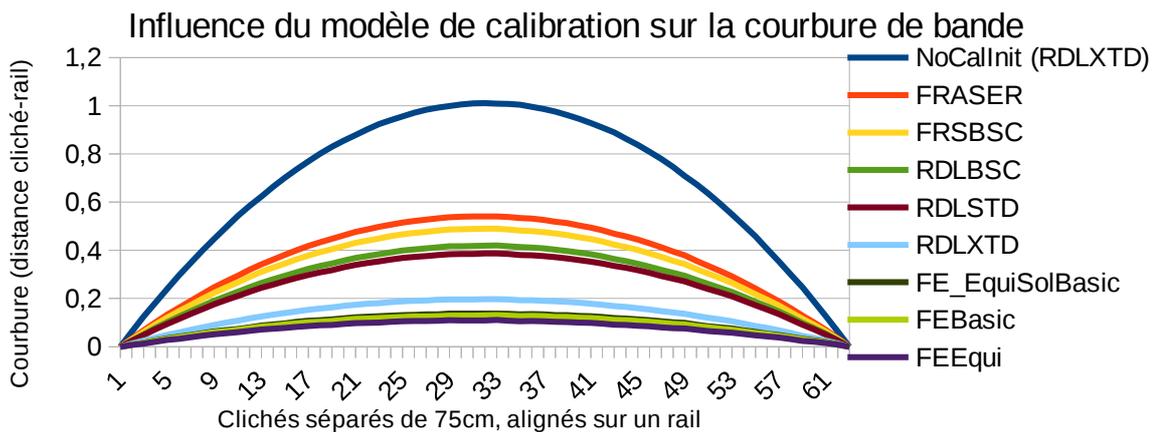


Illustration 3: Avec l'ancienne version du calcul des orientations, les modèles Fisheyes donnent les meilleurs résultats avec une focale de 35mm. Cela a été corrigé en raffinant le critère de convergence des modèles standards

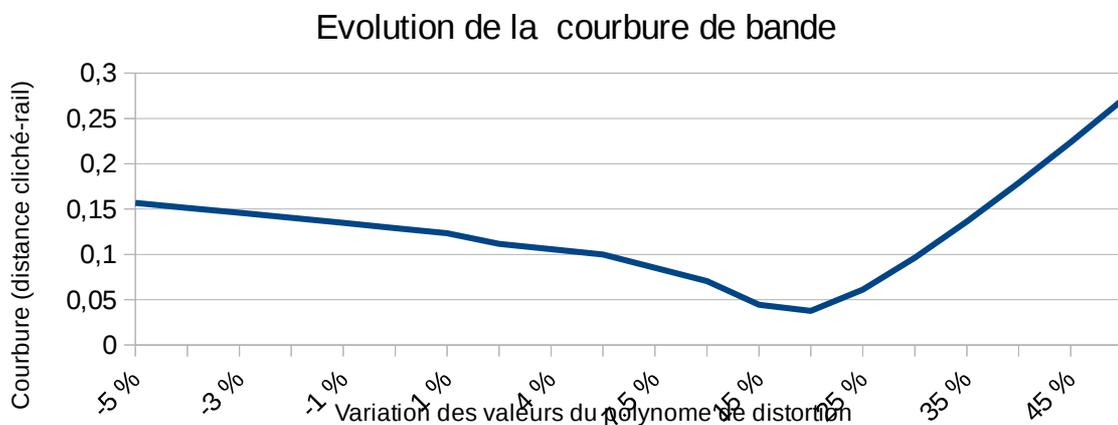


Illustration 4: Le polynôme de distorsion calculé ne semble pas optimal. Lorsqu'on manipule ses valeurs, on s'aperçoit que la courbure résultante peut être minimisée.

Influence de SigmaTieP sur la courbure

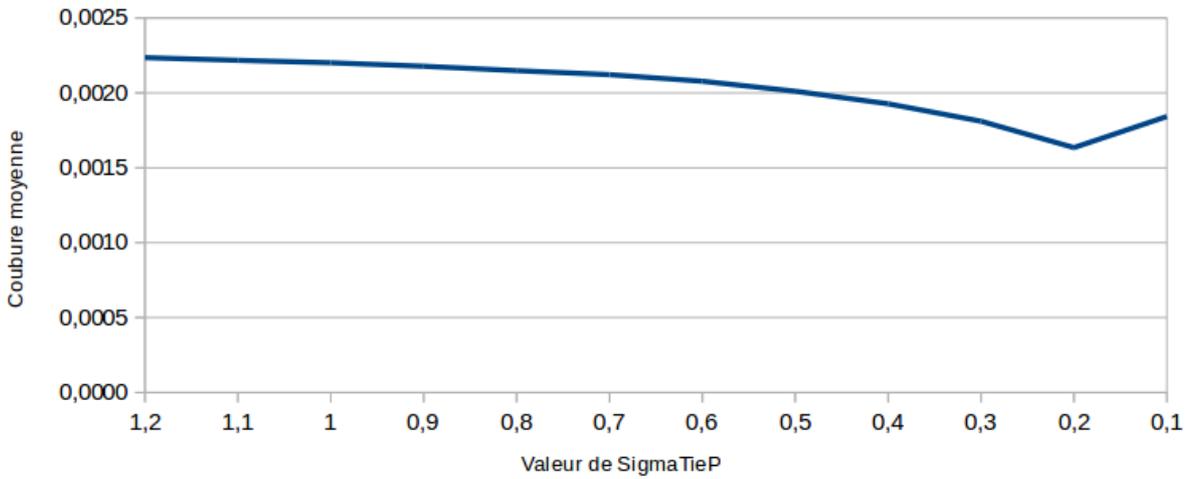
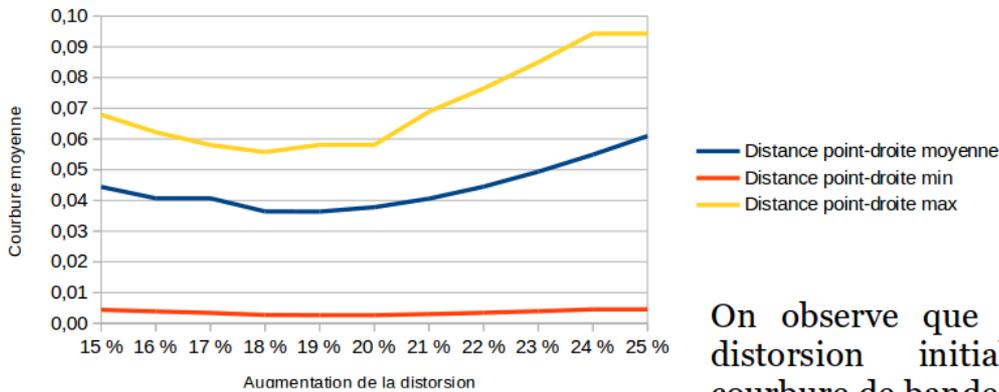
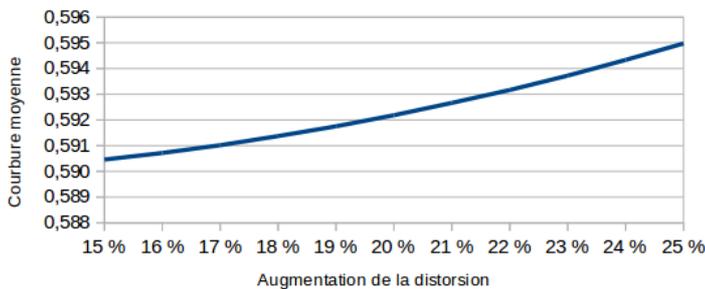


Illustration 5: Ajustement des faisceaux avec mesures terrain. Le coefficient « SigmaTieP » (k présenté §5.3) n'est pas optimal par défaut.

Evolution de la courbure de bande



Résidus du calcul d'aérotriangulation



On observe que le polynôme de distorsion initial induit une courbure de bande moyenne de 12,3 cm. En multipliant les 5 coefficients par un facteur variant de +15 à +20 %, on diminue cette courbure de près de 70 %. Les meilleurs résidus images ne sont pas corrélés avec les meilleurs résultats

ANNEXE 4

RAPPORT DE MISSION : PALLIERE-2013

Rédacteurs : V.Tournadre/P-H Faure

Date/lieu : du 25 au 28 février sur le site de La Pallière (PK133.4)

Participants IGN- ENSG : Vincent Tournadre – Marc Pierrot-Deseilligny – Jacques Beilin

Participants CNR-DRB : Clément Bichet – Frédéric Brun

Participants Avion Jaune : Bruno Roux – Mikael Jouanne

Dans le cadre de la thèse en Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère, nous avons effectué une première mission de relevé photogrammétrique de la digue de La Pallière. L'objectif est d'obtenir un modèle numérique centimétrique de celle-ci, et de poser les conditions nécessaires aux missions futures (nombre de points d'appui requis, taille du pixel terrain nécessaire,...)

CHOIX DU TYPE DE PORTEUR

	Hélicoptère RC	ULM		
		Avion 3 axes	Autogire DTA	Paramoteur
Endurance/ autonomie	Entre 5 et 10min selon chargement	3 à 5h de vol	3 à 5h de vol	2 à 5h
Possibilité de vol en cas de vent	jusqu'à 10m/s	jusqu'à 20m/s	jusqu'à 20m/s	jusqu'à 10m/s
Possibilité de pluie légère	Non	Oui	Oui	Non
Altitude minimale	Vol rasant possible	150m légalement, vols rasant possibles avec autorisation du propriétaire de la parcelle		
Altitude maximale	Jusqu'à 150m	5950m	2000-25000 m	Plusieurs milliers de mètres
Vitesse minimale	0m/s	20m/s	10m/s et moins (selon vent)	5m/s
Chargement max	2kg	Plus de 10kg		
Décollage	Vertical	Piste (200 à 300m)	Piste (10 à 400m)	
Atterrissage	Vertical		Piste (10m)	
Manœuvrabilité	Bonne	Moyenne	Très bonne	Bonne
Prix d'achat	à partir de 2 000 €	à partir de 15 000 €	à partir de 15 000 €	à partir de 6 000 €
Coût location	1 500,00 € / jour	150€/H	185€/H	150€/H
Contraintes réglementaires	Déclaration à la DGAC 48h à l'avance par le prestataire	Autorisation nécessaire pour voler autour d'aérodromes/ couloir aérien/ espaces militaires/ centrale nucléaire		
Autre contrainte	Batteries peu durantes et onéreuses, vibrations	Nécessité d'adapter un dispositif pour la prise de vue verticale		Très sensible aux changements climatiques (mission longues)
Autre avantages	Possibilité de piloter en immersion (avec licence adéquate)	Permet de couvrir rapidement de grands linéaires		Dispositif pour la prise de vue verticale facile à adapter

Illustration 6: Récapitulatif des caractéristiques des différents porteurs

Au vu de ces éléments, nous avons privilégié l'hélicoptère radio-commandé pour plusieurs raisons :

- Petit linéaire à relever (1000m)
- Il existe un dispositif pour la prise de vue verticale (nacelle gyrostabilisée)
- Pas de besoin de piste d'atterrissage/décollage
- Besoin de voler à des vitesses faibles (car enregistrement des images brutes -environ 1s- avec un fort recouvrement, et en utilisant des focales courtes)

Nous avons choisi de travailler avec l'entreprise l'Avion Jaune. Bien qu'ayant eu quelques soucis pendant la mission, le prestataire a parfaitement rempli ses obligations.

CHOIX DES REPÈRES À IMPLANTER

Nous avons fait le choix de mettre en place des points de repères tous les 50m. Nous n'avons, en théorie, pas besoin d'autant de références, mais un des objectifs de la thèse est de déterminer le nombre de points nécessaires pour obtenir une précision donnée. Nous en avons donc implanté plus qu'il n'en faut, et les retirerons graduellement en étudiant les effets sur la précision du modèle.



Notre choix s'est porté sur les bornes Feno utilisées par les géomètres, auxquelles nous avons supplanté un bouchon afin de mieux les identifier. Elles répondent aux caractéristiques requises pour leur visibilité (largeur de 9cm x 9cm, soit environ 81 pixels sur l'image), et présentent l'avantage d'être solidement ancrées dans le sol (en place pour de futures missions). La cible est donc composée d'une borne rouge et d'un centre blanc.



MISSION TOPOGRAPHIQUE

Avec l'aide de la DRB, et notamment de Clément Bichet, nous avons implanté le premier jour 60 points de références. Nous avons en fait doublé les points déjà présents sur le site, et rajouté une ligne de repère sur le contre-canal (cela permet de fixer l'aérotriangulation).

Ces bornes ont été relevées en planimétrie par GPS-temps réel (précision centimétrique) et par nivellement de précision pour les altitudes (fermeture du cheminement à 1,2cm).

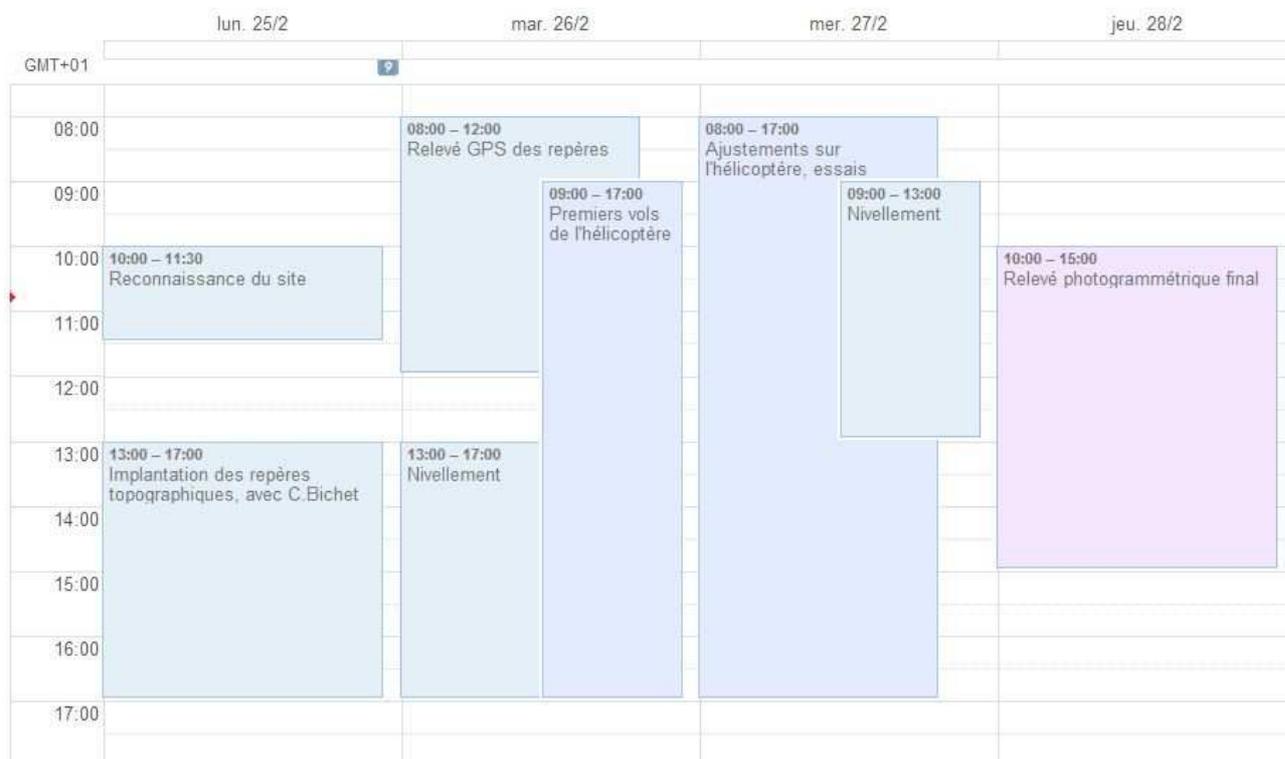


Illustration 7: Déroulement chronologique de la mission

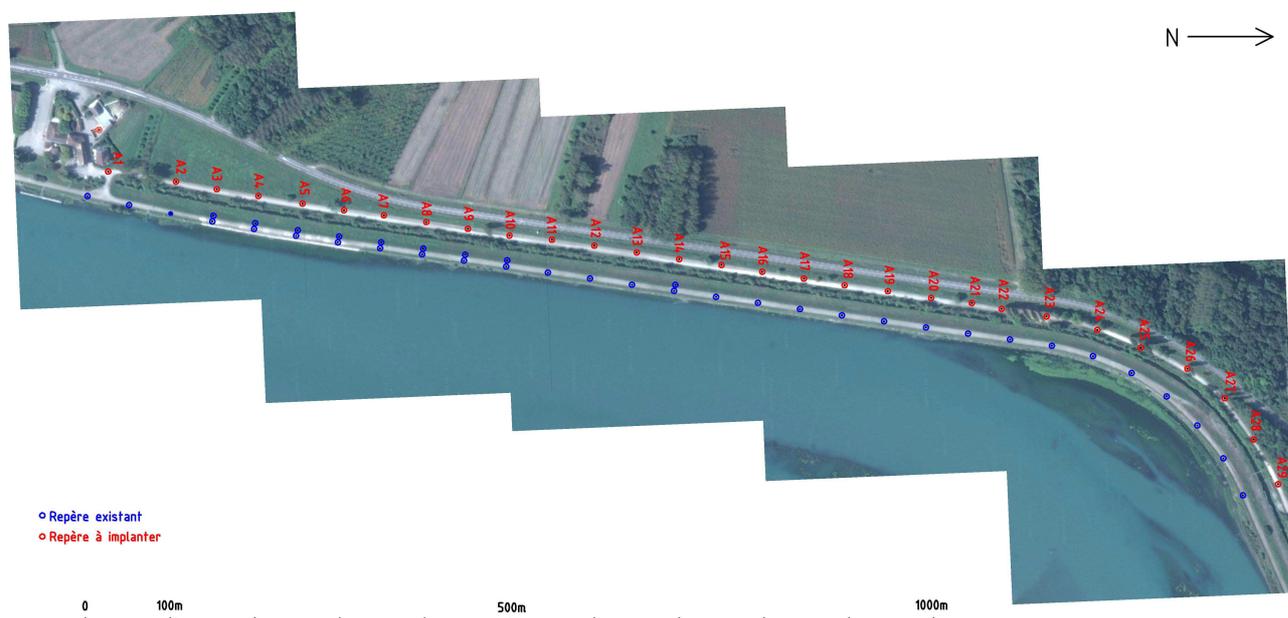


Illustration 8: Plan d'implantation des repères à installer

MATÉRIEL PHOTOGRAPHIQUE

Nous avons privilégié des appareils compacts pour accentuer l'autonomie de vol :

- Sony NEX 7 de l'Avion Jaune : équipé d'une focale Zeiss 24mm (équivalent à du 35mm en plein format)

- Sony RX 1 de l'IGN : focale fixe de 35mm

Le NEX 7 dispose d'un obturateur à rideaux ; les pixels du haut de l'image ne sont donc pas enregistrés au même instant que ceux du bas (ce qui crée des artefacts lorsque le capteur est embarqué). Le RX 1 contourne ce problème en utilisant un obturateur à diaphragme.

La qualité du capteur (plein format) présent sur le RX 1 permet de le classer dans le haut de gamme, au même niveau qu'un Leica M (voire même meilleur selon [DxO](#) et d'autres benchmarks)

MISSION AÉRIENNE

Nous avons survolé la zone en effectuant une première bande centrée sur la digue, et une seconde (bande retour) décalée d'une dizaine de mètres vers le contre canal. L'intérêt est de pouvoir mieux fixer l'aérotriangulation. En pratique, le pilote ne peut pas s'éloigner de plus de 200m du drone.

En pratique, le pilote doit être à moins de 200m du drone en vol. L'Avion Jaune a donc décidé de procéder à 7 bandes : 6 sont linéaires d'une longueur de 300m, et la dernière fait un U avec des branches de 150m.



Illustration 9: L'acquisition est découpée en 7 bandes pour satisfaire aux conditions réglementaires et pallier la faible autonomie du drone

Au total, 215 clichés qui ont été pris, avec une ouverture de f/3.5, une exposition de 1/2000 (pour limiter le flé) et une sensibilité ISO-100.

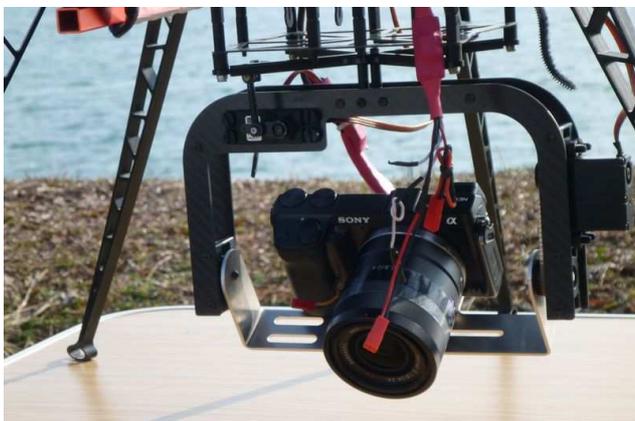


Illustration 10: Dispositif avec nacelle gyrostabilisée



Illustration 11: Adaptation d'une pièce de mousse pour contrer les vibrations

Trois journées ont été nécessaires pour aboutir à ce résultat. Les deux premières nous ont permises de faire différents tests :

- Influence des vibrations
- Différence de qualité entre Sony NEX7 et RX 1 (zoom sur voiture à 30m, dans un coin de l'image)



Sony NEX 7



Sony RX 1

- Comparatif entre premiers clichés, et clichés finaux (sur sur repère 9x9cm)



Premiers essais



Repère vu du sol



Clichés finaux

PREMIERS RÉSULTATS

L'analyse des premiers résultats fait apparaître que la précision centimétrique recherchée n'est pas atteinte. Du moins, pas sur la composante altimétrique.

RÉSULTATS DE LA SIMILITUDE SPATIALE SUR LES POINTS D'APPUI

L'étape que l'on nomme communément « Bascule » est la similitude spatiale par laquelle on passe de l'espace relatif à l'environnement géoréférencé. Tous les points sur lesquels nous analysons les résidus ont été pris en compte dans la compensation. Chaque point est séparé du suivant d'environ 50m.

Points sur la digue

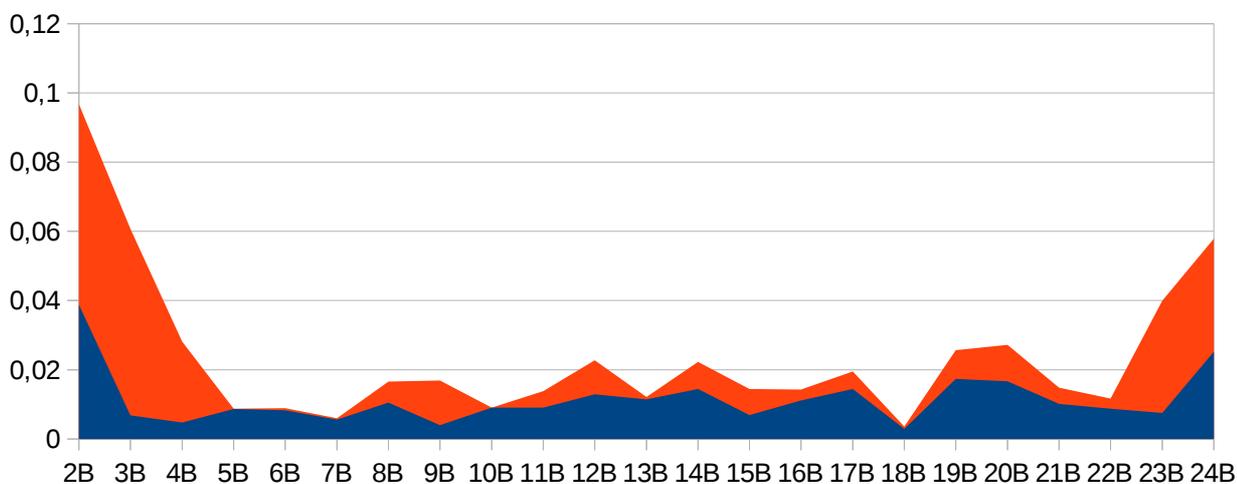


Illustration 12: Résidus des bornes (nouvelles) sur la digue en XY (bleu), et XYZ (rouge)

Ecart en Z

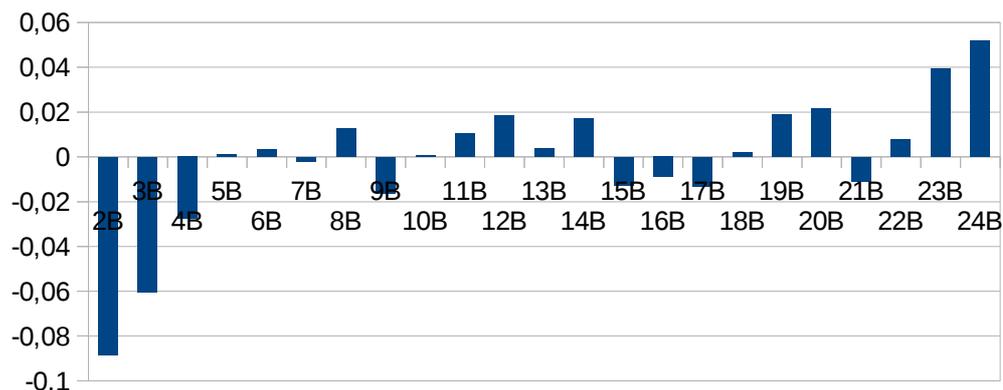


Illustration 13: Résidus altimétrique des bornes (nouvelles) sur la digue

Points sur le contre canal

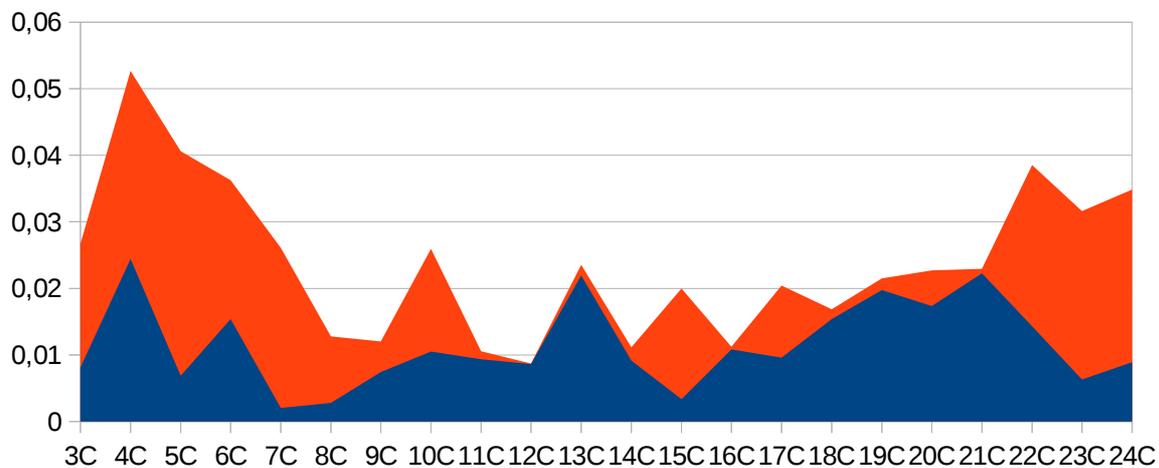


Illustration 14: Résidus des bornes (nouvelles) sur le contre-canal en XY (bleu) et en XYZ (rouge)

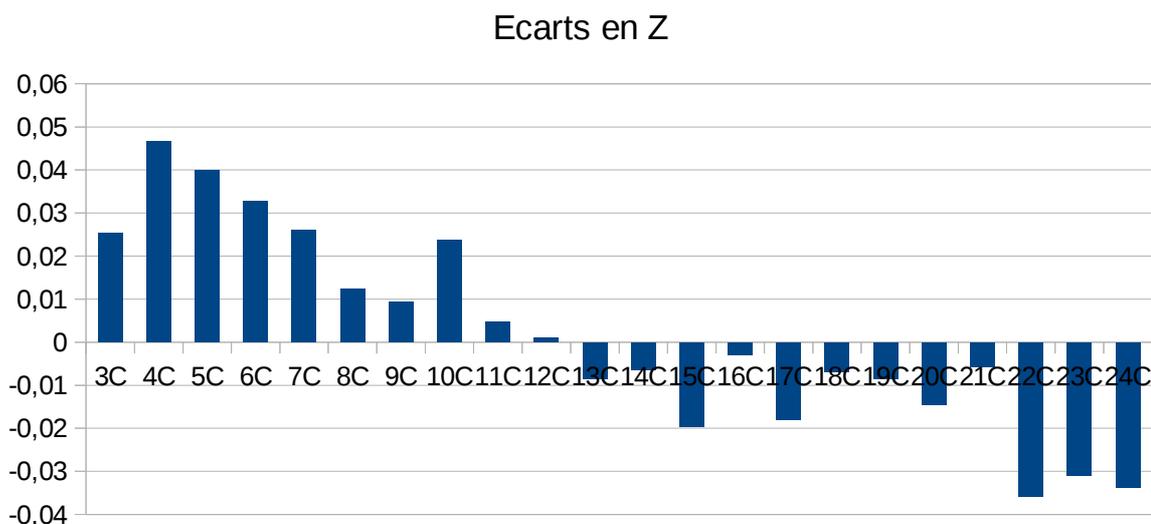


Illustration 15: Erreurs de reprojction des bornes (nouvelles) sur le contre-canal

COMPARAISON ENTRE LE MNT ET LE NIVELLEMENT

Le calcul du modèle numérique de terrain aboutit à un fichier TIF. L'étape ci-dessus confirme que nous avons une précision planimétrique proche du centimètre. Le diamètre du bouchon blanc (enfoncé dans l'amarre de chaque borne) étant de 6cm, nous pouvons donc interpoler sur le MNT la position des bornes, et y relever l'altitude calculée par appariement dense.

POINTS UTILISÉS POUR LE CALCUL

Le calcul du MNT a été réduit à la digue elle-même. Les points sur le contre-canal sont donc exclus.

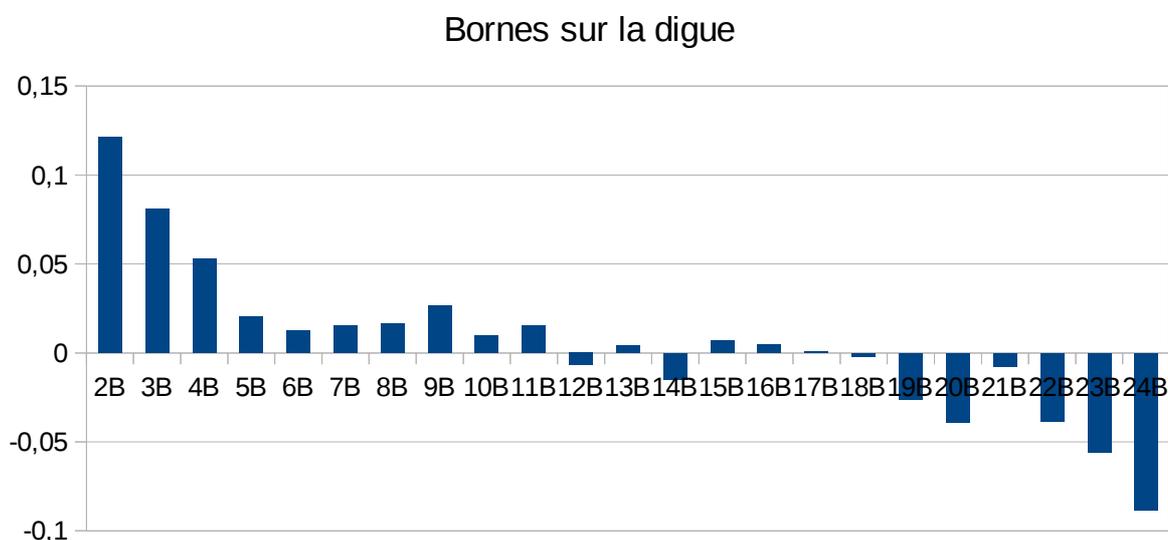


Illustration 16: Interpolation du MNT sur les points de contrôle

POINTS NON UTILISÉS LORS DU CALCUL

Ces points correspondent aux points de nivellement mis en place par la CNR. Ils n'ont pas été mesurés sur les images, et sont donc en dehors de tout calcul d'ajustement. Il faut noter qu'ils sont quasi invisibles sur les clichés, et que leur forme peut induire une petite erreur (clou planté dans le béton, forme bombée de quelques millimètres).

Ils peuvent toutefois faire office de mesure de contrôle pour comparaison de leur altitude sur le MNT.

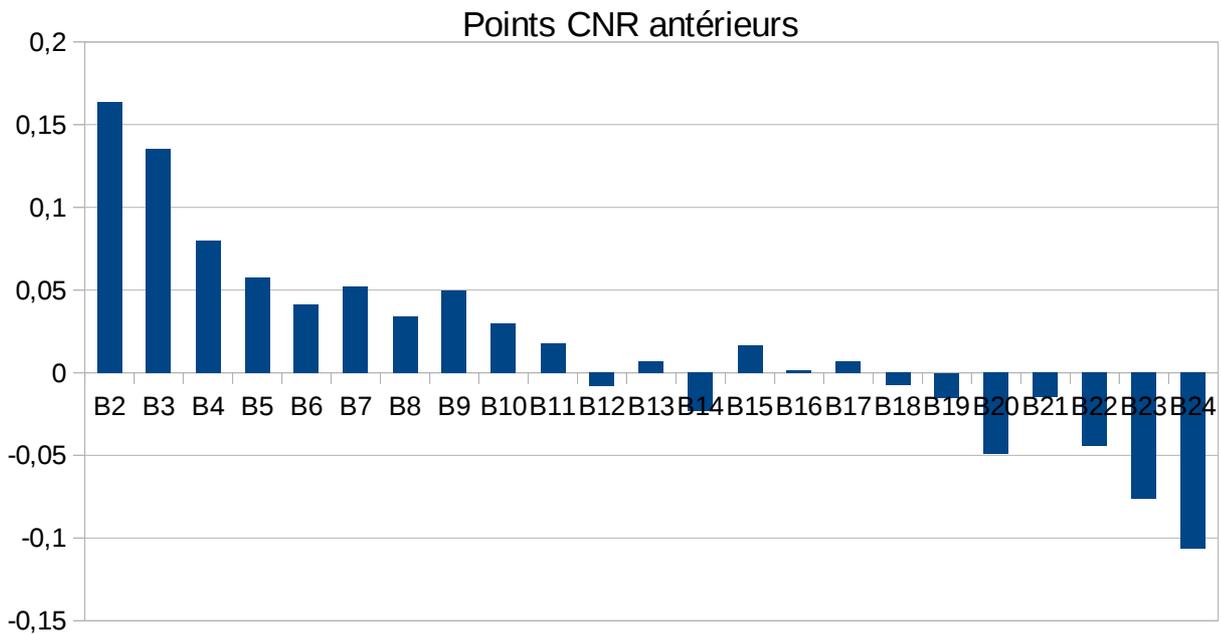


Illustration 17: Interpolation du MNT sur les points de contrôle (invisibles dans les images)

ANNEXE 5

RAPPORT DE MISSION : ROCHEMAURE-2013

Rédacteurs : V.Tournadre - P.H. Faure

Date/lieu : les 24-25 juin et le 2 juillet 2013 sur le site de Rochemaure (PK 153.0)

Participants IGN- ENSG : Vincent Tournadre – Julien L'Harridon

Participants CNR : P.H.Faure – DR Montélimar

Dans le cadre de la thèse en Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère, nous avons effectué une mission de relevé photogrammétrique de la digue de Rochemaure. L'objectif est d'obtenir un modèle numérique de celle-ci, et de comparer la robustesse du calcul photogrammétrique face au relevé effectué par Lidar terrestre la semaine du 13 mai 2013.

PARTENARIAT IGN/CNR

Dans le cadre du partenariat mis en place avec la CNR, l'IGN s'engage à mettre à disposition des moyens permettant le relevé photogrammétrique d'ouvrages dans deux types de scénarios :

- Acquisitions récurrentes : Elles concernent l'auscultation régulière de zones ciblées et localisées (de l'ordre du km) dans le cadre de suivis spécifiques. Pour ce type d'acquisition la précision escomptée est de ± 1 cm afin de pouvoir détecter des déformations « centimétriques » (± 2 cm).
- Acquisitions exceptionnelles : Elles concernent des situations de crise où la CNR souhaite obtenir un état des lieux de linéaires importants (plusieurs dizaines de km). Dans ce cadre la CNR souhaite avoir à disposition un outil rapide dans la mise en place et dans le traitement des données (Séisme, accès perturbés etc.). Sur ce type d'acquisition les précisions escomptées sont de l'ordre de ± 3 cm.

La mission de Rochemaure s'insère dans le cadre des acquisitions récurrentes. Le Service des Activités Aériennes (SAA) de l'IGN dispose d'un Mikrocopier HexaXL, et a effectué les démarches nécessaires auprès des administrations pour se faire enregistrer. Le survol de la digue de Rochemaure s'est donc déroulé dans le cadre de ce partenariat.

CHOIX DES REPÈRES À IMPLANTER

Lors de notre première mission à La Pallière, nous avons utilisé des bornes Feno, notamment utilisées par les géomètres experts lors des délimitations foncières. Ces repères sont assez rapides à mettre en place, et sont conçus pour être pérennes. Un bouchon circulaire blanc vient s'emboîter dans le tube, et facilite le pointage du centre lors du traitement des images.

Nous avons fait le choix de conserver le même type de repères, et d'en installer deux rangées parallèles :

- une première sur le cavalier de la digue, le long du Rhône
- une seconde à l'autre extrémité de la digue, le long du Vieux-Rhône

Chaque point (sur une même rangée) sera espacé d'environ 50m avec le précédent. Garder un espacement constant entre les repères semble judicieux pour faciliter l'analyse des résultats. Deux rangées de 13 repères seront implantées pour couvrir les 600m de digue.

DÉROULEMENT DE LA MISSION

Initialement, la mission était prévue du 24 au 26 juin. Cependant, les conditions météorologiques particulièrement venteuses nous ont contraint à reporter le vol au mardi 2 juillet. Cet inconvénient météorologique aura permis de montrer la nécessité, dans le cadre du partenariat IGN-CNR, que l'IGN se dote de moyens matériels en mesure de permettre des vols dans des conditions plus contraignantes que celles aujourd'hui possibles.

Étant sur place les 24 et 25 juin, nous avons tout de même pu implanter et relever les repères (une journée et demi de travail).

On notera que le vol du 2 juillet s'est très bien déroulé. Contrairement à notre première expérience à La Pallière, nous connaissons désormais notre matériel et les contraintes associées. Il a fallu compter 2 heures entre les premières et les dernières prises de vue.

Par ailleurs, une équipe de tournage était sur les lieux le 2 juillet. Elle a pu réaliser un reportage sur les travaux de la CNR relatifs à la surveillance de digues.

MISSION TOPOGRAPHIQUE

Avec l'aide de la DRVA-BMES, nous avons implanté le premier jour 27 points de références. Le lendemain, nous avons relevé ces points.

Pour une meilleure lisibilité, les identifiants ont été réattribués (pendant le post-traitement) ainsi :

- points sur le cavalier : 1a, 2a,... 13a
- points « secondaires » : 1b, 2b,... 13b

À noter que les clichés ont également été renumérotés en ajoutant un préfixe devant le nom original de la photographie, en suivant le même raisonnement :

- la première bande survolant le réseau primaire : ajout du préfixe 001a, 002a,... 052a
- la seconde bande survolant le réseau secondaire : ajout du préfixe 001b, 002b,... 052b

Les coordonnées planimétriques (X et Y) ont été déterminées par GPS temps réel. Leur précision est de l'ordre de 2-3cm. Cette précision est satisfaisante pour la donnée planimétrique, mais nous recherchons des données plus précises en altimétrie.

Pour cela, deux nivellements de précision ont été effectués : un premier a permis de niveler le réseau primaire, alors que le réseau secondaire, en contrebas, a nécessité un second cheminement. Ces deux cheminements ont eu pour point de départ un rivet installé par les équipes de la DRVA, et déterminé quelques semaines plus tôt. Les écarts de fermeture sont millimétriques et garantissent une excellente détermination de l'altimétrie de notre réseau.

Les relevés GPS et de nivellement ont pris une journée (3 opérateurs sur place : un pour le GPS, deux pour le nivellement). Nous pouvons observer un écart moyen de 24mm entre l'altitude déterminée par GPS, et celle déterminée par nivellement. L'écart minimum est de + 7mm et l'écart maximum de + 41mm ($Z_{\text{NIVELLEMENT}} - Z_{\text{GPS}}$).

Voici un tableau récapitulatif des coordonnées des points d'appui :

	GPS			Nivellement	Différence entre Z_{GPS} et $Z_{NIVELLEMENT}$ (m)
	Id	X (m)	Y (m)	Z (m)	
RESEAU PRIMAIRE	1a	789267,777	256628,783	79,2673	0,032
	2a	789287,851	256675,589	79,1215	0,019
	3a	789307,587	256720,270	79,2106	0,017
	4a	789326,593	256766,622	79,0600	0,019
	5a	789347,280	256812,581	79,2115	0,016
	6a	789368,575	256857,496	79,1476	0,025
	7a	789392,972	256901,519	79,0629	0,038
	8a	789419,487	256943,810	79,2091	0,024
	9a	789447,727	256984,422	79,2118	0,009
	10a	789477,611	257023,134	79,1248	0,016
	11a	789510,649	257060,451	79,1999	0,007
	12a	789544,487	257097,126	79,0701	0,040
	13a	789577,309	257133,611	79,1485	0,016
	14a	789258,167	256666,394	74,9551	0,009
RESEAU SECONDAIRE	1b	789235,347	256643,720	71,3808	0,037
	2b	789252,719	256694,372	75,0650	0,036
	3b	789283,752	256727,829	74,5884	0,039
	4b	789295,518	256779,883	71,8672	0,021
	5b	789317,961	256826,033	71,8371	0,041
	6b	789339,173	256871,778	71,7685	0,020
	7b	789365,987	256919,476	71,7756	0,030
	8b	789391,349	256962,992	71,5321	0,026
	9b	789419,810	257004,059	71,5487	0,014
	10b	789452,238	257046,113	71,3347	0,032
	11b	789481,540	257089,297	70,1634	0,009
	12b	789515,205	257122,735	70,6033	0,026
	13b	789548,325	257157,247	70,8520	0,040

Illustration 18: Coordonnées des points d'appui mesurés le 25/06/2013

La dernière colonne indique la différence entre les altitudes calculées par GPS, et celles déterminées par le nivellement de précision. Dans le cadre d'une recherche de précision photogrammétrique centimétrique sur cet axe, ces valeurs confirment bien la nécessité d'un nivellement de précision sur l'ensemble des points (on note 31 mm d'écart entre les valeurs extrêmes).

Les équipes topographiques de la DRVA ont parfaitement rempli leur mission ; leur aide a été grandement appréciée.

MATÉRIEL PHOTOGRAPHIQUE

Suite à notre retour d'expérience, il nous semble que le SonyRX1 est actuellement un des capteurs les plus adaptés sur le marché. La qualité d'image est excellente, et son faible poids en font un outil idéal pour la prise de vue légère.

Par ailleurs, garder le même appareil pour l'ensemble des chantiers permet des comparaisons plus objectives.

MISSION AÉRIENNE

Initialement, nous avons prévu de survoler la zone à 90m d'altitude, en deux bandes parallèles, aboutissant à des clichés d'emprise 60 x 90m. Le plan de vol prévoyait des clichés tous les 18m, soit 68 clichés au total. Cependant, la taille des pixels résultant aurait compliqué la visualisation de nos références sur les clichés.

Nous avons donc préféré abaisser la hauteur de vol à 60m (idem vol La Pallière), en effectuant une troisième bande sur la portion la plus large de la digue (afin d'être certain que la digue soit couverte intégralement). Pour conserver un recouvrement de 80 % (longitudinal et transversal), nous avons déclenché les prises de vue tous les 12m, soit 52 photographies pour les bande A et B.



Illustration 19: Plan de vol initial

PREMIERS TRAITEMENTS

La chaîne de traitement Pastic-Apero-MicMac développée à l'IGN a été utilisée pour les calculs qui suivent.

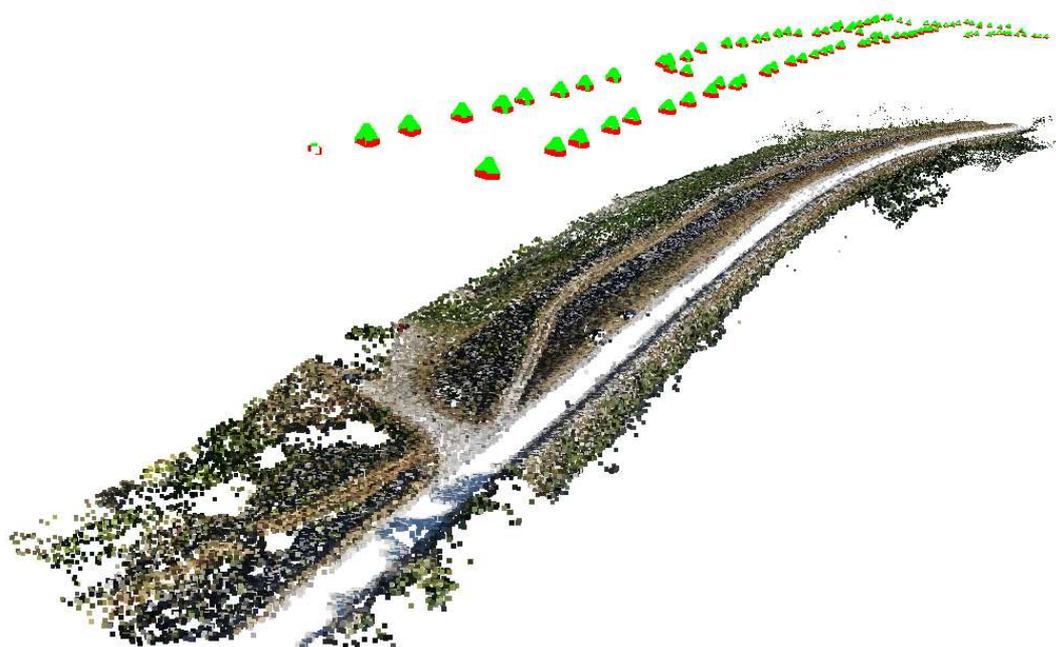


Illustration 20: Points homologues et orientations des caméras

Le calcul de la position et de l'orientation de chaque cliché ne fait pas apparaître d'erreur évidente. Par contre, nous pouvons remarquer que très peu de points d'intérêts ont été détectés sur la route. Celle-ci étant majoritairement uniforme et assez peu texturée, c'est un résultat clairement compréhensible, mais peut-être un point sur lequel nous devons nous pencher.

La génération de l'orthophoto ne pose pas de problème, et propose un résultat visuellement plaisant.



Illustration 21: Orthophotographie produite à partir des images acquises

En comparant les altitudes générées par la chaîne de calcul, et celles relevées par nivellement, nous obtenons les écarts suivants :

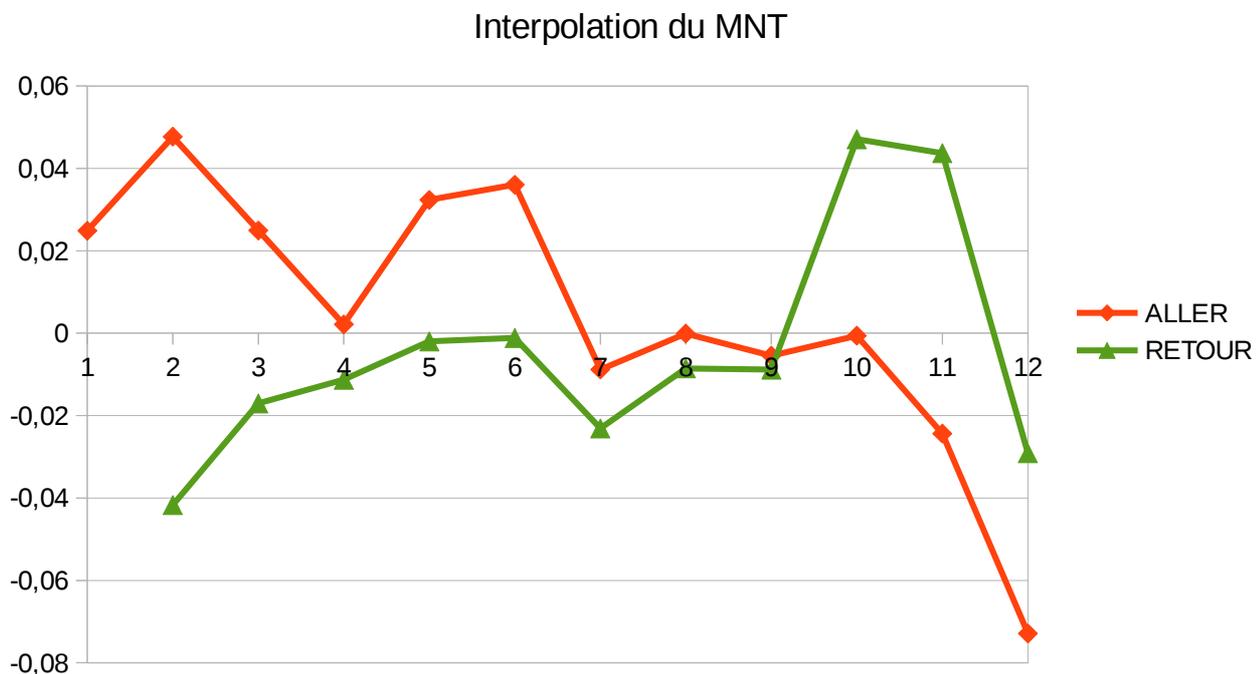


Illustration 22: Interpolation du MNT tous les 50m, différence en Z (m)

Nous rappelons que chaque point est espacé du suivant d'environ 50m. Les points sur la bande « aller » sont les bornes 1a, 2a,... 13a ; les points sur la bande « retour » sont les points 1b, 2b, ... 13b.

La dérive du modèle est logiquement moins forte que celle constatée à La Pallière (distance plus courte, moins d'images). Sur ces points, nous obtenons les

indicateurs suivants :

- Erreur moyenne absolue: 22mm
- Écart-type : 30mm
- Écart moyen quadratique : 29mm

Le nuage de points généré ne fait pas non plus apparaître d'erreur évidente.

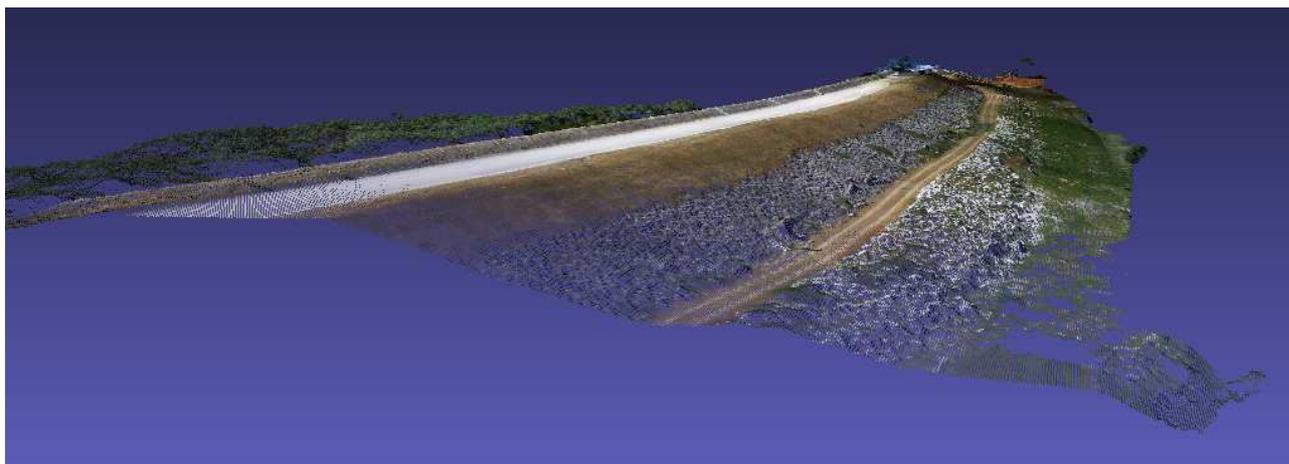


Illustration 23: Nuage de points généré à partir de l'acquisition

COMPARAISON CLOUD TO CLOUD

ENTRE LES DEUX RELEVÉS LIDAR :

L'intérêt du relevé sur le site de Rochemaure est également d'effectuer une comparaison avec les relevés Lidar terrestre effectués au cours du mois d'avril. Pour rappel, l'illustration 5 présente une comparaison entre les deux relevés, comparaison effectuée avec le logiciel CloudCompare, qui calcule les distances absolues entre deux nuages de point.

L'analyse statistique des écarts entre ces deux nuages fait apparaître une distribution Gaussienne de ceux-ci. La distribution suit les paramètres suivants : valeur moyenne de 23 mm, écart-type de 16mm.

Les principales zones où l'on constate des écarts concernent :

- les stations de relevé laser (impossible de scanner sous l'appareil)
- une bande fine le long de la route subsidiaire, route qui en raison d'une « fuite » dans la digue est partiellement remplie de flaques d'eau.
- le long du Rhône (extrémité est), relevé à partir de visées rasantes et donc plus imprécises
- la zone boisée au sud ouest

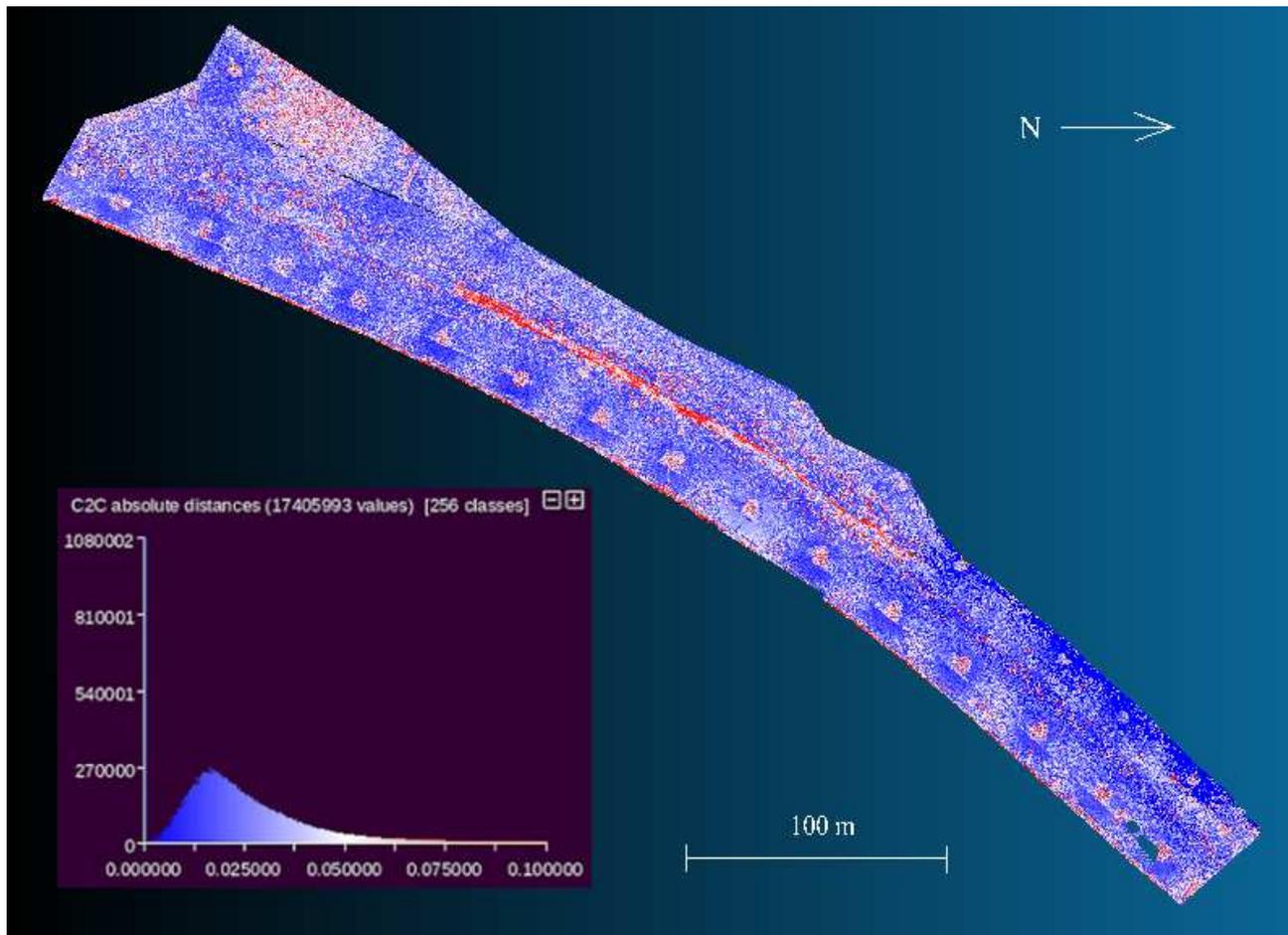


Illustration 24: Comparaison entre deux relevés Lidar terrestre effectués à quelques jours d'intervalle, méthode de comparaison par le plus proche voisin

ENTRE LE LIDAR TERRESTRE ET LA PHOTOGRAMMÉTRIE :

Ce relevé Lidar constitue une base très intéressante pour y comparer les résultats que nous obtenons par photogrammétrie. Notamment, nous avons étudié l'influence de plusieurs modèles de calibration. A l'heure l'actuelle, et en travaillant avec des modèles photogrammétriques sous-résolus (échelle $\frac{1}{4}$), nous obtenons les meilleurs résultats en utilisant un modèle de distorsion radiale basique à 3 paramètres. Un second modèle de distorsion -RadialExtended- plus complexe (5 paramètres, centre de distorsion et point principal distincts) fait apparaître des résultats similaires. Le modèle intermédiaire entre ces deux extrêmes -RadialStd- (3 paramètres, centre de distorsion et point principal distinct) nous donne des résultats moins bons.

L'illustration 25 ci-dessous dresse les différents écarts constatés.

		<i>Lidar 1</i>	<i>Lidar 2</i>
FraserBasic AutoCal	Mean : Sigma :	41 mm 22 mm	40 mm 21 mm
Fraser AutoCal	Mean : Sigma :	38 mm 21 mm	38 mm 21 mm
RadialBasic AutoCal	Mean : Sigma :	34 mm 18 mm	35 mm 18 mm
RadialStd AutoCal	Mean : Sigma :	37 mm 19 mm	36 mm 19 mm
RadialExtended AutoCal	Mean : Sigma :	35 mm 18 mm	34 mm 18 mm
RadialExtended Figeo	Mean : Sigma :	38 mm 20 mm	37 mm 20 mm
Calibration Per Image	Mean : Sigma :	41 mm 22 mm	36 mm 20 mm

Illustration 25: Répartition des écarts entre modèles photogrammétriques et relevés Lidar, méthode de comparaison par le plus proche voisin

Nous pouvons y noter qu'à quelques millimètres près, ces écarts sont comparables avec ceux constatés lors du relevé laser. Les deux mois séparant ces deux relevés peuvent-ils expliquer ces écarts ? Sachant que la zone est partiellement végétalisée (arbres, bandes enherbées,...) cette hypothèse n'est pas à exclure totalement.

L'**Illustration 25** montre la répartition de ces écarts le long de la digue, écarts constatés en utilisant le modèle RadialBasic. Nous retrouvons bien la bande le long du Rhône, pour laquelle la précision photogrammétrique est certainement meilleure que celle issue du relevé laser rasant. Le bois au sud-ouest présente aussi des incohérences. Cependant, la bande présente le long de la route subsidiaire est bien amplifiée. Les deux mois séparant les relevés suffisent-ils à justifier de tels écarts ?

Notons tout de même que nous constatons une zone au nord pour laquelle il existe des écarts -plus ou moins importants selon le modèle de distorsion utilisé. Or, nous ne pouvons expliquer ceux-ci que par une imprécision du modèle photogrammétrique, la route étant en bon état apparent, et non végétalisée.

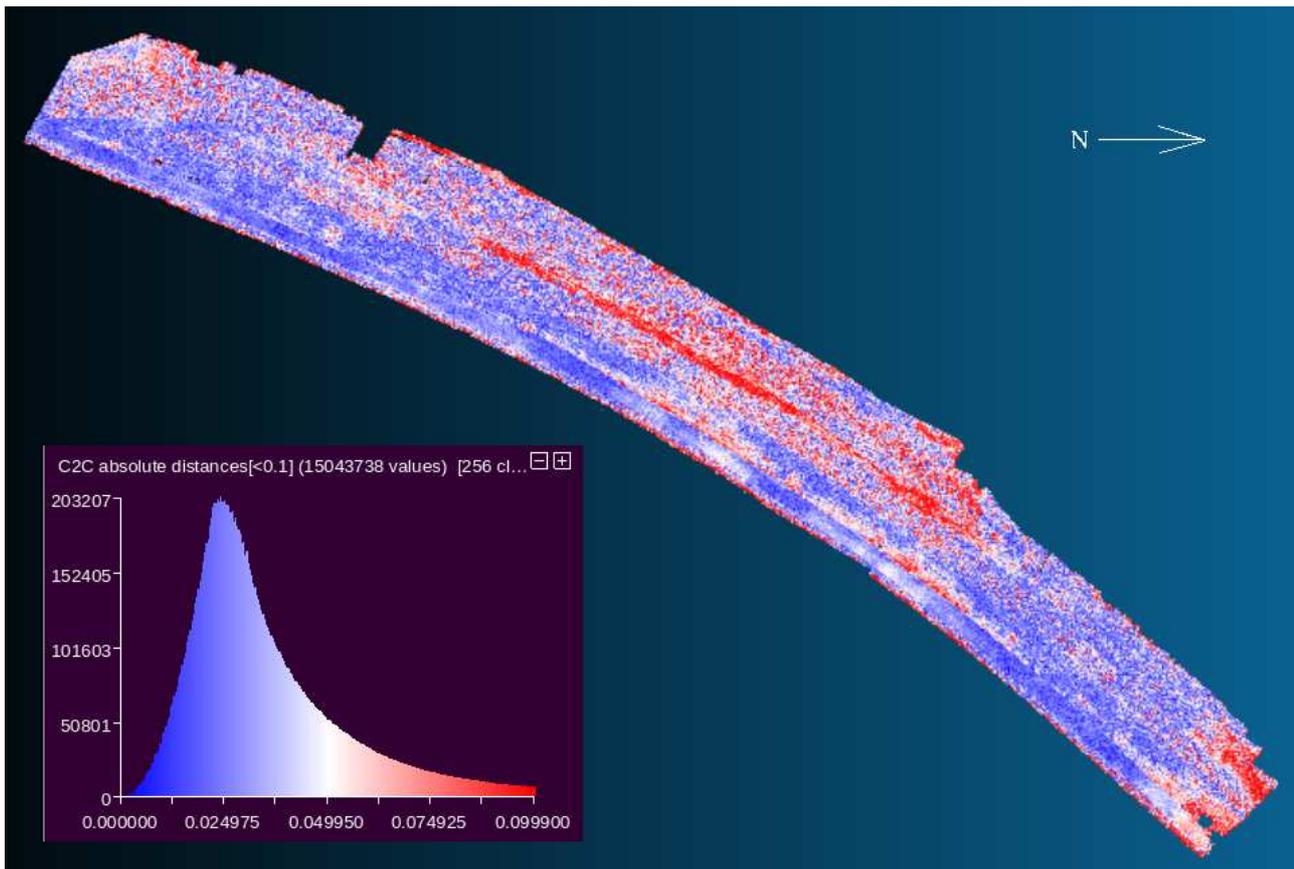


Illustration 26: Écarts entre relevé Lidar et modèle photogrammétrique obtenu avec une distorsion radiale basique, méthode de comparaison par le plus proche voisin

COMPARAISON GRID TO GRID

ENTRE LES DEUX RELEVÉS LIDAR :

Les comparaisons effectuées par CloudCompare ne sont cependant pas exemptes de défauts. Le logiciel dresse une liste des distances absolues entre 2 nuages de points. C'est à dire que pour un point du nuage A, il va chercher le point le plus proche dans le nuage B, et colore le point en fonction de cette distance. Les zones présentant des densités moindres (pour le s.) présentent donc des écarts importants, alors même que les mesures ne sont pas forcément mauvaises. Ces zones de faibles densité sont :

- Pour le relevé Lidar terrestre : sous les stations, ainsi que les mesures éloignées de celles-ci
- Pour la photogrammétrie : les zones de faible contraste, éléments mobiles (végétation sous l'effet du vent,...).

Pour pallier à ceci, un outil de comparaison est en cours de développement. Le programme prend entrée un nuage de points classique (de type « x y z », tel que délivré par Lidar), et un modèle numérique issu de MicMac. Ce dernier est une image tiff pour laquelle à chaque pixel correspond une dénivelée. Un fichier xml (à

spécifier également en entrée du programme) spécifie alors les paramètres d'origine et résolution du MNS.

Le programme charge donc le nuage de points classique, et va calculer une grille de répartition des dénivelées (en prenant les mêmes paramètres que ceux issus de MicMac). La comparaison des dénivelées une à une permet alors une visualisation des écarts avec la méthode « Grid to Grid ».

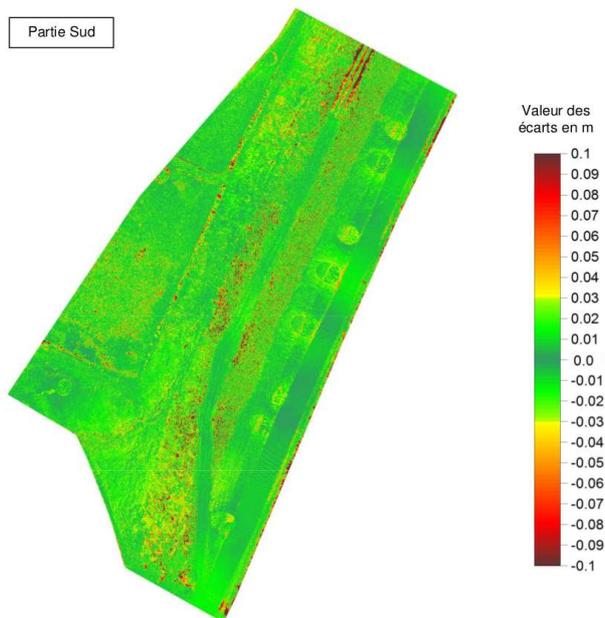
Toujours au stade de développement, le programme a permis de comparer les deux relevés Lidar terrestre selon une maille de 11mm (intérêt : maille similaire à celle obtenue avec MicMac). Nous obtenons des résultats très similaires à ceux décrits dans le rapport d'exécution de la mission lasergrammétrique (paragraphe 3.1)

- précision à 1 sigma : plus de 69 % des écarts inférieurs à 1,21 cm
- précision à 2 sigma : 95 % des écarts inférieurs à 3,43cm

L'algorithme utilisé passe par un processus de filtrage dont l'intérêt est double :

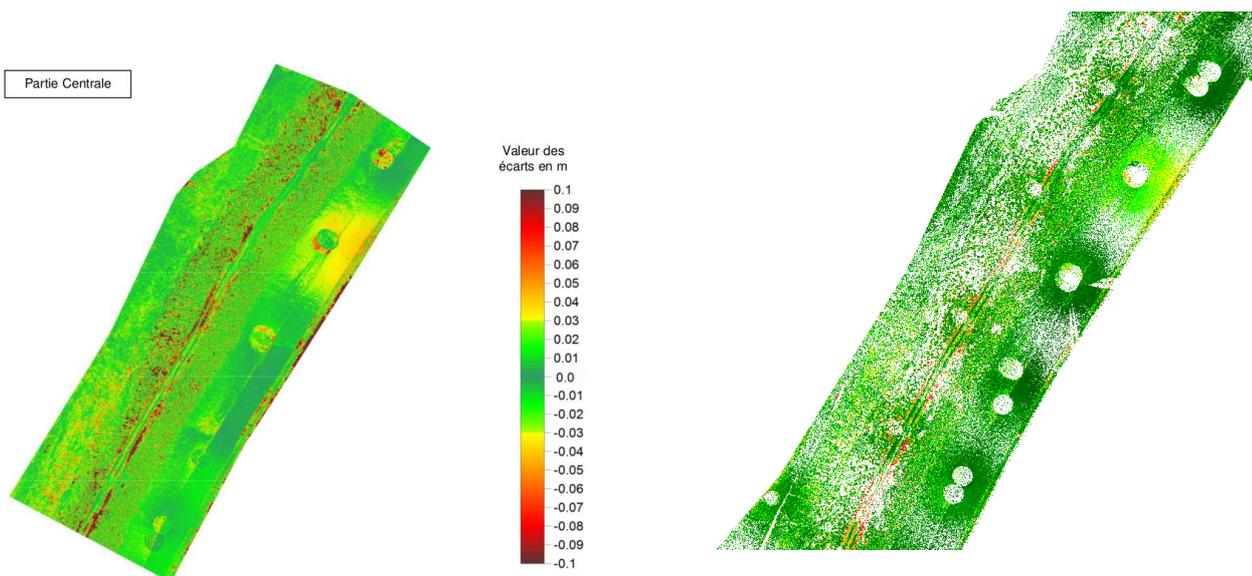
- Dans une maille (d'un même nuage de points), s'il existe plusieurs points P1 et P2 et que leur altitude :
 - $Z_{P1} - Z_{P2} < 3\text{cm}$ (précision a posteriori du lever Lidar), alors on garde la moyenne entre P1 et P2
 - $Z_{P1} - Z_{P2} > 3\text{cm}$ alors on ne garde aucun de ces points, la maille sera laissée vide
- Dans deux mailles identiques (de 2 nuages différents), si la différence entre les deux dénivelées constatées :
 - Est supérieure à 20cm => on exclut la mesure
 - Est inférieure à 20cm => on enregistre la mesure

Ces deux filtrages successifs permettent d'une part de s'affranchir des erreurs systématiques et de mesure. D'autre part, elle permettent d'éviter de comparer deux éléments qui sont manifestement différents (ex : un enrochement mesuré depuis le dessus et le dessous sera exclu, une paroi verticale peut présenter une forte différence d'altitude si la maille est créée avec les altitudes du dessus ou celle du dessous,...). L'idée est d'analyser moins de valeurs, mais de mieux le faire.



*Illustration 27: Comparaison « Grid to Grid » entre les deux levés Lidar avec Surfer (à gauche, maille de 5cm), et avec l'algorithme développé (à droite, maille de 1,1cm).
Partie Sud*

En appliquant ces paramètres de filtrage, nous nous affranchissons de près de 80 % des valeurs. À partir de nuages de plus de 17 millions de points, il ne nous reste plus 2,5 millions d'écarts à analyser. Cela semble toutefois nettement suffisant pour notre utilisation.



*Illustration 28: Comparaison « Grid to Grid » entre les deux levés Lidar avec Surfer (à gauche, maille de 5cm), et avec l'algorithme développé (à droite, maille de 1,1cm).
Partie centrale*

ENTRE LE LIDAR TERRESTRE ET LA PHOTOGRAMMÉTRIE

Cette méthode de comparaison semble donc opérationnelle, quand bien même son développement est toujours en cours.

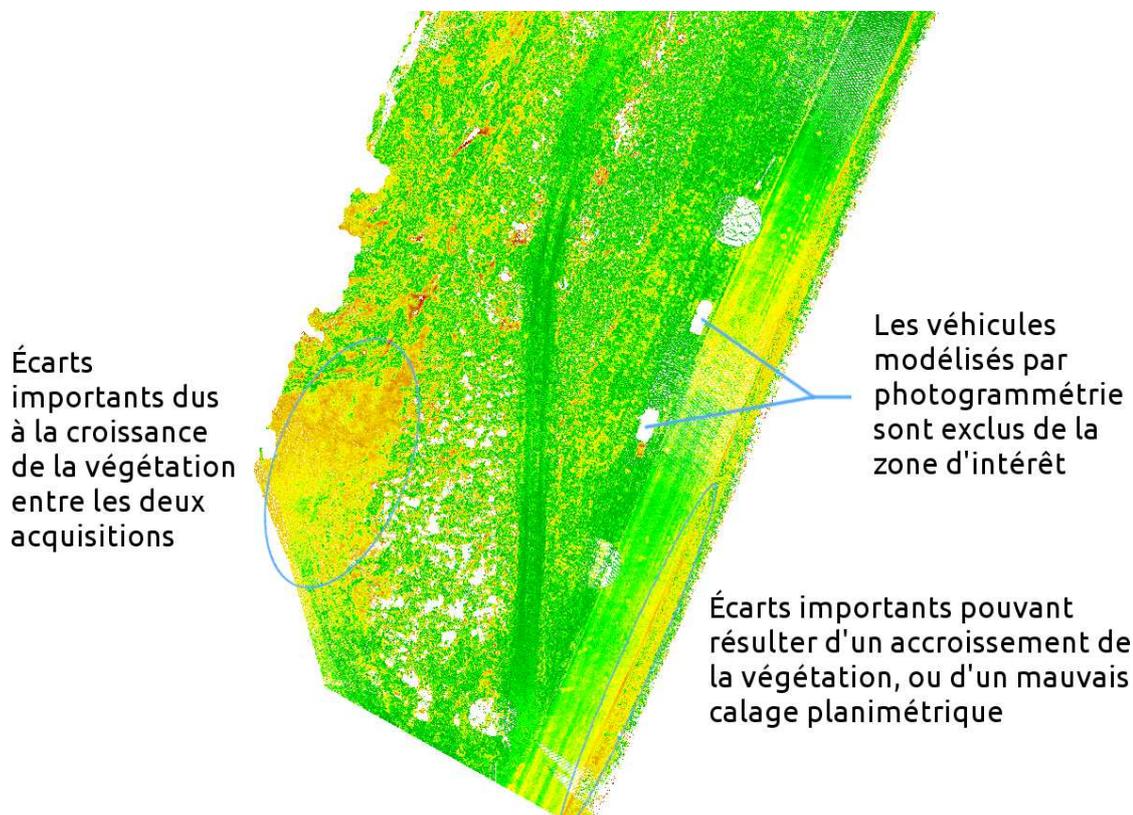


Illustration 29: Comparaison grille à grille entre les relevés LiDAR et photogrammétriques

Nous avons donc comparé nos modèles photogrammétriques et laser en utilisant cette méthode. Un extrait est présenté sur l'[Illustration 29](#). Nous pouvons constater que de gros écarts sont mesurés sur la végétation (coin sud-ouest). Les véhicules qui n'avaient pas été déplacés lors de la prise de vue (et donc inclus dans le modèle photogrammétrique) sont bien filtrés. Nous observons toutefois de forts écarts sur la route principale, écarts qui pourraient à une mauvaise corrélation dense (texture répétitive), ou à un mauvais calage entre nuages.

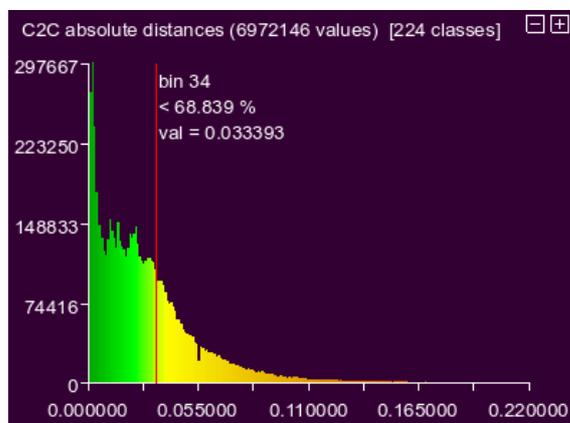


Illustration 30: Répartition des écarts

- précision à 1 sigma : plus de 69 % des écarts inférieurs à 3,35 cm (environ la précision à 2 sigma entre les 2 relevés Lidar)
- précision à 2 sigma : 95 % des écarts inférieurs à 7,48cm

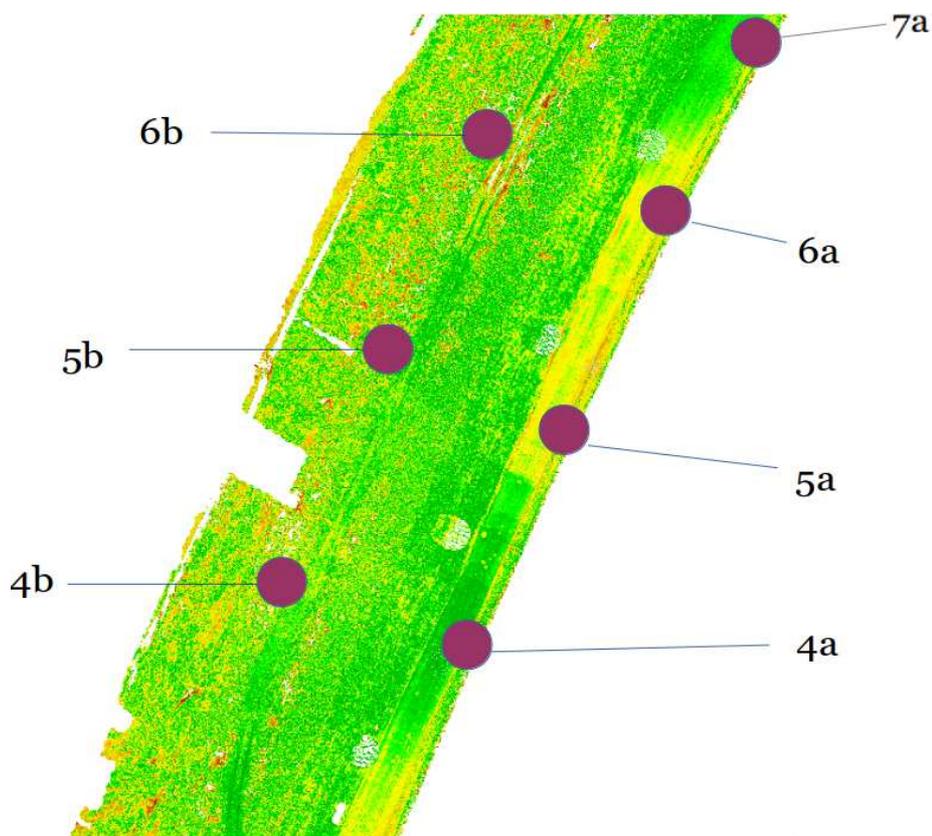


Illustration 31: Répartition des GCP, comparaison Grille à grille Lidar/photogrammétrie

Ces résultats sont plutôt décevants. Alors qu'on s'attendait à avoir de meilleurs résultats qu'avec la comparaison Nuage à Nuage. Ils permettent toutefois de se poser quelques questions :

- Les nuages étant géoréférencés avec des points relevés par théodolite (Lidar) ou GPS (photogrammétrie), on peut supposer qu'il existe une erreur de calage de quelques centimètres ([Illustration 29](#)). Est-il rigoureux de les comparer sans prendre en compte cette déviation ?
- Il existe des algorithmes pour recalcr deux nuages de points entre eux. Globalement, ils consistent à minimiser les écarts entre des échantillons de points considérés identiques. Quels résultats pourrions-nous obtenir en recalant ces nuages de la sorte ?
- Le processus de corrélation dense est-il adapté à notre besoin ?

RÉDUCTION DU NOMBRE DE POINTS D'APPUI

Avant même d'étudier l'influence de la répartition des points d'appui, l'[Illustration 31](#) illustre que même en utilisant tous les points d'appui, certaines zones pourtant bien contraintes présentent des écarts anormalement élevés (ex : entre 5a et 6a).

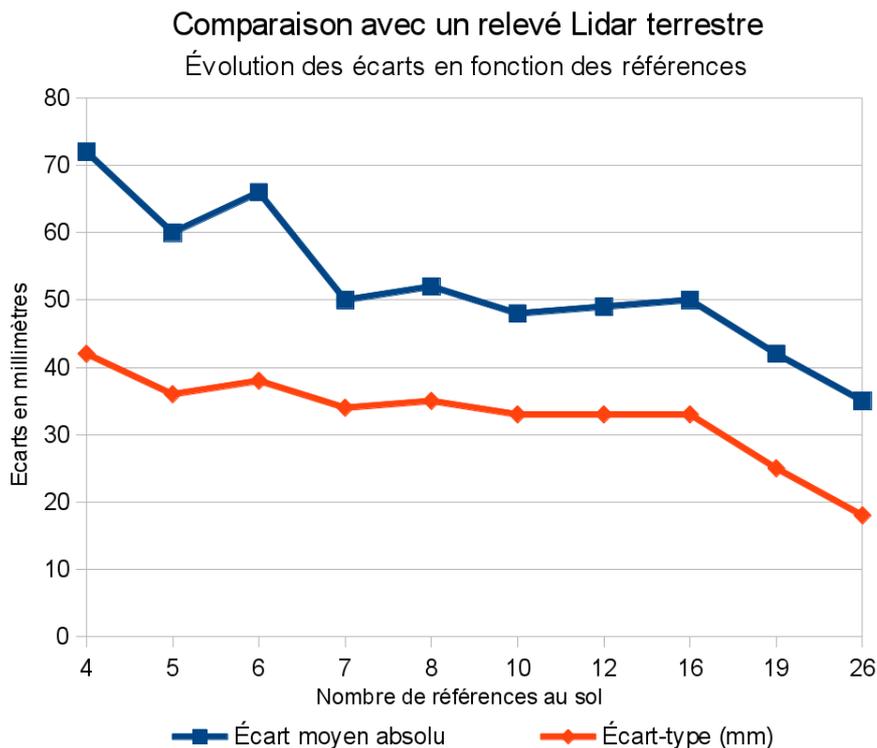


Illustration 32: Écarts entre photogrammétrie et Lidar, en fonction du nombre de points d'appui, comparaison Cloud to Cloud

L'intérêt des points d'appui étant justement de contraindre le modèle à s'adapter aux valeurs fixées, il semblerait que l'outil utilisé pour cette opération ne remplisse pas sa tâche.

Nous avons tout de même effectué quelques tests sur la réduction du nombre de points d'appui. Les premiers résultats confirment logiquement que plus il y a de points d'appui, meilleurs sont les résultats.

Ce graphique est toutefois à prendre avec des pincettes. D'une part, parce qu'il est certainement possible d'améliorer ces précisions en travaillant la sélection des points homologues, l'aérotriangulation, et l'adaptation aux points d'appui. D'autres part, parce que la répartition de ces points d'appui le long de la digue reste à étudier plus en détail. L'illustration 33 ci-dessous illustre deux comparaisons Lidar/photogrammétrie faites avec 10 points d'appui.

Sur la partie gauche, les points d'appui ont été répartis de manière à contraindre le modèle au départ (4 points) et à l'arrivée (4 points), en fixant 2 points au milieu. Sur la partie droite, les points ont été répartis en quinconce.

En comparant ces modèles avec le relevé Lidar, nous observons que la seconde configuration présente de bien meilleurs résultats. Cette dernière présente des écarts moyens absolus 20 % meilleurs que dans la première configuration.

La répartition des points d'appui semble donc cruciale. Toutefois, l'objectif étant de travailler avec un minimum de points, il nous semble important de nous concentrer sur les premières étapes, afin de pouvoir produire le meilleur modèle possible. La réduction des points d'appui sera étudiée sur la simulation de vol effectuée dans le laboratoire de métrologie de l'ESGT (75 cibles sur 3 rangées, données très robustes sur la position de l'appareil photographique).

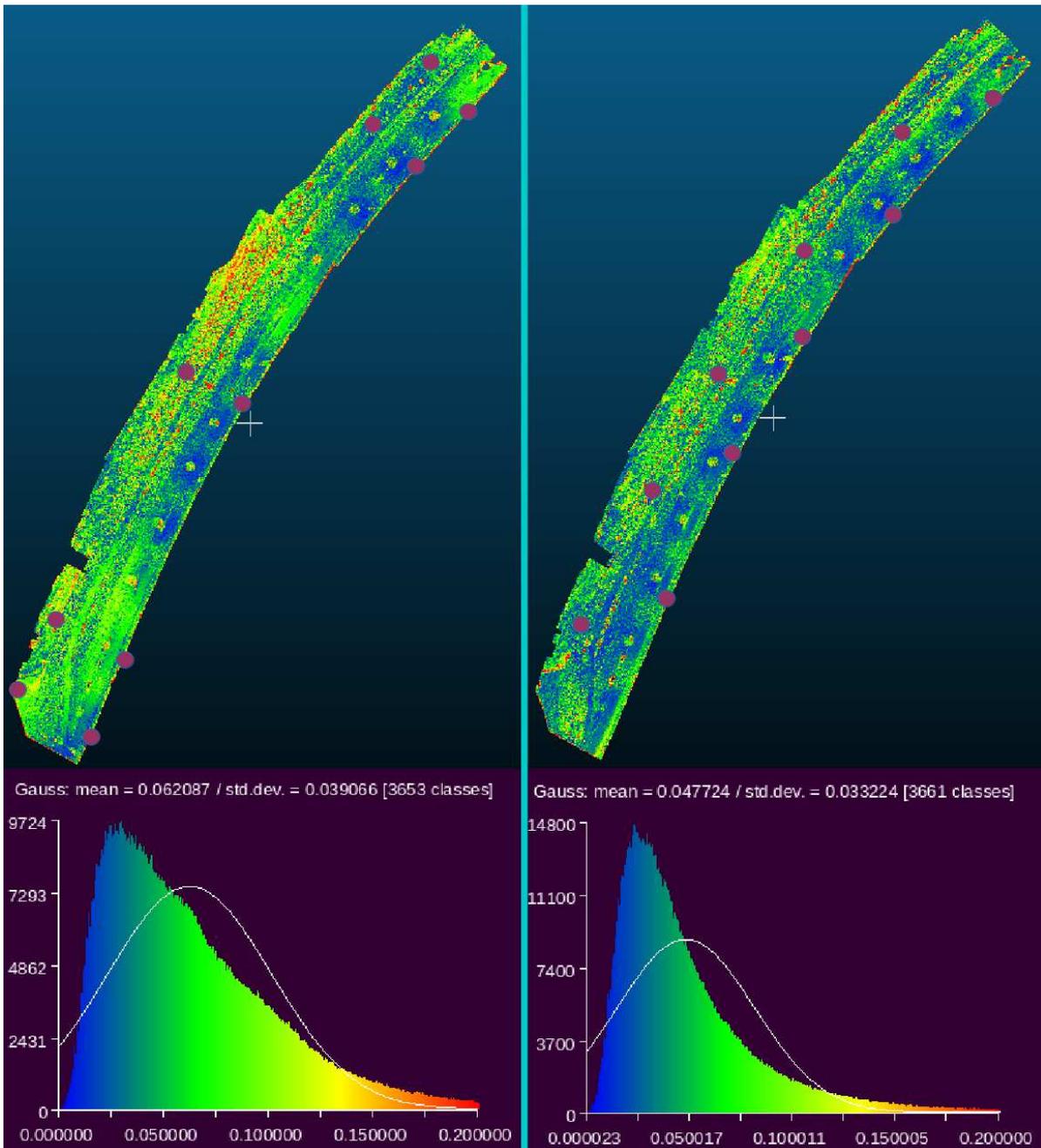


Illustration 33: Répartition des écarts en fonction de la répartition géographique des points d'appui

SYNTHÈSE

Nous avons vu qu'il est très aisé de produire une orthophotographie, un nuage de points, et une aérotriangulation cohérents, visuellement parfait.

Avec une hauteur de vol de 60m, nous aboutissons à modèle numérique de type grille 2,5 D. Chaque carreau de la grille fait 11mm (taille du pixel terrain), et à chaque carreau est affecté une valeur en Z.

La comparaison « Cloud to Cloud » est problématique car elle ne prend pas en compte les zones de faible densité. On constate que les écarts moyens absolus sont centrés sur une valeur proche de la précision du calage planimétrique. Un recalage fin des nuages pourrait permettre de corriger cela.

Un outil de comparaison « Grid to Grid » (en développement) permet d'effectuer des comparaisons adaptées à la prise de vue aérienne, et à la grille générée par MicMac. Le programme semble fonctionner correctement (écarts similaires à ceux calculés par 3D Scan Map avec Surfer).

L'adaptation de l'aérotriangulation sur les points d'appui semble être problématique. On constate de forts écarts autour de certains points, alors que -logiquement- le modèle devrait être contraint sur ces valeurs et présenter des écarts de plus en plus importants en fonction de leur éloignement (dérive du modèle).

Sur notre acquisition ESGT (simulation d'un vol de drone dans un environnement métrologiquement robuste), nous allons étudier ces prochains mois :

- l'importance du sous échantillonnage des images (nécessaire pour un calcul rapide) pour le calcul des points homologues (résultats ci-dessus : image sous échantillonnées par 6)
- l'importance de la sélection des points homologues, selon deux stratégies :
 - points homologues répartis sur une grille régulière
 - points homologues conservés uniquement s'ils sont redondants
- quel modèle/méthode de calibration semble le plus adapté à notre appareil ?
- Combinaison des paramètres optimaux sur le modèle réduit → quelle précision maximale pouvons-nous atteindre sur notre modèle réduit ? Sur nos digues ?

À partir de ces résultats, nous envisagerons de nouvelles stratégies pour améliorer ces précisions (travaux sur les méthodes de calibration, de sélection des points homologues,...).

ANNEXE 6

RAPPORT DE MISSION :

ROCHEMAURE-2014 ; AVIGNON-S1-S2-S4

Rédacteurs : V.Tournadre – M.Pierrot-Deseilligny – P.H. Faure

Date: du 10 mars au 1er avril 2014

Lieu : La Pallière - Belley (PK133.4), Rochemaure (PK 153.0), Avignon (PK230.700-RD et PK220 à PK230-RG)

Participants IGN- ENSG : Vincent Tournadre – Julien L'Harridon

Participants CNR : P.H.Faure – DR Belley – DR Montélimar – DR Avignon

Prestataire drone : IGN (S1) – Redbird (S2, S4)

AVANT-PROPOS

Dans le cadre de la thèse en Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère appliquée au suivi d'évolution de digues, les intervenants ont identifié (cf CR Comité de suivi #1) trois sites présentant un intérêt pour un suivi d'évolution régulier.

	Intérêt	Topo existante	Zone auscultation	Dates acquisition
La palière Haut Rhône PK133.4 RD	Mouvement avérés	RN et profils en travers disponibles sur site	1000 m minimum	1^{er} trimestre 2013
Rochemaure Bas Rhône 153.0 R	Levé Terrestre en 2013	LIDAR en Lasergrammétrie prévu en 2013	300 mètres	A définir : 2 ^{ime} trimestre 2013 ?
Avignon Bas Rhône 230.700 RD.	Zone sensible	Instrumentation potentielle par de fibre optique de déformation.	150 mètres	A définir

Illustration 34: Rappel du CR du comité de suivi de thèse #1

Trois acquisitions ont été menées par l'IGN, dans le cadre de la surveillance réglementaire des ouvrages. Deux acquisitions ont été menées par la société Redbird pour expérimenter de nouveaux vecteurs aériens, et leur intérêt pour de l'utilisation en situation

exceptionnelle.

Les sites de La Pallière et Rochemaure ont fait l'objet d'acquisitions au courant de l'année 2013. Cette nouvelle campagne devrait donc permettre d'effectuer un suivi d'évolution temporel.

ACQUISITIONS EN SCÉNARIO S1

Les textes régissant l'utilisation d'aéronefs télépilote, et notamment l'arrêté du 12 avril

2012 relatif à « l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord » 1, distinguent plusieurs scénarios de vol.

Le scénario S1, le plus simple à mettre en place et le moins restrictif en matière d'équipements, permet d'utiliser une large gamme de vecteurs aériens en dehors des

zones urbaines/rassemblements, à la condition que le vol se pratique à vue (à moins

de 100m du télépilote), et sous un plafond de 150m. Il est évidemment possible de combiner plusieurs vols afin de couvrir un linéaire plus long.

Les 3 acquisitions ont eu lieu dans le cadre d'une couverture « classique ». Il s'agit de survoler la digue à une hauteur de 60m, et de parcourir le linéaire en déclenchant des prises de vues afin d'obtenir des recouvrements de l'ordre de 80 %. Pour stabiliser l'ensemble, deux vols parallèles ont été effectués.

Notre capteur pour ce scénario est le Sony-RX1. Satisfait de la qualité d'image et de la stabilité du bloc optique, nous obtenons des clichés couvrant un champ de 60x40m, et offrant des pixels couvrant globalement 1x1cm. Nous noterons aussi que la présence d'un obturateur à diaphragme permet d'assurer que tous les pixels sont enregistrés au même instant.



Illustration 35: Hexacoptère de l'IGN utilisé pour les acquisitions

Le vecteur aérien est un HexaXL de la société allemande mikrokopter. Il est piloté par Julien L'Harridon, qui a défini les plans de vols et les points de passage en fonction du CCTP 2 rédigé pour l'opération.

LA PALLIÈRE PK133.4

Le site ayant déjà été couvert en 2013, il est déjà équipé de références topographiques. Celles-ci ont été relevées par les équipes de topographes de la division régionale de Belley. Les coordonnées planimétriques ont été déterminées par GPS temps réel, alors que l'altimétrie résulte d'un nivellement direct, assurant une précision accrue.

L'acquisition a eu lieu en deux temps. Arrivé sur le site le mardi 11/03 en début d'après-midi, le premier vol est catastrophique, puisque le télépilote perd très rapidement le contrôle de l'aéronef, et parvient tant bien que mal à le crasher dans un arbre. Ce qui est toujours mieux que le Rhône.



Illustration 36: Premier vol avec les nouvelles hélices



Illustration 37: Plan de vol, position des sommets de prise de vue

La cause de ce crash semble provenir d'un nouvel jeu d'hélices. Celles-ci sont censées offrir une portance accrue et réduire davantage les vibrations. Quelques secondes après le décollage, plusieurs d'entre elles semblent s'être coincé, créant ainsi un déséquilibre pour lequel le pilote automatique n'a su correctement réagir.

Après quelques heures de bricolages, le matériel est réparé. Des vols à vide confirment la bonne tenue en vol du drone. Les hélices en bois ont été remplacées par un jeu en plastique.

L'acquisition se déroulera cette fois sans problème le lendemain en fin de matinée (il vaut mieux éviter de travailler avant 10-11h, sans quoi des ombres portées risquent d'entacher la qualité du relevé). Le vol nécessitera 2 heures (6 vols successifs, car le scénario réglementaire limite la distance à 200m).

À noter que nous prévoyons de déclencher des photographies tous les 4 mètres, afin de bénéficier d'un recouvrement de 90 %. L'intérêt était donc de disposer de 2

jeux de données à recouvrement de 80 %, indépendants mais acquis dans des situations identiques. Le test de répétabilité semblait donc en place, mais des difficultés logicielles sont intervenues ; le recouvrement final varie globalement de 80 à 90 %, ne permettant pas l'extraction de 2 jeux.

AVIGNON-S1

Suite au relevé de La Pallière, l'équipe composée de Vincent Tournadre (doctorant) et Julien L'Harridon (télépilote) arrive sur le site le jeudi 13/03 matin. Le linéaire étant ici limité à 600m, le vol est bien plus rapide. Une heure sera suffisante pour acquérir les données, sans le moindre problème technique.

Néanmoins, voulant profiter de la réserve de temps (et de batteries) disponible, l'équipe envisage une nouvelle couverture en modifiant l'orientation des clichés (cliché pris en paysage au lieu de portrait). Le vol semble se dérouler normalement, jusqu'à la procédure d'atterrissage lors de laquelle le télépilote perd à nouveau le contrôle du drone.

La chute se limite à quelques mètres. Les dégâts sont minimes mais suffisants pour aborter les tests envisagés. La cause de ce nouvel accident semble venir d'un moteur que l'on retrouvera décroché de l'arbre censé le maintenir à la structure.



Illustration 38: Plan de vol, position des sommets de prise de vue

ROCHEMAURE-2014

Suite aux incidents survenus lors des deux missions précédentes, le télépilote prend la décision d'engager une révision générale de son drone, par les techniciens spécialisés du Service des Activités Aériennes de l'IGN. Cela contraint à repousser le relevé de l'aménagement de Rochemaure.

Par ailleurs, la digue de Rochemaure est située face à l'aérodrome de Montélimar, et donc à une distance inférieure aux 5km exigés par la réglementation.

L'article 4, alinéa 3 de l'arrêté du 11 avril 2012 s'applique à cette situation :

“Lorsque les évolutions prévues se situent dans l'emprise d'un aérodrome, ou à

proximité d'une infrastructure destinée à l'atterrissage ou au décollage, les conditions d'exécution des activités correspondantes et les éventuelles dérogations aux prescriptions du présent arrêté font l'objet d'un protocole entre le responsable de l'activité et le service de la navigation aérienne rendant les services de la circulation aérienne sur l'aérodrome, à défaut le prestataire du service d'information de vol d'aérodrome, à défaut l'exploitant de l'infrastructure.”

L'IGN a donc lancé un protocole d'accord entre les différents interlocuteurs, qui sont :

- le prestataire de vol (IGN)
- le(s) propriétaire(s) des parcelles survolées (CNR)
- l'Exploitant de l'aérodrome de Montélimar-Ancone (LFLQ)
- la mairie (Montélimar)
- la DGAC



Illustration 40: Plan de vol à 30 mètres



Illustration 39: Plan de vol à 60 mètres



Illustration 41: Plan de vol à 120 mètres

La signature de la mairie sera restée longtemps en suspens. Nous l'obtiendrons après un appel de P.H.Faure (CNR) justifiant l'intérêt de ce vol, et pourrons effectuer le relevé le lundi 17/03. Julien L'Harridon (télépilote IGN) effectuera le relevé seul, et procédera même à une triple couverture de la zone à relever.

Après en discuté avec divers opérateurs de vol, il semble que les dossiers d'autorisation de vol drone soient régulièrement soumis à de long délais. D'une part, ces dossiers ne sont pas forcément prioritaires du point de vue de la mairie. D'autre part, l'administration étatsn elle-même très peu informée des procédures à suivre, cela complique la tâche. Il semblerait qu'une fois la mairie au fait, les prochaines autorisations soient bien plus rapides à obtenir. Il faut aussi relancer régulièrement les acteurs afin de leur rappeler l'importance du projet.

ACQUISITIONS EN SCÉNARIO S2

Le scénario S2 prévoit l'utilisation de drone dans les conditions suivantes : vol en dehors de zones urbaines/rassemblement, vol en immersion autorisé (jusqu'à 1000m), hauteur de vol limitée à 50m.

Plusieurs systèmes clé-en-main ont été conçu pour évoluer dans ces scénarios. Il a été fait appel à la société Redbird pour effectuer le vol, qui a mis en place le Gatewing X100. Ce système, au même titre que le senseFly eBee et d'autres équipements, a fait l'objet d'une dérogation lui permettant d'évoluer jusqu'à une hauteur de 150m.

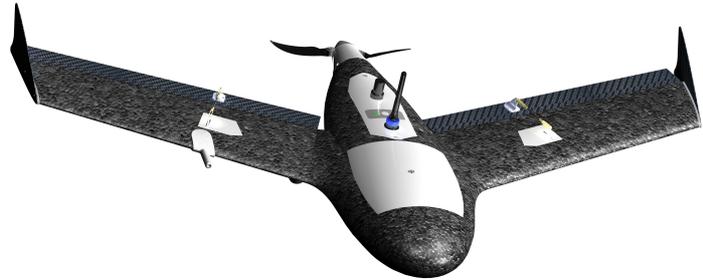


Illustration 42: Gatewing UX100 utilisé pour l'acquisition S2

Le système est en fait paramétré pour couvrir une zone en volant entre 100 et 150m. Son haut degré d'automatisation facilite la mise en place de l'équipement, au prix d'une flexibilité réduite (tailles des pixels, capteur associé,...).

Le choix du capteur embarqué est particulièrement criticable. Ayant fait le choix de la légèreté face à celui de la qualité, le Ricoh GR4 délivre des images légèrement bruitées, avec de petites aberration chromatiques. La qualité reste toutefois convenable pour une modélisation photogrammétrique, malgré l'obturateur à rideau créant des erreur difficilement corrigibles.

Les différentes vidéos promotionnelles nous vantent un système complet, pour lequel un logiciel intuitif permet le tracé de l'emprise de travail, et qu'il n'y a plus qu'à envoyer en l'air. La réalité est différente, puisqu'il faut suivre une check-list rigoureuse (15min de préparation), mais aussi parce que comme tout équipement électronique, des bugs peuvent survenir.

Il faudra près de 2h avant que l'équipe Redbird parvienne à reprendre en main le système, et à l'envoyer effectuer un premier vol (20min), le drone évoluant selon un axe parallèle à la digue. Un second vol (40min), pour lequel le drone évolue perpendiculairement à l'axe de vol, a été réalisé. Celui-ci a été réalisé afin que le drone vole avec le vent de côté, situation privilégiée permettant des recouvrements réguliers.



Illustration 43: Drone sur sa catapulte, paré au décollage

On notera également que la procédure de décollage/atterrissage, présentée comme l'un de ses points forts, est particulièrement complexe à mettre en place. Face au

prix de l'équipement, il semble que peu d'opérateurs veulent prendre le risque d'atterrir sur une digue, dont la largeur est jugée trop étroite. Les 2 vols ont donc eu lieu de la rive faisant face à notre chantier. Le premier atterrissage a vu le drone passer entre 2 arbres, le second a « failli terminer dans le Rhône ».

ACQUISITIONS EN SCÉNARIO S4

Le scénario S4 est un scénario quasi-unique au monde, dans lequel un opérateur peut utiliser un drone sans limite de distance. Il a une fois de plus été fait appel à la société Redbird pour couvrir ce vol.

Le seul drone homologué pour ce scénario est développé par le français Delair-Tech. Il s'agit du modèle DT18. Il s'agit d'un drone à voilure fixe permettant l'emport d'une charge utile de 300 grammes, et pouvant évoluer jusqu'à 50km en commande manuelle.

L'utilisation d'un tel matériel requiert de faire appel à des professionnels. Son utilisation est effectivement soumise à un très haut degré de qualification (pilote avion avec plus de 100heures de vol).



Illustration 44: Drone DT18

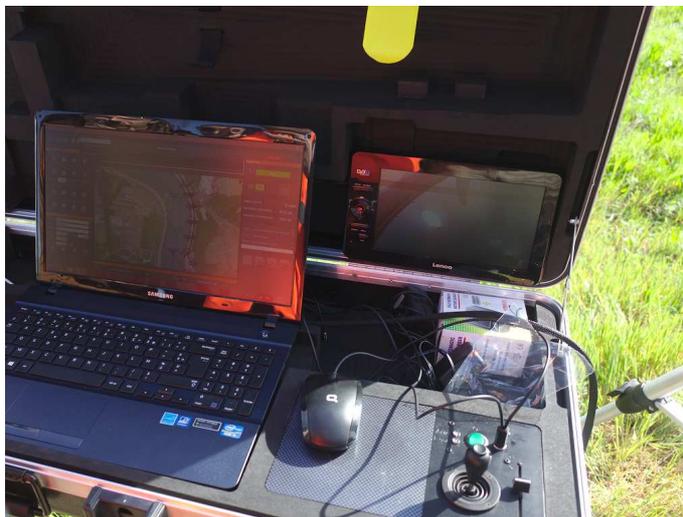


Illustration 45: Station de contrôle du drone

Sa mise en place est censée être rapide, mais une fois de plus de petits soucis électronique ont retardé le premier vol d'une demi heure. L'atterrissage et le décollage se sont fait depuis la digue faisant face à notre ouvrage. Nous avons pu bénéficier d'un retour vidéo sur les 8 à 9 premiers kilomètres, puis le passage du drone en dehors de l'horizon a provoqué la perte du signal (le drone continuant le vol en toute autonomie).

Le plus grand inconvénient de ce système semble être la qualité du capteur qu'il embarque. Doté d'une résolution de 5Mpixels, présentant beaucoup de bruit et dont la qualité est assez largement criticable. Le réglage des paramètres de prise de vue semble lui aussi à revoir. Le photographe n'a le contrôle que sur deux paramètres : le temps d'exposition, et le gain (équivalent ISO). De plus, il n'y a aucun retour de l'image photographiée (le retour vidéo provient d'une seconde caméra installée dans le nez de l'appareil). Seul un histogramme peut permettre de

juger la qualité de notre cliché.

Les images que nous acquises de cette manière présentent une surexposition nette, notamment au niveau de la route gravillonnée pour laquelle le processus de corrélation dense est très probablement incapable de produire une restitution 3D. Un autre vol a été effectué sans que les images soient d'une qualité vraiment meilleure.

Notons que Redbird a proposé de refaire l'acquisition à titre gracieux, proposition à laquelle un geste commercial s'est substitué.

RÉCAPITULATIF ET RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES ÉQUIPEMENTS

Vecteur	Avantages	Inconvénients
HexaXL (S1)	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité sur le choix du capteur (très bonne qualité d'image associée) - Flexibilité sur le plan de vol - Matériel bon marché - Décollage/atterrissage depuis le site 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un télépilote expérimenté - Limité (tel quel) au scénario S1 - Faible autonomie en vol (10 min)
Gatewing X100	<ul style="list-style-type: none"> - Habilité en scénario S2 - Permet de couvrir de grandes zones - Accessible à un télépilote débutant - Bonne autonomie en vol (45 min) 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualité d'image (au sol) moyenne - Qualité d'image (en vol) mauvaise - Faible flexibilité sur le plan de vol - Matériel cher - Nécessité d'une piste d'atterrissage large
Delair Tech DT18	<ul style="list-style-type: none"> - Seul vecteur³ habilité en S4 - Permet de couvrir de très grande zones - Excellente autonomie en vol (2h) 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualité d'image (sol/vol) médiocre - Logiciel/méthodes de prise de vue à revoir - Matériel cher - Nécessite un pilote/télépilote très expérimenté - Procédure administrative à mettre en place très lourde (délais > 1mois) - Nécessité d'une piste d'atterrissage large + absence de masques entre la station sol et le drone en vol

DESCRIPTION DES OUTILS DE LA SUITE MICMAC

TAPIOCA

Programme de détection des points homologues ; il s'agit en fait d'une interface vers « Pastis ». 5 modes de fonctionnement :

³ La société Delta Drone développe l'aile volante Delta Y... si elle voit le jour

- **All** : stratégie de traitement en bloc, coûteuse en temps de calcul.
- **MulScale** : Multi-échelle → sous échantillonne les images à une taille x, puis à une taille y en se basant sur les couples déterminés précédemment. Plus rapide
- **Line** : recherche des points homologues dans les k images adjacentes.
- **Graph** : stratégie de traitement en bloc qui se base sur la théorie des graphes.
- **File** : recherche des points depuis un fichier indiquant les couples d'images

TAPAS

Programme de calcul des orientations internes/externes ; il s'agit en fait d'une interface vers « Apero ». Plusieurs modèles de distorsion disponibles, des modèles raidaux simples aux modèles permettant de corriger les optiques Fisheye. Il permet aussi de garder un certain contrôle sur la procédure de calcul.

GCPBASCULE

Programme qui permet transformer une orientation relative en orientation absolue (géoréférencée). La transformation est une similitude spatiale à 7 paramètres. Si l'orientation relative est sujette à une dérive, celle-ci ne sera pas corrigée.

Le programme prend en paramètre un fichier de coordonnées (GCP), et un fichier de mesures images (position des GCP dans les images). Ce dernier peut être créé avec SaisieappuiPredic.

CAMPARI

Programme d'adaptation d'une orientation (absolue) sur les points d'appui. S'utilise logiquement après avoir utilisé GCPBascule.

Il ne s'agit plus ici d'effectuer une similitude, mais d'adapter une orientation donnée pour corriger ses dérives éventuelles. Le programme réalise alors un ajustement par la méthode des faisceaux en incluant les mesures images de GCP, et permet de réadapter le fichier de calibration.

TARAMA

Programme permettant de créer un tableau d'assemblage (mosaïquage des photos individuelles). Son intérêt est de vérifier un chantier afin d'y repérer d'éventuelles erreurs avant de lancer la corrélation dense. On y sélectionne aussi la zone d'intérêt afin de réduire le temps de calcul.

MALT

Programme utilisé pour effectuer la corrélation dense, et qui aboutit à la création

de modèles 3d ; il s'agit en fait d'une interface vers « MicMac ». Fonctionne en géométrie image ou terrain.

NOUVELLE PROCÉDURE DE CALCUL D'AÉROTRIANGULATION

Avant d'exposer les résultats que nous obtenons en exploitant les données acquises, il nous semble nécessaire de faire un point sur les avancées que nous avons faites sur le traitement des images.

L'exploitation du jeu de données ESGT nous a montré qu'une calibration, aussi robuste soit-elle, est soumise à de fortes variations. Celles-ci résultent de l'instabilité relative du capteur/optique, et qui impliquent une altération des paramètres précédemment déterminés.

Classiquement, nous traitons les images en utilisant un fichier de calibration effectué sur un polygone muni 50 cibles. Relacher ces paramètres lors de l'ajustement procure de meilleurs résultats. Une calibration multi-sites (en incluant une scène 360° et une scène fortement texturée) a été testée, nous donnant des résultats plus ou moins bon selon les cas.

L'exploitation des données ESGT nous a aussi montré que nous obtenions les meilleurs résultats en utilisant un modèle de distorsion Fisheye. Ce modèle envoyant les points en bord d'image « à l'infini » (correction en Arctangeante), nous avons été surpris par ces résultats. L'hypothèse est que les constructeurs d'optiques multiplient la complexité de leurs objectifs, et que les formules de correction de distorsion, mises au point pour des objectifs classiques, ne sont plus au goût du jour.

De nouveaux modèles ont été mis en place, avec une correction par série de Fourier, à laquelle on superpose une correction polynomiale de degré 7. Le principe de calcul est le suivant :

*mm3d NewTapas Four15x2 "11.*ARW" Out=Calib-Four DegGen=0 DegRadMax=3*

On calcule sur un sous-ensemble d'images un pré-fichier de calibration, en limitant les degrés de liberté (équivalent RadialStandard)

*mm3d NewTapas Four15x2 ".*ARW" InOri=Calib-Four DegGen=2 Out=AllRelFour15*

On applique cette pré-calibration sur notre ensemble d'images, en libérant les tous les paramètres de degré 2

*mm3d NewTapas AddPolyDeg7 ".*ARW" InOri=AllRelFour15 Out=AllRel-F15AddP7*

On ajoute une correction additionnelle, qui contient tous les polynômes en XY de degré 7 pour modéliser des déformations quelconques (capteur, optique,...)

Une refonte du calcul d'ajustement par la méthode par des faisceaux a également permis d'assurer une meilleure convergence du système. Nous verrons par la suite dans quelle mesure nos résultats en sont améliorés.

CONFIGURATION DE CAMPARI

Campari, le programme d'ajustement de l'aérotriangulation sur les points d'appui, permet de garder le contrôle sur le degré de contrainte que l'utilisateur veut appliquer.

On peut d'une part choisir le facteur de précision à appliquer à nos points d'appui (intérêt : coller le modèle aux mesures terrain), mais aussi contrôler le facteur de précision du pointé des GCP dans les images (intérêt : coller le modèle aux mesures de l'utilisateur).

Campari permet aussi de garder le contrôle sur d'autres paramètres, dont certains semblent pouvoir améliorer la précision (ex : SigmaTieP). Hormis cas particulier, la nouvelle procédure de calcul d'aérotriangulation nous donne parfois des résultats suffisamment concluants pour se passer de l'outil Campari. Nous ne détaillerons donc pas ici l'influence des autres facteurs.

Classiquement, nous utilisons un facteur terrain de 1 (précision de la mesure terrain), et un facteur de 0.5 pour le pointé dans les images. En utilisant 6 points d'appui, nous avons testé différentes configurations, puis effectué une similitude sur l'ensemble des points.

Scénario	Précision GCP	Précision Pointé	Écart moyen absolu (m)
1 – Classique	1	0,5	0,017
2 – Mauvais pointé	1	1	0,017
3 – Contrainte forte sur GCP	0,5	0,5	0,014
4 – Contrainte forte sur GCP, faible sur pointé	0,5	1	0,013
5 – Collé aux mesures	0,001	0,001	0,012
6 – Contrainte très forte sur pointé	1	0,1	0,018
7 – Contrainte très forte sur GCP	0,1	0,5	0,011
8 – Contrainte très forte sur GCP, collé au pointé	0,1	0,01	0,016

Illustration 46: Écart moyen absolu associé à chaque configuration

On trouve ainsi que les différentes configuration nous donne des résultats assez proches. Cependant, les écarts sont généralement supérieurs lorsque la contrainte sur les points d'appui est assez forte.

Les paramètres suivants semblent optimaux et ont été utilisés pour la suite des calculs :

- précision des points d'appui : facteur de 0,1
- précision des pointés image : 0,5 pixel

TRAITEMENTS DE LA PALLIÈRE PK133.4

Le jeu de données est composé de 359 images et de 86 références topographiques réparties sur 3 axes, tous les 50 mètres.

6 vols ont été nécessaires pour couvrir les 1100m en scénario S1.

Malheureusement, le segment #4 est manquant. Un bug semble avoir entaché le transfert du plan de vol vers l'hexacoptère, celui-ci ayant couvert deux fois le segment #3. Le manque est de 150m linéaires.

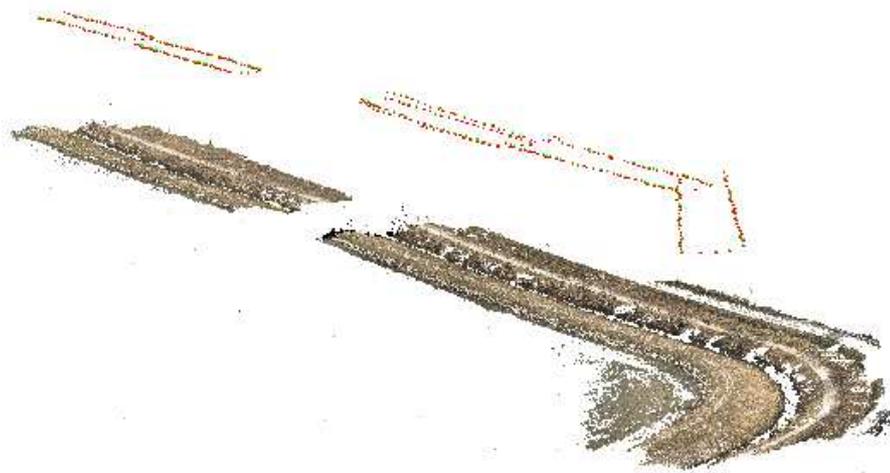


Illustration 47: Caméras & Points homologues. Une erreur lors de l'acquisition ne permet pas de relier les deux segments

Du fait de la rupture entre les segments de vol, il est préférable de diviser les traitements en deux chantiers distincts :

- d'une part, les segments 1, 2 et 3 → Partie 1
- d'autre part, les segments 5 et 6 → Partie 2



Illustration 48: Orthophotographie de la partie 1 (segments 1, 2 et 3)



Illustration 49: Orthophotographie de la partie 2 (segments 5 & 6)

Nous avons obtenu ces résultats en utilisant l'ensemble des points d'appui

disponibles. Nous pouvons être déçu par la qualité de ceux-ci, notamment par les valeurs de la partie 2 après ajustement (indicateurs plus mauvais qu'avant l'ajustement).

	Partie 1		Partie 2	
	Avant ajustement	Après ajustement	Avant ajustement	Après ajustement
X (m)	0,010	0,009	0,019	0,020
Y (m)	0,020	0,016	0,037	0,061
Z (m)	0,049	0,029	0,100	0,115
XYZ (m)	0,054	0,034	0,108	0,132
Image (pix)	0,338	0,335	0,687	0,701

Illustration 50: Erreurs de reprojection (moyennes absolues) des points de contrôle répartis sur la digue (cf CR Palliere-2013)

SUIVI D'ÉVOLUTION PONCTUEL :

Les références, implantées en 2013 puis relevées à nouveau pendant la semaine de l'acquisition, font apparaître un affaissement général de la digue :

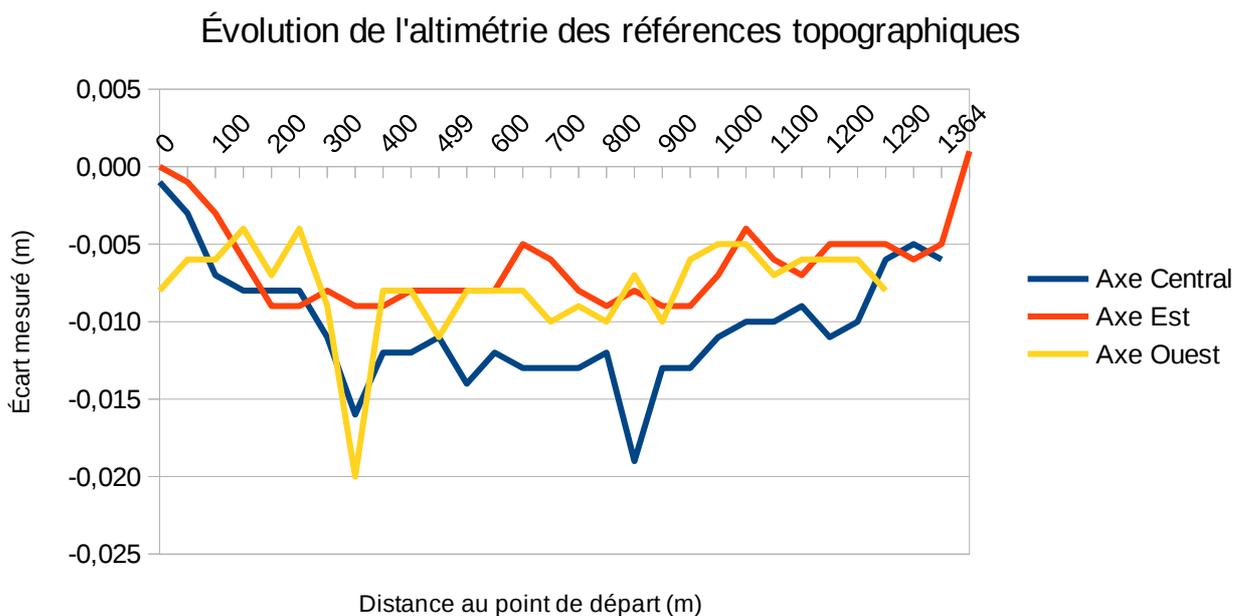


Illustration 51: Comparaison des altitudes mesurées en 2013 et 2014

On peut remarquer autour de 350 mètres qu'un affaissement plus important semble avoir eu lieu. Les références sur l'axe central nous donnent les écarts les plus importants, comme si la digue se contractait autour de son axe central.

Il est cependant compliqué de prévoir une intervention depuis ces résultats. Une analyse surfacique complète apporterait certainement à la qualité de l'analyse.

ROCHEMAURE-2014

Le jeu de données est composé de 872 images et de 26 références topographiques.

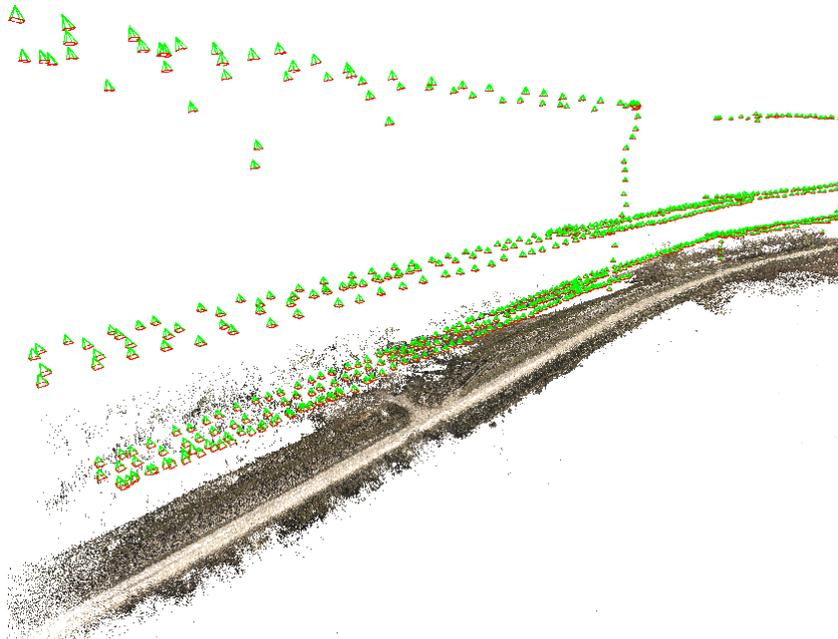


Illustration 52: Nuage de points homologues & caméras

Comme on peut le voir sur l'[Illustration 52](#) ci-dessus, le segment central du vol à une hauteur de 120m est manquant. Le télépilote étant seul sur le terrain, il n'a semble-t-il pas aperçu ce manque, et ne nous disposons pas d'images à cette hauteur sur une partie de la zone.

<i>Hauteur de vol</i>	30m	60m	120m	30 & 60m	30 & 120m	60 & 120m	30 & 60 & 120m
<i>Résidus en X</i>	0,031	0,031	0,027	0,036	0,030	0,030	0,031
<i>Résidus en Y</i>	0,082	0,084	0,083	0,074	0,085	0,085	0,084
<i>Résidus en Z</i>	0,106	0,110	0,110	0,101	0,111	0,112	0,110
<i>Résidus en XYZ</i>	0,138	0,142	0,140	0,131	0,143	0,144	0,142
<i>Résidus image</i>	0,437	0,527	0,414	0,698	0,686	0,593	0,757

Illustration 53: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points au sol (en relatif, sans adaptation, calculs effectués avec l'ancienne procédure)

Nous obtenons des résidus moyens à peu près équivalents quelles que soient les hauteurs de vol traitées.

Comme le montre le traitement des données ESGT, les phénomènes de dérives sont fonction du nombre d'images. En volant plus bas, nos images sont plus résolues, mais il en faut un nombre plus élevé. En volant 2 fois plus haut, nous avons besoin de 2 fois moins d'images, et sommes donc soumis à une dérive 2 fois moindre, ce qui compense la perte de résolution, mais permet d'accélérer les calculs.

Cela nous porte à penser qu'un plan de vol multiple n'est pas forcément un avantage. Il complique les manœuvres sur le terrain (relevé plus long, risque de défaillance plus élevé), et rend le calcul plus fastidieux (le temps de calcul dépend de façon exponentielle du nombre d'images).

Cette expérience nous amène à penser qu'un simple vol à 60m permet d'obtenir les mêmes précisions que le plan de vol plus complexe détaillé ci-dessus.

	Calcul classique	Calcul optimisé
X (m)	0,031	0,026
Y (m)	0,084	0,024
Z (m)	0,110	0,013
XYZ (m)	0,142	0,037
Image (pix)	0,527	0,412

Illustration 54: Résidus moyens absolus de la similitude (sans adaptation), en utilisant les images à 60m

ADAPTATION SUR 6 POINTS D'APPUI :

Mes6a.xml : 3a ; 3b ; 7a ; 7b ; 11a ; 11b

Mes6b.xml : 3b ; 5a ; 7b ; 9a ; 10b ; 12a

Mes6c.xml : 1a ; 1b ; 7a ; 7b ; 13a ; 13b

	6a	6b	6c
X (m)	0,012	0,020	0,014
Y (m)	0,043	0,030	0,029
Z (m)	0,028	0,023	0,054
XYZ (m)	0,053	0,043	0,063
Image (pix)	0,352	0,533	0,436

Illustration 55: Résidus moyens absolus de la similitude après adaptation sur 6 GCP

GÉNÉRATION DU MNS ET INTERPOLATION SUR LES POINTS DE CONTRÔLE :

Lors de la génération du MNS, un phénomène de régularisation permet d'éviter des sauts brusques d'un pixel à l'autre. Nos GCP mesurant seulement quelques pixels dans les images, et ceux-ci étant implantés 5 à 10 cm au dessus du niveau du sol, la régularisation entre en jeu et interprète ce changement altimétrique comme du bruit, restituant une altitude à la hauteur du terrain.

Les résultats de l'interpolation du MNT ne sont donc pas concluants ; il est inutile de les exposer ici. Le lecteur intéressé pourra néanmoins vérifier cela au paragraphe 3-C.

SUIVI D'ÉVOLUTION PONCTUEL :

Les références, implantées en 2013 puis relevées à nouveau pendant la semaine de l'acquisition, font apparaître les écarts suivants :

Écarts entre 2013 et 2014, axe Est

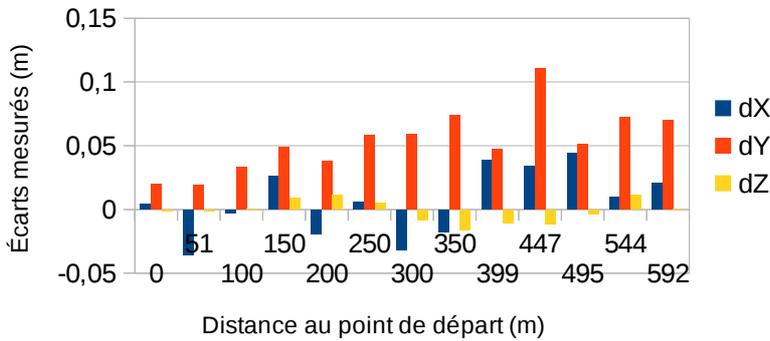


Illustration 56: Erreurs de reprojection des points de contrôle sur l'axe Est

Écarts entre 2013 et 2014, axe Ouest

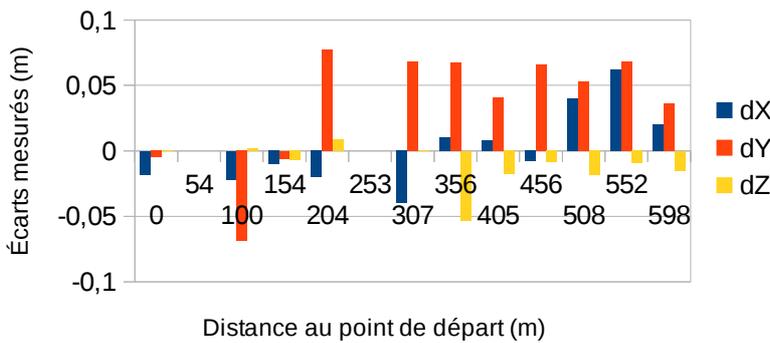
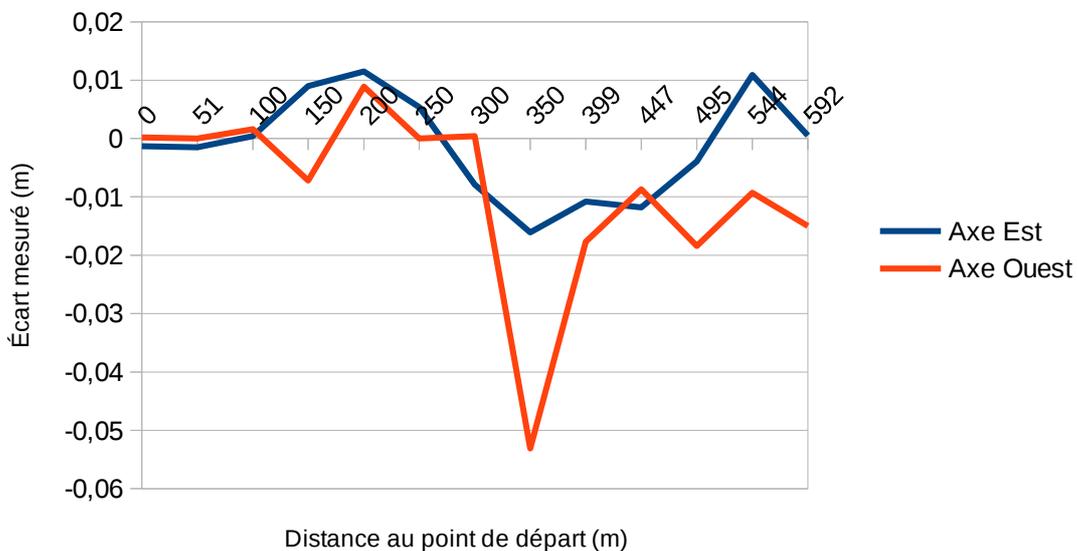


Illustration 57: Erreurs de reprojection des opints de contrôle sur l'axe Ouest

Évolution de l'altimétrie des références topographiques



Les écarts mesurés semblent ici très importants sur la composante planimétrique.

Nous sommes à peu près certain que les repères n'ont pas été déplacés (ancrage au sol solide), et avons toute confiance envers les compétences de la DRV Montélimar pour le relevé GPS-RTK de ces repères. Nous constatons donc ces écarts sans pouvoir y apporter d'explication autre qu'un mouvement avéré.

Un affaissement important semble avoir eu lieu 350m après le point de départ. Nous observons au contraire une sorte de gonflement (minime) de la digue aux extrémités.

AVIGNON-S1

Le jeu de données est composé de 359 images. Un axe central de 14 références a été implantée sur l'axe de la digue (50 m entre chaque référence). Une seconde et une troisième rangée ont ensuite été implantées parallèlement à la première, le long du Rhône et le long du contre-canal.



Illustration 58: Nuage de points homologues & caméras

	Calcul classique	Nouveau calcul
X (m)	0,014	0,006
Y (m)	0,021	0,004
Z (m)	0,194	0,022
XYZ (m)	0,196	0,023
Image (pix)	0,447	0,316

Illustration 59: Résidus moyen absolu de la similitude (sans adaptation)

Les résultats avec notre nouvelle procédure sont sans conteste de bien meilleure qualité.

ADAPTATION SUR LES GCP :

Plusieurs schémas d'implantation ont été envisagés, dont voici le détail :

Mes6a.xml : 5a ; 5c ; 8b ; 9b ; 12a ; 12c

Mes6b.xml : 3b ; 5b ; 7b ; 9b ; 11b ; 13b

Mes6c.xml : 4b ; 6b ; 8b ; 10b ; 12b ; 14b

Mes8.xml : 4a ; 4c ; 7a ; 7c ; 10a ; 10c ; 13a ; 13c

Mes12a.xml : 3b ; 4b ; 5b ; 6b ; 7b ; 8b ; 9b ; 10b ; 11b ; 12b ; 13b ; 14b

Mes12b.xml : 3b ; 4a ; 5c ; 6b ; 7a ; 8c ; 9b ; 10a ; 11c ; 12b ; 13a ; 14c

Mes12c.xml : 3c ; 4b ; 5a ; 6c ; 7b ; 8a ; 9c ; 10b ; 11a ; 12c ; 13b ; 14a

Mes12d.xml : 3a ; 4c ; 5b ; 6a ; 7c ; 8b ; 9a ; 10c ; 11b ; 12a ; 13c ; 14b

Mes12e.xml : 3b ; 4a ; 5b ; 6c ; 7b ; 8a ; 9b ; 10c ; 11b ; 12a ; 13b ; 14c

Mes12f.xml : 4a ; 4b ; 4c ; 7a ; 7b ; 7c ; 10a ; 10b ; 10c ; 13a ; 13b ; 13c

Mes12g.xml : 4a ; 4c ; 6a ; 6c ; 8a ; 8c 10a ; 10c ; 12a ; 12c ; 14a ; 14c

Mes12h.xml : 3a ; 3c ; 5a ; 5c ; 7a ; 7c ; 9a ; 9c ; 11a ; 11c ; 13a ; 13c

Mes12i.xml : 3a ; 3b ; 3c ; 7a ; 7b ; 7c ; 10a ; 10b ; 10c ; 14a ; 14b ; 14c

Mes18.xml : 3a ; 3c ; 4b ; 5a ; 5c ; 6b ; 7a ; 7c ; 8b ; 9a ; 9c ; 10b ; 11a ; 11c ; 12b ; 13a ; 13c ; 14b

	6a	6b	6c
X (m)	0,007	0,006	0,005
Y (m)	0,008	0,006	0,005
Z (m)	0,009	0,012	0,008
XYZ (m)	0,014	0,015	0,011
Image (pix)	0,315	0,314	0,315

Illustration 60: Erreurs de reprojection après compensation sur 6 points d'appui

	12a	12b	12c	12d	12e	12f	12g	12h	12i
X (m)	0,006	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004	0,005	0,006	0,005
Y (m)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006
Z (m)	0,042	0,023	0,016	0,015	0,021	0,020	0,017	0,011	0,140
XYZ (m)	0,043	0,024	0,018	0,017	0,022	0,021	0,019	0,014	0,016
Image (pix)	0,374	0,364	0,363	0,368	0,368	0,368	0,368	0,363	0,371

Illustration 61: Erreurs de reprojection après compensation sur 12 points d'appui

INTERPOLATION DU MNT :

	Moyenne des écarts (m)	Écart-type (m)
6a	0,012	0,016
6b	0,081	0,303
6c	0,024	0,064
8	-0,006	0,015

Illustration 62: Interpolation de l'altitude du MNT et comparaison aux mesures terrain

	Moyenne des écarts (m)	Écart-type (m)	Max
12a	0,007	0,027	0,061
12b	0,022	0,053	0,200
12c	0,010	0,040	0,130
12d	0,013	0,037	0,100
12e	0,036	0,066	0,247
12f	0,012	0,046	0,134
12g	0,013	0,041	0,137
12h	0,003	0,029	0,087
12i	-0,003	0,039	0,061

Illustration 63: Interpolation de l'altitude du MNT et comparaison aux mesures terrain

Le schéma d'implantation avec 8 points d'appui semble le plus optimal. Nous obtenons des résultats qui se rapprochent de nos attentes.

Le site étant couvert pour la première fois, nous ne sommes pas en mesure d'effectuer un suivi d'évolution. Nous pouvons cependant comparer nos résultats à ceux que nous avons obtenu via l'acquisition en scénario S2.

AVIGNON-S2

2 jeux de données ont été acquis sur la digue d'Avignon.

Le premier vol a été parcouru en volant le long de la digue (vent de face/dos). Il a permis d'acquérir 170 images

Le second vol a été effectué en évoluant perpendiculairement à la digue (vent de côté), permettant d'acquérir 188 images.

42 références ont été réparties sur 3 bandes parallèles, en comptant 50m entre chaque rang.

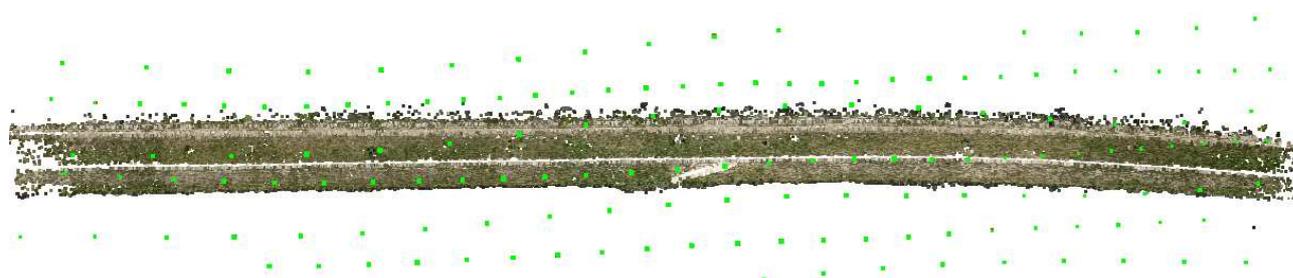


Illustration 64: Vol le long de la digue, points homologues & caméras

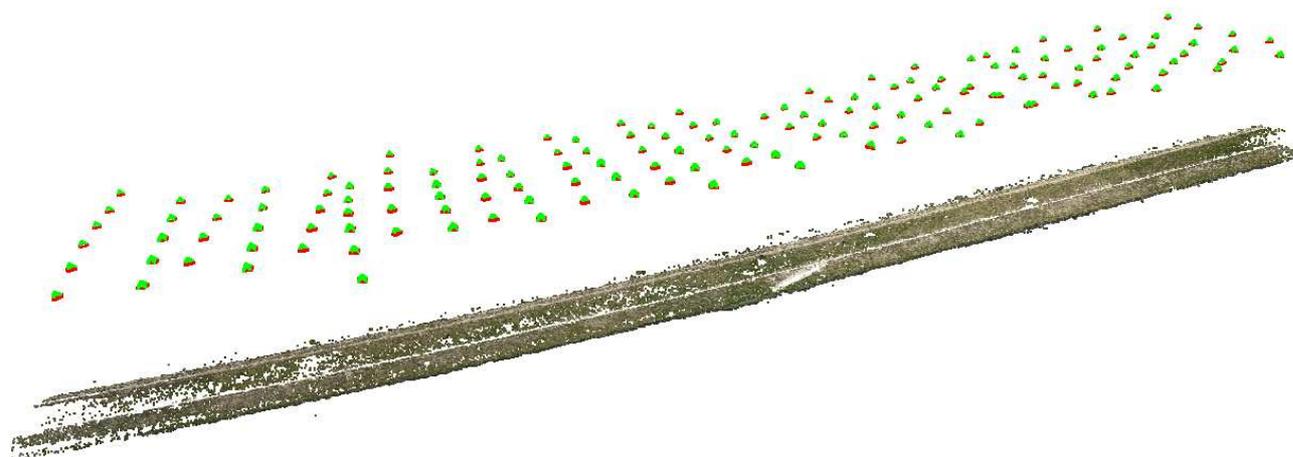


Illustration 65: Vol perpendiculaire à la digue, points homologues & caméras

Le traitement des images acquises avec une trajectoire longeant la digue (vent de face ou de dos), semble nous donner des résultats moins que sur le second jeu. L'influence du vent, qui est « moyenné » lorsqu'il est reçu de côté, se ressent sur la qualité des images. On observe plus de flou lorsque les images ont été acquises vent de dos (vitesse du drone > 100km/h).

Bien que l'acquisition soit un peu plus longue dans le second cas, il faut privilégier ce type de prise de vue avec les drones à voilure fixe. C'est faisable sur de petits linéaires, mais bien plus compliqué à mettre en place sur plusieurs kilomètres (ex : acquisitions S4).

Nous pouvons remarquer sur l'[Illustration 64](#) la position des caméras en vert. D'une ligne à l'autre, nous observons bien l'effet du vent (clichés plus ou moins rapprochés). Sur l'[Illustration 65](#) ci-dessous, le plan de vol est plus régulier, aboutissant à des clichés de meilleure qualité (moins de flou), et à un taux de recouvrement tel que nous l'avions fixé.

L'importance de notre nouvelle procédure de calcul est une nouvelles fois démontrée. L'adaptation ne semble même pas nécessaire. Deux points d'appui pourraient suffire à géoréférencer le système.

ADAPTATION SUR 6 GCP :

Mes6.xml : 4b ; 6b ; 8b ; 10b ; 12b ; 14b

Plan de vol	Avant adaptation			Après adaptation sur 6 points		
	X (m)	Y (m)	Z(m)	X (m)	Y (m)	Z(m)
Parallèle	0,014	0,022	0,012	0,008	0,007	0,005
Perpendiculaire	0,014	0,007	0,010	0,009	0,003	0,006

Illustration 66: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points d'appui

	Vol en travers		Vol en long	
	Calcul classique	Calcul optimisé	Calcul classique	Calcul optimisé
X (m)	0,057	0,014	0,465	0,014
Y (m)	0,151	0,007	0,023	0,022
Z (m)	1,324	0,010	0,115	0,012
XYZ (m)	1,333	0,019	0,480	0,029

Illustration 67: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points d'appui (sans adaptation)

GÉNÉRATION D'UN MNS ET INTERPOLATION SUR LES POINTS DE CONTRÔLE :

La régularisation du MNS ne semble pas entrer ici en jeu, du fait de pixels plus grands. Nous pouvons créer et interpoler un MNS afin d'évaluer la précision du modèle.

38 points de contrôle permettent d'évaluer la précision en interpolant le MNS généré à partir de l'adaptation sur ces points. Le plan de vol en travers fait apparaître les écarts suivant :

- écart moyen : -7 mm
- écart-type : 26 mm

Ces résultats semblent garantir une précision à 2 sigma de l'ordre de la taille des pixels terrain. Ils confirment également que le système peut être utilisé pour le besoin d'acquisition exceptionnel (scénario de crise), avec relativement peu de points au sol.

AVIGNON-S4

Le jeu de données est composé d'environ 1600 images et de 229 références topographiques. Il a été convenu lors du comité de suivi #4, que le traitement des images acquises avec le DT18 serait amené à être effectué au cours d'un projet des étudiants de l'ENSG.

RÉSULTATS : SYNTHÈSE

Chantier	Résidus moyens absolus						
	Avant adaptation			Après adaptation sur 6 points			Progression
	X (m)	Y (m)	Z(m)	X (m)	Y (m)	Z(m)	XYZ (m)
2013 La Pallière S1	Calcul en cours			Calcul en cours			#VALUE!
2013 Rochemaure S1	0,011	0,039	0,025	0,023	0,031	0,053	-37,71%
2014 La Pallière S1 – Partie 1	0,010	0,020	0,049	0,010	0,009	0,038	24,62%
2014 La Pallière S1 – Partie 2	0,020	0,061	0,115	0,015	0,014	0,090	30,32%
2014 Rochemaure S1	0,026	0,024	0,013	0,020	0,030	0,023	-14,56%
2014 Avignon S1	0,006	0,004	0,022	0,005	0,005	0,008	53,96%
2014 Avignon S2_long	0,014	0,022	0,012	0,008	0,007	0,005	61,19%
2014 Avignon S2_travers	0,014	0,007	0,010	0,009	0,003	0,006	39,55%

Illustration 68: Résidus de la similitude entre Orientations relatives/adaptées et mesures images (tous les points)

Les résultats de la figure ci-dessus nous amènent à penser que la nouvelle procédure de calcul d'aérotriangulation, couplée au modèle de calibration mis au point par Marc, nous permettent d'obtenir des résidus moyens de l'ordre de la précision de nos points d'appui (en XY).

Certains résultats sont assez bons pour les utiliser sans adaptation sur les GCP. Au contraire, celle-ci (appliquée sur peu de points) semble dégrader nos résultats sur Rochemaure. L'adaptation semble toutefois nécessaire pour d'autres chantiers (ex : La Pallière), notamment pour corriger les dérives altimétriques.

Les résultats de l'interpolation du MNT sur les points de contrôle ne sont pas concluants. Les GCP sont implantés quelques centimètres au-dessus du sol, et ne mesurent que quelques pixels dans l'image. Lors de la mise en correspondance, un principe de régularisation entre en jeu pour éviter les sauts altimétriques trop brusques. MicMac permet de garder le contrôle sur ce paramètre, mais cela peut amener à d'autres types d'erreurs.

Un nouveau protocole de prise de points au sol semble nécessaire. Il sera très probablement mis en place pour les prochaines acquisitions de novembre 2014.

CONCLUSION

Nous avons pu mettre en application trois scénarios de vol. Nous avons vu que le scénario S1 permet d'acquérir des images de très bonne qualité, contrairement aux systèmes clé-en-main qui évoluent en scénario S2 et S4 dont nous avons été déçu par le rendu.

Le système Gatewing X100 nous a permis d'acquérir en quelques heures 2 jeux de données, avec des pixels terrain de 4 à 5 cm. Les conditions d'opérabilité complexifient parfois leur utilisation. Les VTOL (*Vertical Take Off and Landing*) pourraient représenter une solution intermédiaire, autorisant les atterrissages sur digue, et donc facilitant leur exploitation dans des scénarios exceptionnels, tout en leur conférant une bonne autonomie.

Nous avons pu convertir les images en un modèle 3d d'une précision variant d'environ 5cm à deux sigma. Le système est donc opérationnel pour répondre au besoin d'auscultation exceptionnel (scénario de crise). Cependant, il ne répond pas aux attentes pour le besoin d'un suivi régulier (précision recherchée de 1cm).

Pour les travaux d'auscultation métrologique, il semble préférable de privilégier des systèmes offrant une meilleure qualité d'image. Nos travaux ont permis de montrer qu'il est possible d'obtenir une aérotriangulation de précision centimétrique.

Lors de la création du MNS, le phénomène de régularisation (permettant de réduire le bruit dans un modèle) entre en jeu et détériore la qualité de notre interpolation (on interpole alors le terrain au lieu d'interpoler la référence).

Nous réfléchissons donc à un nouveau protocole pour l'implantation et le relevé de points au sol, avec en point de mire les prochaines acquisitions de novembre 2015.

En outre, les comparaisons que nous avons pu effectuer entre les données acquises en 2013 et celles acquises en 2014, montrent l'intérêt des modèles surfaciques face aux mesures ponctuelles. Ils permettent d'analyser l'évolution d'un ouvrage dans sa globalité, apportant de l'information et une précision inatteignable avec les méthodes traditionnelles. Il faut cependant prendre garde à la nature vivante des digues. La végétation est le principal facteur de fausse-détection.

ANNEXE 7

RAPPORT DE MISSION : PALLIERE-2014

Rédacteurs : V.Tournadre - P.H. Faure

Date/lieu : les 15 et 16 septembre 2014 sur le site de La Pallière

Participants IGN- ENSG : Vincent Tournadre – Julien L'Harridon

Participants CNR : DR Belley

INTRODUCTION

Dans le cadre de la thèse en *métrologie par photogrammétrie aéroportée légère appliquée au suivi de digues*, une mission de relevé a été programmée du 3 au 5 septembre 2014.

Suite aux avancées algorithmiques nous permettant désormais d'atteindre une précision centimétrique sur le calcul des orientations, en utilisant uniquement 6 points d'appui. Nous recherchons désormais de nouvelles méthodes pour estimer la qualité des modèles 3d générés.

Les nuages de points que nous produisons contiennent plusieurs centaines de millions de points en pleine résolution. Les méthodes actuelles, proposant de se baser sur quelques points de contrôle ne nous semblent pas forcément les plus pertinentes. D'une part, nous courrons le risque que nos points de contrôle ne soient pas représentatifs de l'ensemble. Et d'autre part, les méthodes de création du MNT font intervenir un phénomène de régulation, permettant de réduire le bruit d'un modèle, mais pouvant perturber nos mesures de contrôle. Nos calculs devenant également de plus en plus précis, nous avons besoin de mesures de contrôle de plus en plus précises.

L'objet de cette mission est d'ajouter, en complément d'un réseau de 30 points de contrôle, des zones sur lesquelles nous allons produire des MNT de précision millimétriques. Ces zones, au nombre de 10 et réparties le long de la digue, vont être relevées par scan laser ainsi que par photogrammétrie terrestre.

Aussi, suite à l'impossibilité d'ajouter des images obliques lors des missions d'avril 2014 (défaillance technique du drone), cette mission a pour but d'étudier l'intérêt de cette méthode.

Enfin, afin d'estimer la répétabilité de notre méthode, deux prises de vue indépendantes vont être conduites dans la même journée. L'intérêt va être de comparer les modèles d'orientations internes ainsi créés, et d'estimer la dispersion de nos mesures. En corrélant ces résultats avec notre nouvelle méthode de contrôle, nous montrerons quelles précisions nous pouvons atteindre sur une portion de digue de 600m.

EMPRISE DU RELEVÉ

Le site de La Pallière a été sélectionné de par la facilité à y opérer des drones. Le plan de vol est très similaire à ceux couverts en février 2013 (L'Avion Jaune) et avril 2014 (IGN). Il a été simplifié à une zone de 600m (zones de 2 à 4), au lieu des 1200 (zones 1 à 6) couverts au préalable, afin de faciliter la prise de vue d'images obliques.

Pour chaque prise de vue (nadir et oblique), les 600m ont été couverts en 3 vols de 200m (réglementation du scénario S1), pour lesquels les images ont été prises afin d'assurer un recouvrement minimale de 80 %, et cela sur deux axes.

Ce sont donc 6 vols qui ont été couverts deux fois (test de répétabilité), soient 12 vols. Un des axes (version 1, images obliques, axe retour de la zone 4) n'a pas pu être enregistré par défaillance du système embarqué.

DÉROULEMENT CHRONOLOGIQUE

Cette intervention faisant intervenir beaucoup de nouveautés, elle a mobilisé

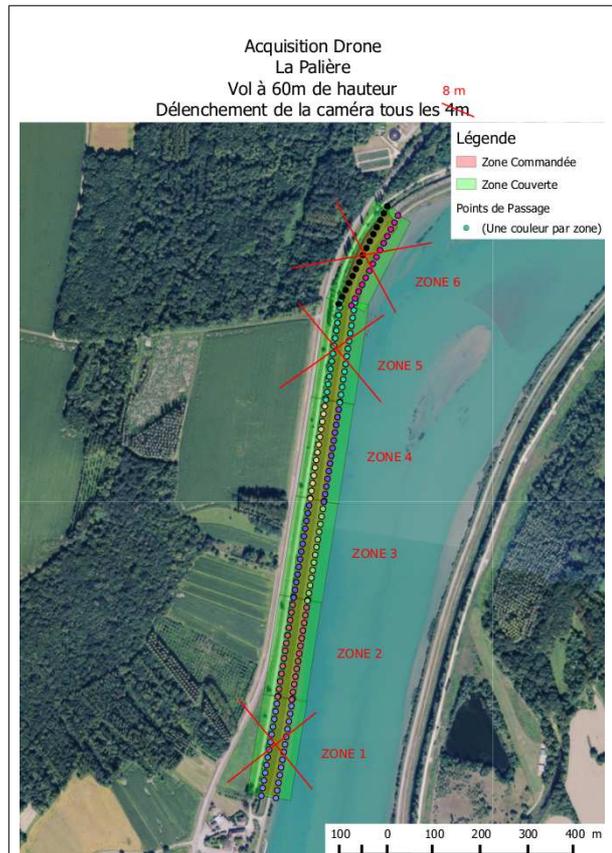


Illustration 69: Plan de vol images nadir

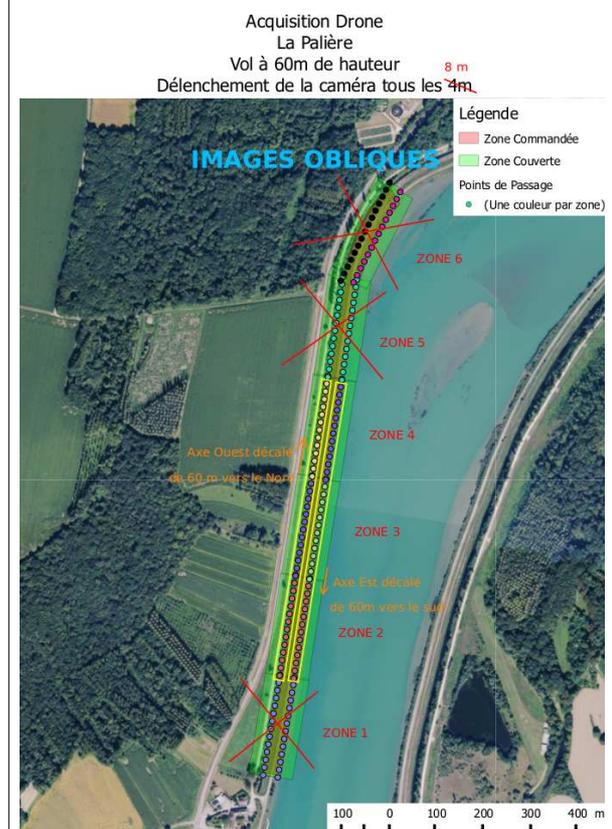


Illustration 70: Plan de vol images obliques

beaucoup de personnel aussi bien côté CNR que côté IGN. Le mercredi 03/09, 1 opérateurs topographe CNR (Rémy Delachaussée) et un apprenti (Matthieu Petelet) ont été mobilisés aux côtés du doctorant (Vincent Tournadre), pour assurer le nivellement des repères implantés dès 2013.

Le lendemain, s'y ajoutaient 1 chercheur IGN (Marc Pierrot-Deseilligny) pour la photogrammétrie terrestre, 2 ingénieurs CNR (Paul Henri Faure, Marie-Odile ... ?) pour assurer le rattachement polygonal et le scan laser, ainsi que 2 ingénieurs IGN (Julien L'Harridon, télépilote, et Louise Hours, télépilote en formation).

	Mercredi 03/09	Jeudi 04/09			Vendredi 05/09	
08:00		Mise en place des zones de contrôle				
08:30	Nivellement des points d'appuis	Nivellement des zones de contrôle	Scan, GPS et polygo	Photogrammétrie zones de contrôle	Mise en place du drone	Scan et polygo
09:00						
09:30						
10:00						
10:30						
11:00						GPS RTK
11:30						Nettoyage du site
12:00						
12:30						
13:00						
13:30	Nivellement des points d'appuis	Nivellement des zones de contrôle	Scan, GPS et polygo		Couverture du site par drone	
14:00						
14:30						
15:00						
15:30						
16:00						GPS RTK
16:30						
17:00						
17:30						
18:00						
18:30						

1 personne (vert)

2 personnes (bleu)

3 personnes (jaune)

Illustration 71: Déroulement chronologique de la mission

Il y a donc eu jusqu'à 2 chercheurs, 4 ingénieurs, et 2 topographes pour cette mission. Il aurait été possible de coupler le nivellement des points d'appui avec celui des zones de contrôle, et de coupler la photogrammétrie et le scan laser, qui peuvent être effectués dans le même temps. Le nivellement peut être assuré par des techniciens, quant à la réalisation des MNT terrestres, il nécessite la présence d'un ingénieur et d'un technicien.



Illustration 72: Une tonte du site a été réalisée la veille de l'arrivée du drone

Les vols drone effectué jusqu'ici en scénario S1 pourraient prochainement être effectué en scénario S2, permettant de couvrir jusqu'à 2000m de digues en un seul vol. Dans l'absolu, il serait possible de réaliser un tel vol en près de 30 minutes, alors qu'il faudrait risquer 10 atterrissages/décollage en scénario S1. Un télépilote unique peut très bien effectuer la tâche seul.

REPÈRES TOPOGRAPHIQUES

Les points au sol ont été relevés de trois manières :

- les points installés en 2013 (bornes rouges de géomètre) ont été relevés en XY par rattachement polygonal (centrage forcé)
- ces mêmes points ont été nivelés pour obtenir une bonne détermination du Z (cheminement aller-retour points mesurés deux fois ; écart moyen de entre deux déterminations inférieur au millimètre, écart maximum de 3mm)
- les autres points présents sur le site ont été relevés par GPS RTK (précision de quelques centimètres)

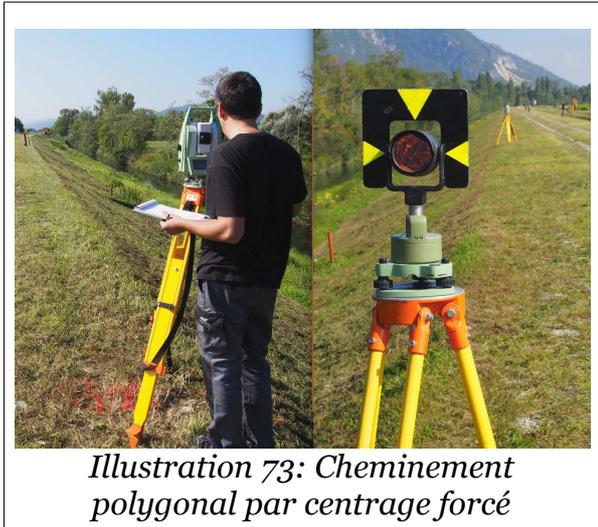


Illustration 73: Cheminement polygonal par centrage forcé



Illustration 74: Rattachement altimétrique des repères topographiques

ZONES DE CONTRÔLE

Dix zones de contrôle ont été installées sur le chantier. 8 sont réparties le long de

la digue, sur la route qui la surplombe. 2 autres ont été placées de l'autre côté du contre-canal. Ce sont des carrés d'environ 2 mètres de côté, matérialisés par 5 cibles (4 aux coins, et une centrale pour estimer la qualité de la photogrammétrie terrestre)



Illustration 75: Installation et relevé (photogrammétrie terrestre et scan laser) des zones de contrôle

IMAGES ACQUISES

	Version 1		Version 2	
	Images nadir	Images obliques	Images nadir	Images obliques
Nombre d'images	309	303	298	324
Nombre d'axes	6	5	6	6

Illustration 76: Distribution des jeux de données

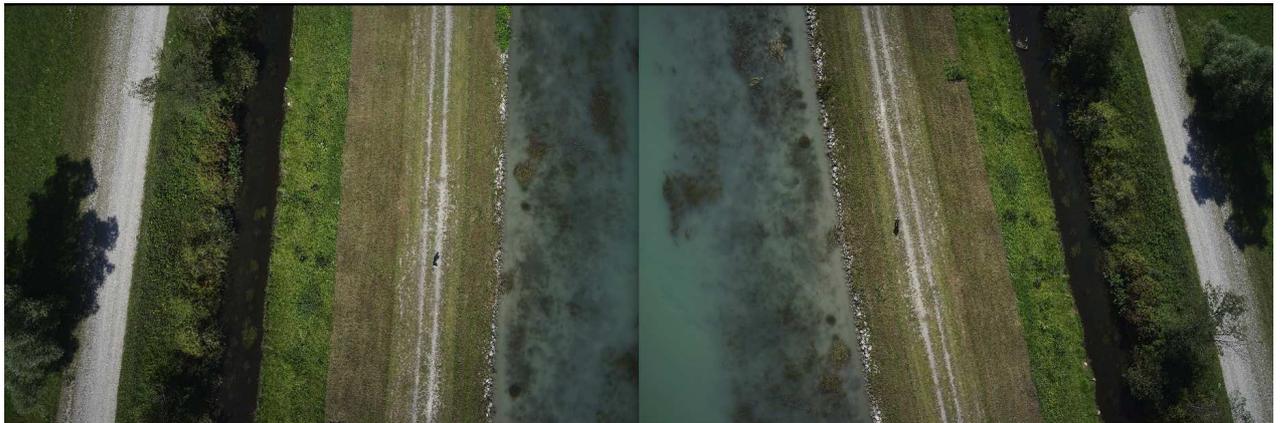


Illustration 77: Échantillon d'image nadir : bande aller (à gauche) et bande retour (à droite)

Les images sont globalement de qualité satisfaisante. On notera que la légère inclinaison du drone (qui lui permet d'avancer) induit une inclinaison de l'axe de prise de vue, résultant en de très légers changements radiométriques (images

verticales).

La résolution des images obliques est logiquement plus faible dans le haut de l'image, mais reste très correcte. L'inclinaison moyenne de l'axe de prise de vue est d'environ 45°.

Concernant le second vol, il a été effectué le jour même et non le lendemain comme convenu. On notera qu'à l'heure tardive à laquelle il a été commencé (de 16h à 18h30), nous pouvons observer le déplacement d'ombres portées sur le terrain (végétation, talus,...). D'un point de vue opérationnel, il est intéressant d'étudier s'il y a un intérêt à vouloir travailler dans les heures pendant lesquelles les ombres portées sont moindres, ou si les algorithmes utilisés le long du calcul permettent de s'affranchir de cela.

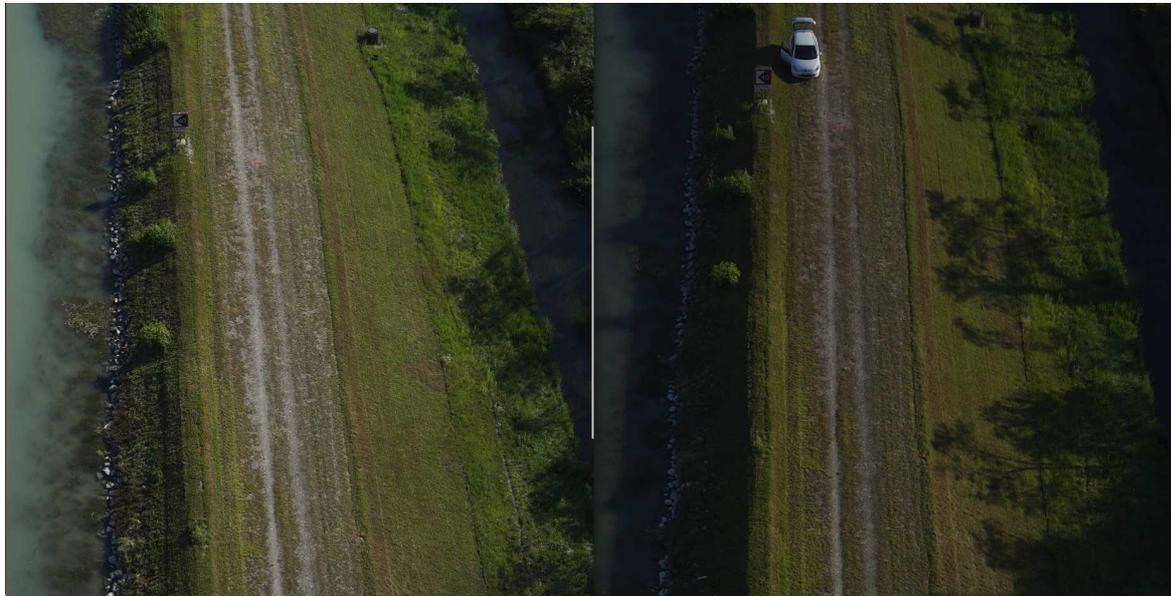


Illustration 78: Déplacement des ombres, changement de luminosité, apparition d'objets mobiles,... entre deux prises de vue en fin de journée



Illustration 79: Exemple de surexposition constaté

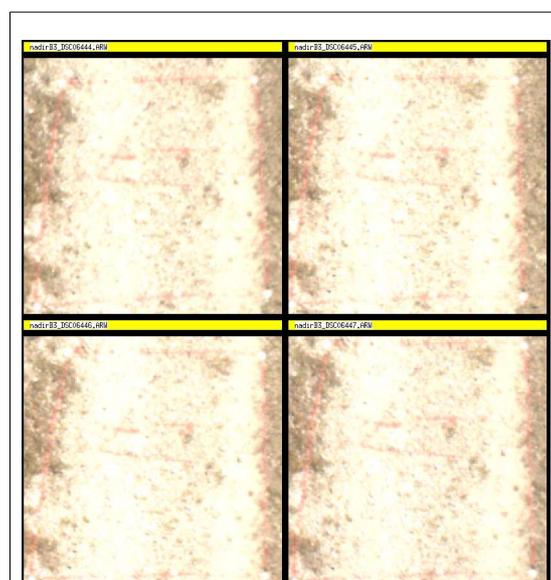


Illustration 80: Échantillons de zones de contrôle surexposées

Le climat étant alternativement découvert la matinée, puis bien ensoleillé par la suite, on remarquera la présence de zones surexposées dans certaines images. Cela est dérangeant car les zones surexposées sont les zones les plus stables (routes). Une partie de l'opération visant à évaluer la répétabilité de notre méthode, ces surexpositions sont une contrainte.

Plus dérangeant, certaines zones de contrôles, sur lesquelles nous prévoyons d'évaluer la qualité du MNT, sont elles aussi surexposées.

Pour de prochaines acquisitions, l'équipe qui gère l'acquisition des images devra être particulièrement vigilante aux conditions de prise de vue.

TRAITEMENT DES DONNÉES

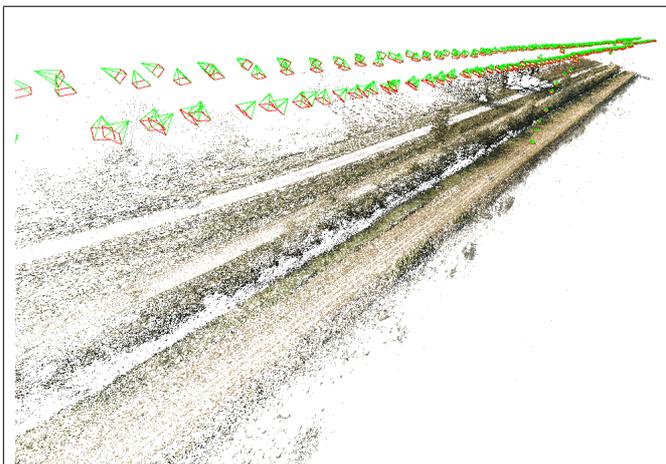


Illustration 81: Nuage de points épars, images obliques et nadir

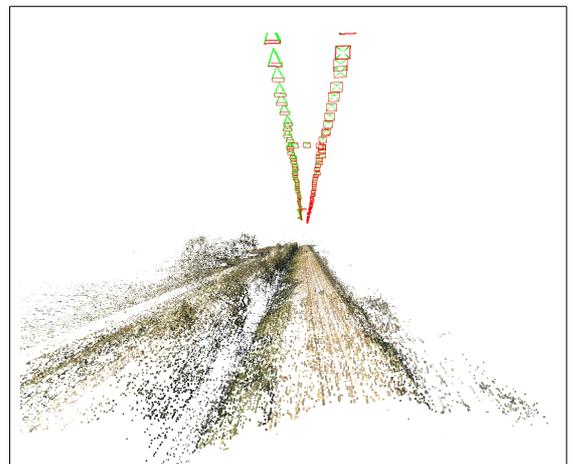


Illustration 82: Nuage de points épars, images obliques

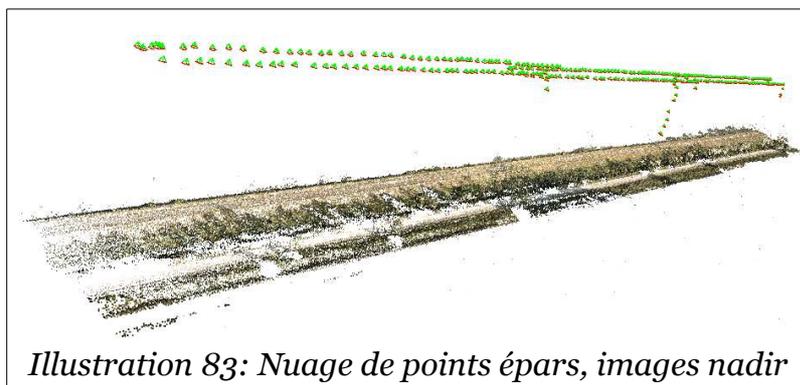


Illustration 83: Nuage de points épars, images nadir

JEU DE DONNÉES #1 : CALCUL D'AÉROTRIANGULATION

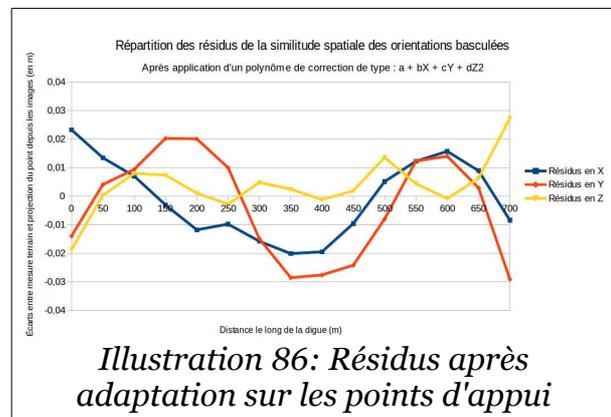
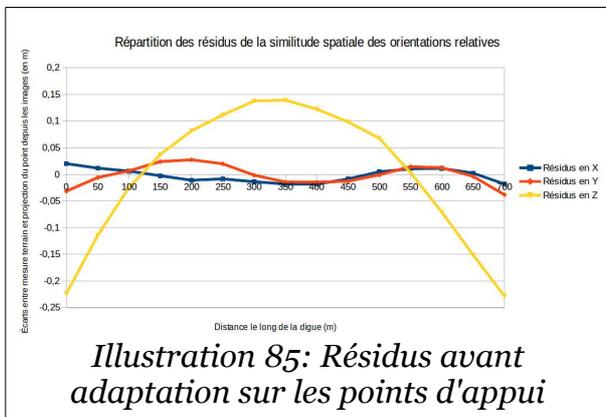
Les images verticales nous donnent des résidus élevés. On constate une dérive sur l'axe Z, mais aussi sur l'axe Y. L'ajustement de cette dérive par un polynôme $a + bX + cY + dX^2$ nous donne de meilleurs résultats que l'outil Campari.

Les images obliques nous donnent des résidus bien meilleurs qu'en utilisant uniquement les images nadir. L'utilisation de Campari permet d'améliorer quelque peu ces résultats, mais ils restent tout de même décevants.

	Images	Verticales	Obliques	Vert. + Obliques
Sans adaptation	EMA (X)	0,039	0,034	0,012
	EMA (Y)	0,118	0,047	0,014
	EMA (Z)	0,185	0,043	0,103
	EMA (XYZ)	0,248	0,080	0,107
Campari	EMA (X)	0,039	0,029	0,009
	EMA (Y)	0,085	0,042	0,011
	EMA (Z)	0,173	0,030	0,020
	EMA (XYZ)	0,211	0,068	0,027
Ajustement NLD	Polynôme NLDegZ	[1,X,Y,X2]	[1,X,Y,X2]	[1,X,Y,X2]
	EMA (X)	0,035	0,034	0,011
	EMA (Y)	0,115	0,042	0,016
	EMA (Z)	0,138	0,035	0,010
	EMA (XYZ)	0,199	0,072	0,024

Illustration 84: Écart moyen absolu des résidus de la similitude spatiale sur les GCP (valeurs en mètres)

La combinaison d'images verticales et oblique nous permet d'obtenir un EMA centimétrique en planimétrie, avec une dérive parabolique sur l'axe Z. Cet écart est plus important que lorsque



nous avons utilisé uniquement les images obliques, mais il est mieux contrôlé. Polynôme de correction utilisé : $a + bX + cY + dX^2$. Nous parvenons ainsi à un écart moyen absolu d'un centimètre sur les altitudes en utilisant 6 points d'appui.

JEU DE DONNÉES #2 : CALCUL D'AÉROTRIANGULATION

En utilisant exactement le même pipeline, le second jeu d'images nous donne des résultats plus décevants. Ici, l'ajout d'images obliques permet d'améliorer la précision sur les altitudes (avant adaptation sur les GCP), au prix d'une dérive plus forte sur l'axe X.

L'utilisation des images obliques seules donne de meilleurs résultats que lorsqu'elles sont combinées à des images nadir. L'heure tardive à laquelle les vols ont été effectués et le mouvement au sol des ombres portées pourrait expliquer cette dégradation.

L'outil d'ajustement NLD permet d'obtenir un EMA centimétriques pour les images obliques et verticales+obliques. Cependant, les imprécisions sur l'axe Y ne semblent pas suivre un polynome. Elles ne sont donc pas bien prises en compte à

travers ce processus, ce qui conduit à des résultats moins bons que lors de l'utilisation de Campari.

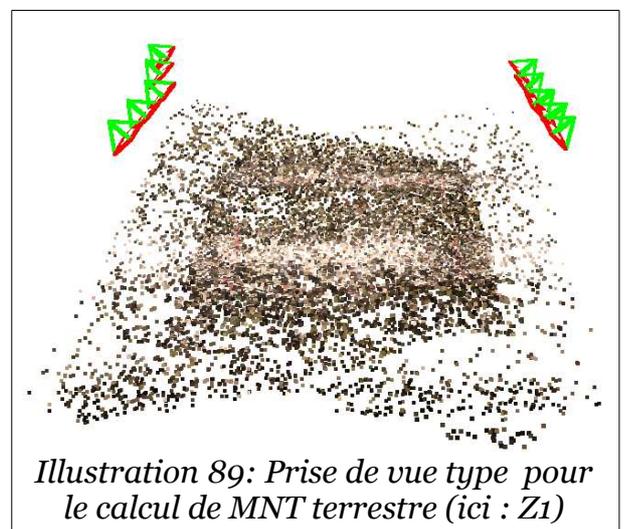
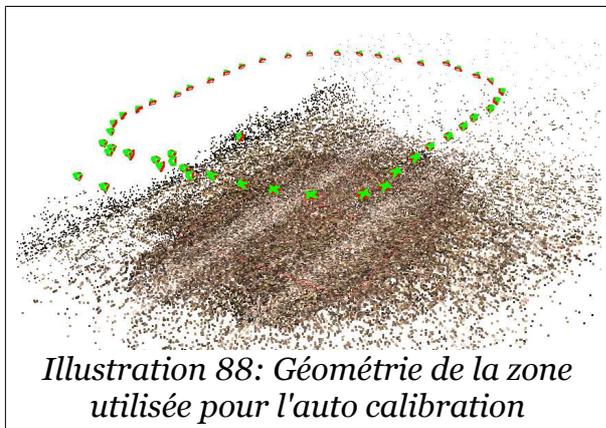
	Images	Verticales	Obliques	Vert. + Obliques
Sans adaptation	EMA (X)	0,016	0,031	0,040
	EMA (Y)	0,140	0,134	0,134
	EMA (Z)	0,059	0,031	0,026
	EMA (XYZ)	0,158	0,153	0,151
Campari	EMA (X)	0,009	0,026	0,028
	EMA (Y)	0,016	0,014	0,019
	EMA (Z)	0,027	0,008	0,015
	EMA (XYZ)	0,037	0,036	0,043
Ajustement NLD	Polynôme NLDegZ	[1,X,X2]	[1,X,Y,X2]	[1,X,Y,X2]
	EMA (X)	0,030	0,008	0,027
	EMA (Y)	0,166	0,110	0,124
	EMA (Z)	0,037	0,011	0,010
	EMA (XYZ)	0,182	0,112	0,131

Illustration 87: Ecart moyen absolu des résidus de la similitude spatiale sur les GCP

Les images obliques permettent donc une meilleure détermination des orientations internes et externes. La profondeur de champ créée par l'inclinaison de l'axe de vol permet une meilleure détermination des inconnus, et donc de meilleures précisions. Cependant, ces images ont un certain coût, puisqu'elles nécessitent des vols adaptés, requièrent un peu de temps sur le terrain, et ajoute de nouvelles données augmentant ainsi les temps de calcul.

Nous avons voulu savoir si une seule bande d'images obliques centrales peut être suffisant pour rencontrer nos objectifs. Les images obliques traitées seules nous donnant de meilleurs résultats que les images nadirs, nous avons aussi voulu vérifier l'inverse (toutes les images obliques, et quelques images nadir).

CALCUL DES MNT DE CONTRÔLE : PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE



Nous recherchons à obtenir un des MNT permettant de valider nos résultats. Il faut donc qu'ils soient d'une précision meilleure que celle que l'on recherche, c'est à dire meilleure que le centimètre.

Sur chaque zone, de 4 à 8 images terrestres ont été prises depuis deux points de vue. La zone Z4 a été utilisée pour effectuer la calibration de l'ensemble boîtier + optique (Canon EOS Mark II + Canon EF 24mm F/2.8), pour laquelle 51 images ont été acquises à 260° autour de la scène. Une fois un modèle de calibration déterminé, celui-ci a été figé pour le calcul des orientations externes des 9 autres zones.

Zone	Nombre		EMA (sans adaptation)		
	d'images	de GCP	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Z1	10	5	0,5	0,4	0,3
Z2	14	5	0,3	0,3	0,4
Z3	14	5	0,4	0,2	0,3
Z4	51	5	0,4	0,3	0,5
Z5	10	5	0,2	0,4	0,7
Z6	11	5	0,4	0,7	0,3
Z7	10	5	0,4	0,7	0,4
Z8	11	5	2,5	0,8	0,3
Z9	16	4	0,9	0,8	1,5
Z10	15	4	0,3	0,4	0,1

Illustration 91: Calcul des MNT terrestres

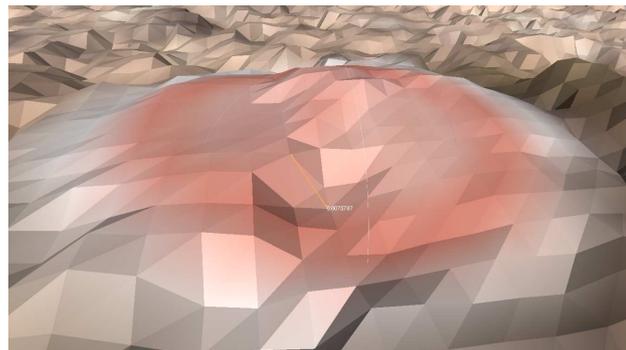


Illustration 90: Maillage reconstitué sur un GCP

Les résidus d'aérottriangulation sont largement convenables puisqu'on atteint une précision millimétrique. L'adaptation sur les points d'appui (outil Campari) n'est pas nécessaire. Les MNT ainsi produit ont une résolution moyenne de 0,5mm à pleine échelle, ce qui représente environ 4 millions de points par m². En enlevant les défauts de corrélation trop importants pour garder une précision convenable, on parvient à une moyenne de 3 millions de points par m².

Les MNT ainsi créés semblent visuellement correct. En zoomant sur un point au sol (cibles plates), on aperçoit la présence de bruit. Celui-ci semble être de quelques millimètres. Une comparaison avec le relevé par Scan laser permettra d'avoir un indicateur clair sur la précision de la méthode.

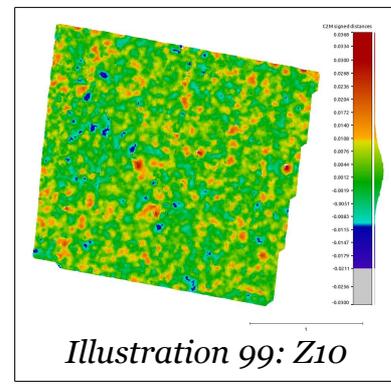
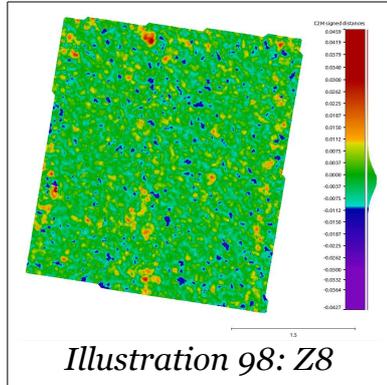
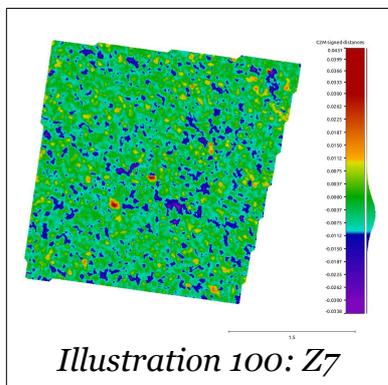
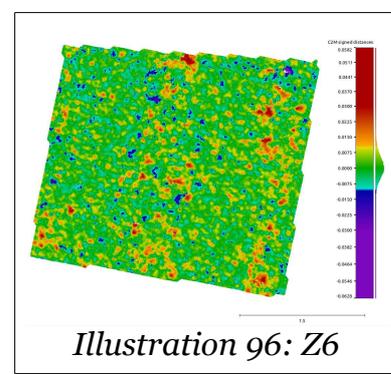
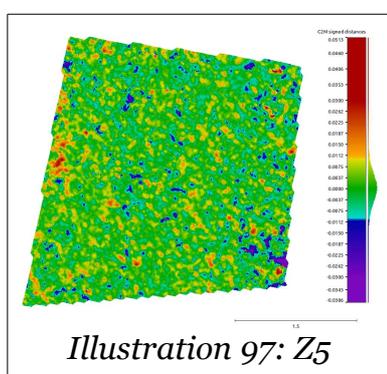
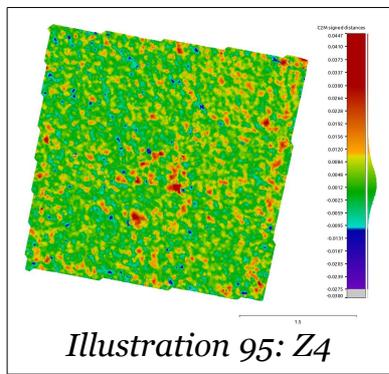
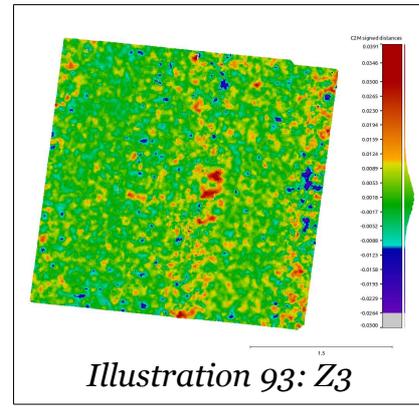
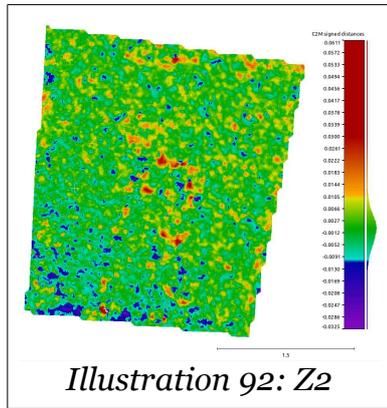
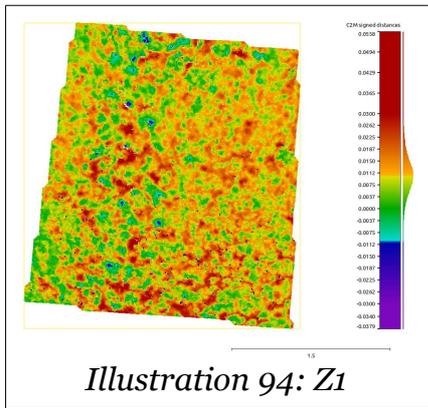
PRÉCISION DES MODÈLES 3D GÉNÉRÉS

Nous pouvons maintenant estimer la qualité de nos modèles 3D générés à partir des images drone, en comparant le nuage de point résultant aux MNT établis par photogrammétrie terrestre.

Les MNT terrestres ont été générés en s'arrêtant à l'étape 7 (DeZoom 1), mais en appliquant un facteur d'échelle de 10 (temps de calcul plus rapide, précision équivalente).

À partir des images drone, nous avons généré autour de chaque placette un MNT en pleine résolution (Etape 9, DeZoom 1). Les nuages de point ont ainsi une résolution d'1cm. Sur une placette de 4 m², cela représente 40 000 points, ce qui

représente un bon échantillon pour estimer la précision de nos résultats.



Zone	Écart moyen (mm)	Sigma (mm)	Nombre de mesures
Z1	10,6	7,0	48 959
Z2	-0,1	6,3	63 359
Z3	2,2	5,6	62 793
Z4	2,8	5,8	78 539
Z5	0,2	6,2	72 423
Z6	1,1	6,6	66 057
Z7	-4,7	5,4	66 567
Z8	-1,7	5,0	78 379
Z9	-24,2	6,8	32 767
Z10	2,8	5,3	33 869

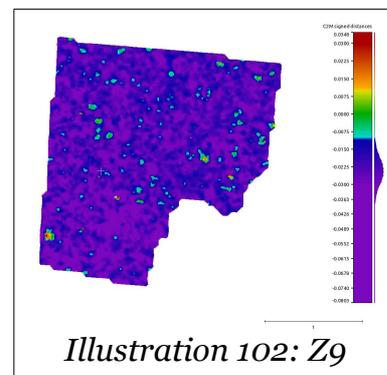


Illustration 101: Écarts mesurés sur chaque zone

Si on exclut les zones 9 et 10 (en dehors de la zone définie), on obtient les indicateurs moyens suivants :

- précision à 1 sigma : 9 mm
- précision à 2 sigma : 15 mm
- précision à 3 sigma : 21 mm

Zone	Précision (en mm)		
	à 1 σ	à 2 σ	à 3 σ
Z1	18	25	32
Z2	6	13	19
Z3	9	14	20
Z4	9	14	20
Z5	6	13	19
Z6	8	14	21
Z7	10	16	21
Z8	7	12	17
Z9	31	38	45
Z10	8	13	19

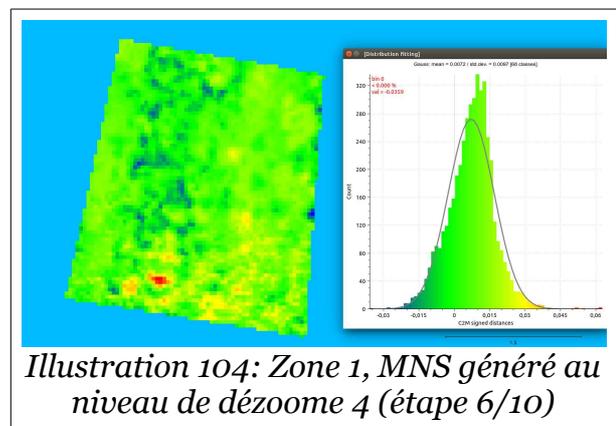
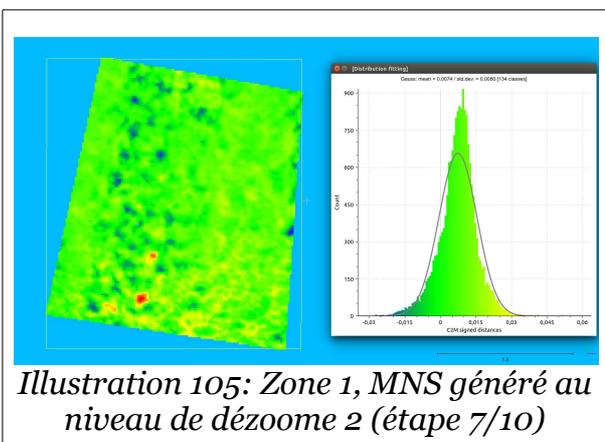
Certaines zones, telles Z1 et Z9 présente des écarts qui se démarquent par un écart moyen élevé. A priori, les MNT terrestres sont précis à quelques millimètres. Une comparaison avec les résultats du scan laser permettra de lever l’ambiguïté quant à la source de cette erreur.

Illustration 103: Précision du modèle sur chacune des zones de contrôle

RÉDUCTION DU VOLUME DE DONNÉES

À pleine résolution, les MNT générés à partir des images drones permettent de produire des nuages de plusieurs dizaines/centaines de millions de points. Cette résolution extrême ne présente que peu d'intérêt, puisqu'on va surtout chercher à détecter des changements sur des zones de quelques m², et non à contrôler chaque cm² de la digue.

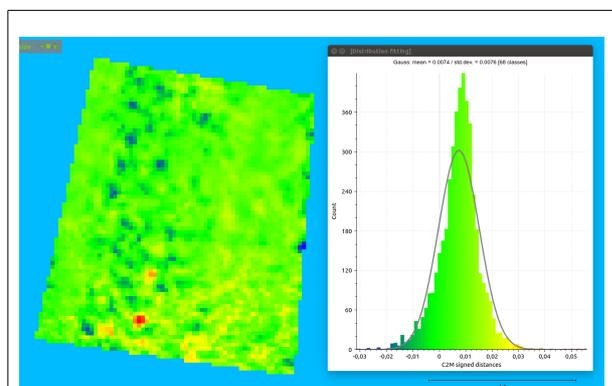
Nous nous proposons ici d'estimer jusqu'à quel facteur d'échelle une diminution du MNT terrestre reste tolérable pour détecter les mouvement que l'on recherche. En appliquant un facteur de réduction au MNT de 10, nous parvenons sur la zone Z1 à transformer une nuage 22 millions de points en un fichier de 220 000 points, soit environ 30000pts/m², ce qui est largement suffisant pour comparer les MNT.



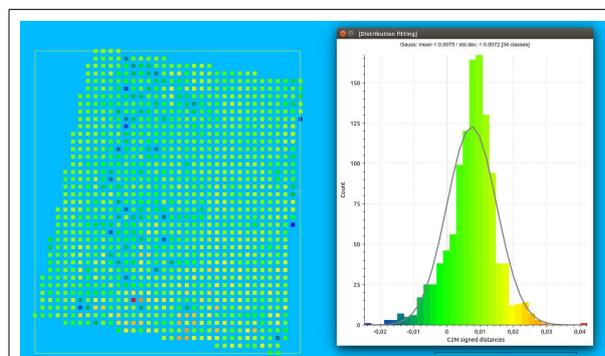
À partir du niveau de dézoom 5, on commence à mesurer des déformations qui n'ont pas lieu d'être. Ce niveau de dézoom n'est pas satisfaisant. Le niveau de dézoom 6 peut permettre de fournir un bon compromis entre précision légèrement

dégradée, mais temps de calcul beaucoup plus faibles.

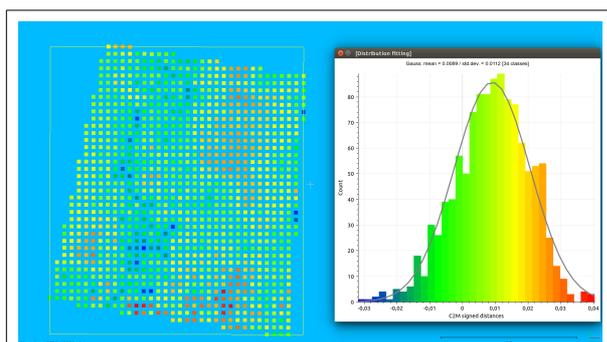
Une solution consiste à travailler avec des modèles générés aux niveaux de dézoom les plus faible, et d'appliquer un facteur d'échelle lors de la génération du nuage de points.



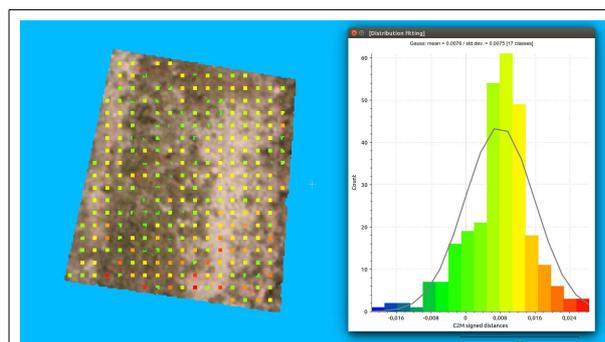
*Illustration 107: Zone 1, étape 7/10,
scale=2*



*Illustration 106: Zone 1, étape 7/10,
scale=4*



*Illustration 109: Zone 1, MNS généré au
niveau de dézoom 8 (étape 5/10)*



*Illustration 108: Zone 1, étape 7/10,
scale=8*

Ces quelques comparaisons permettent de valider la comparaison point à nuage allégé. Jusqu'à un facteur de réduction de 8, les indicateurs statistiques sont relativement similaires. De plus, les déformations sont localisées aux mêmes endroits.

CONCLUSION

La mission avait 3 enjeux principaux :

1. Étudier l'intérêt de l'ajout d'images obliques couplées à des images nadir ;

L'intérêt est assez clair. Les images obliques permettent de créer de la profondeur et ainsi permettent de mieux fixer les inconnus de calibration. Cela double le travail du pilote sur place, mais diminue celui des topographes et améliore la qualité des résultats.

2. Proposer une nouvelle solution pour la validation des résultats, et étudier la corrélation entre résidus d'aérotriangulation et précision du modèle 3D

Des zones de contrôle ont été relevées par photogrammétrie et laser scanner. Le relevé photogrammétrique semble donner des précisions supérieures à celle atteignables par Lidar, et offre l'avantage de la rapidité et d'un coût plus faible.

Il y a bien une corrélation entre les résultats de l'aérotriangulation et les écarts mesurés sur les zones de contrôle.

3. Effectuer un test de répétabilité en comparant 2 modèles créés à partir d'images différentes, mais acquises dans la même période

La mission a eu aussi l'intérêt de mettre en évidence l'influence des ombres portées. De 10h à 16h (discutable selon la saison), le soleil est assez haut pour éviter que ces ombres apparaissent dans nos images. Cela nous permet d'obtenir les meilleurs résultats.

En début ou en fin de journée, le déplacement des ombres va perturber l'appariement des points homologues, ce qui va influencer sur la précision de tous les calculs sous-jacents. Les précisions restent dans les tolérances pour une intervention exceptionnelle (besoin de précision de 3cm) avec 6 points d'appui, mais c'est insuffisant pour de l'auscultation régulière (ou alors il faut installer plus de points d'appui).

Enfin, les zones de contrôle ont permis de valider qu'une réduction des MNT par un facteur d'échelle (jusqu'à 10) permet d'effectuer les mêmes constats qu'en pleine résolution. Ce sous-échantillonnage permet néanmoins de manipuler les fichiers beaucoup plus facilement.

ANNEXE 8

RAPPORT DE MISSION : PALLIERE-2015

Rédacteurs : V.Tournadre - P.H. Faure

Date/lieu : du 13 au 17 avril 2015 sur le site de La Pallière

Participants IGN : Vincent Tournadre – Julien L'Harridon (SAA) – Oliver Martin (LOEMI) – Raphaëlle Delaugerre – Audrey Devillert – Sylvain Gonnet (TS)

Participants CNR : PH Faure - DR Belley

Participants VCT : Yohann Rabot – Francis Pichard – Alexandre Patte

INTRODUCTION

Dans le cadre de la thèse en Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère pour le suivi de digues, nous avons effectué une troisième acquisition sur le site de La Pallière (après celles de 2013 et 2014). L'objectif est quadruple, il s'agit de :

- confirmer sur un linéaire de 1100 mètres que les méthodes proposées sont efficaces
- effectuer un test de répétabilité
- effectuer une première évaluation du prototype Camlight
- d'évaluer l'intérêt de l'hélicoptère ULM en tant que vecteur

DÉROULEMENT DE LA MISSION

On peut distinguer la mission selon trois axes :

- l'installation et le relevé de points topographiques, ainsi que le relevé photogrammétrique terrestre, mené par le thésard et les travaux spéciaux (TS) de l'IGN ;
- le survol du site par drone : deux vols avec le Sony DSC-RX1 (test de répétabilité), et un vol avec le prototype de Camlight, menés par le Service des Activités Aériennes de l'IGN ;
- le survol du site par ULM : prises de vue avec le Sony DSC-RX1 (capteur plein format, focale de 35 mm), la Camlight de l'IGN (capteur plein format, focale de 85 mm), la PhaseOne iXU180 (capteur moyen format, focale de 55 mm), menées par Vinci Construction Terrassement.

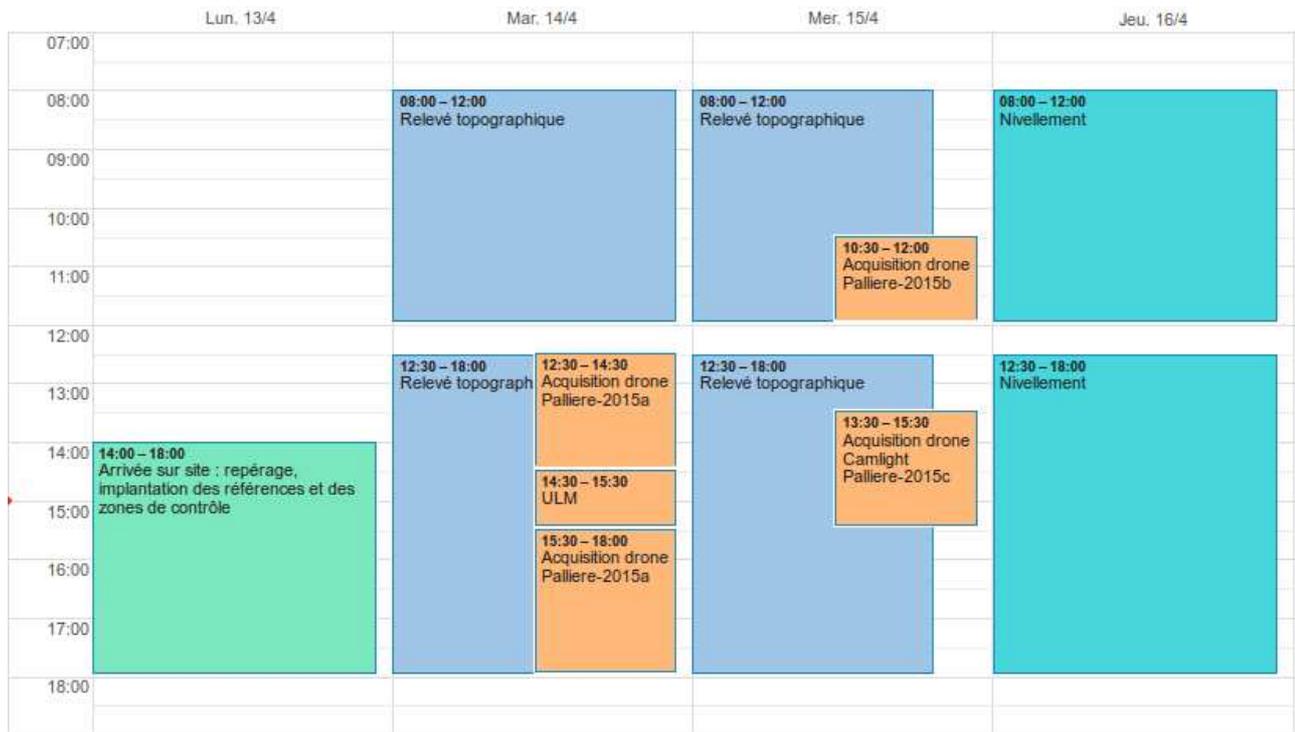


Illustration 110: Organisation de la mission de relevé

MISSION TOPOGRAPHIQUE

Dans le cadre du transfert de compétence relatif à la fin de thèse, et à l'exploitation future des résultats dans le cadre d'auscultations régulières, il a été fait appel aux Travaux Spéciaux pour effectuer le relevé des références topographiques.



Illustration 111: Points d'appui/contrôle ancien (à gauche), nouveaux (au centre), et cible délimitant une zone de contrôle (à droite)

La mission de relevé aura nécessité trois jours terrain, dont un consacré au nivellement des références. Trois opérateurs (techniciens supérieurs) auront été nécessaires. Le relevé planimétrique a été effectué par tachéométrie en utilisant des méthodes robustes (centrage forcé, visées multiples,...), et le calcul des coordonnées effectué par le logiciel de moindre carré Comp3d (version 4.52) développé à l'IGN.

Un rapport interne a été rédigé par les équipes de topographes, s'y référer pour de plus amples informations.

ZONES DE CONTRÔLE TERRESTRES

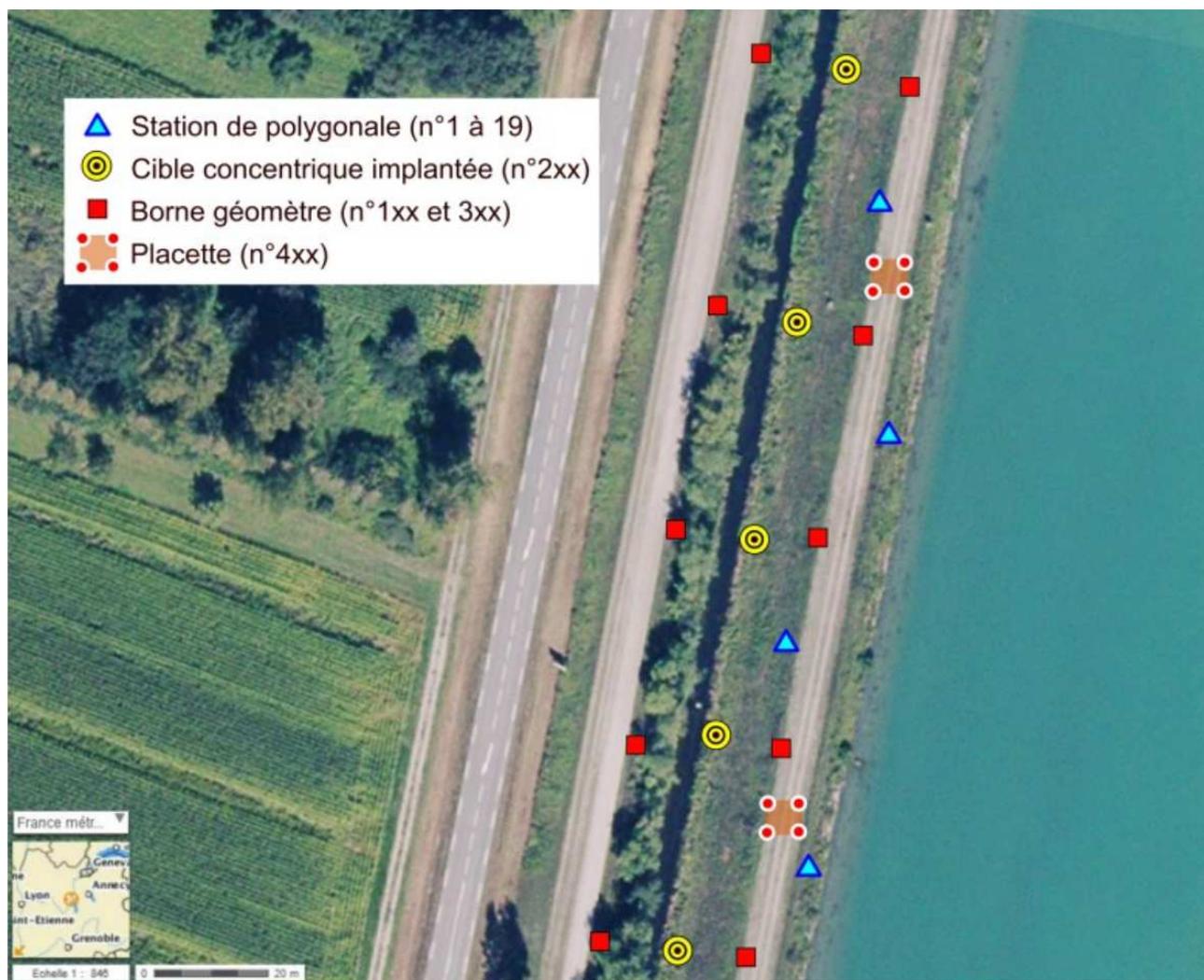


Illustration 112: Extrait du plan d'implantation et du canevas polygonal

Source : rapport interne TS / CNR

Douze zones de contrôle ont été installées le long de l'ouvrage, sur le corps de la digue. Les zones les moins végétalisées ont été privilégiées pour leur installation afin d'éviter des erreurs d'interprétation (entre deux prises de vue, les brins d'herbe, feuilles ou branches sont susceptibles de bouger sous l'effet du vent).

La prise de vue a été effectuée à partir d'un appareil Olympus OM-D EM-5 avec une focale de 14 mm (équivalent 28 mm en plein format). Les indicateurs de calcul (Illustration 113) sont moins satisfaisants que

Zone	2015			
	Images	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Z1	59	0,6	0,8	2,1
Z2	28	2,1	2,1	0,1
Z3	28	1,3	1,3	0,6
Z4	27	2,4	1,9	0,4
Z5	31	2,3	1,7	0,2
Z6	35	3,3	3,2	0,1
Z7	29	1,7	1,9	0,3
Z8	31	0,9	0,9	0,4
Z9	27	0,8	1,3	3,6
Z10	32	0,8	0,9	0,9
Z11	29	1,9	0,7	0,4
Z12	30	3,0	0,9	0,5

Illustration 113: Erreurs de reprojection des points de contrôle (avant ajustement)

ceux de l'acquisition de 2014 (Illustration 91). Un capteur de moins bonne qualité, couplé à une focale plus longue (nécessitant donc plus de clichés) en sont probablement la cause. Néanmoins sur la scène Z1 (utilisée pour la calibration et comportant un nombre important de points terrain, Illustration 114), après compensation sur 4 points d'appui, on enregistre sur 13 points de contrôles un écart moyen absolu de 0,8 mm en XYZ. La précision atteinte est donc satisfaisante au regard de l'objectif d'une vérité-terrain de précision infra-centimétrique.

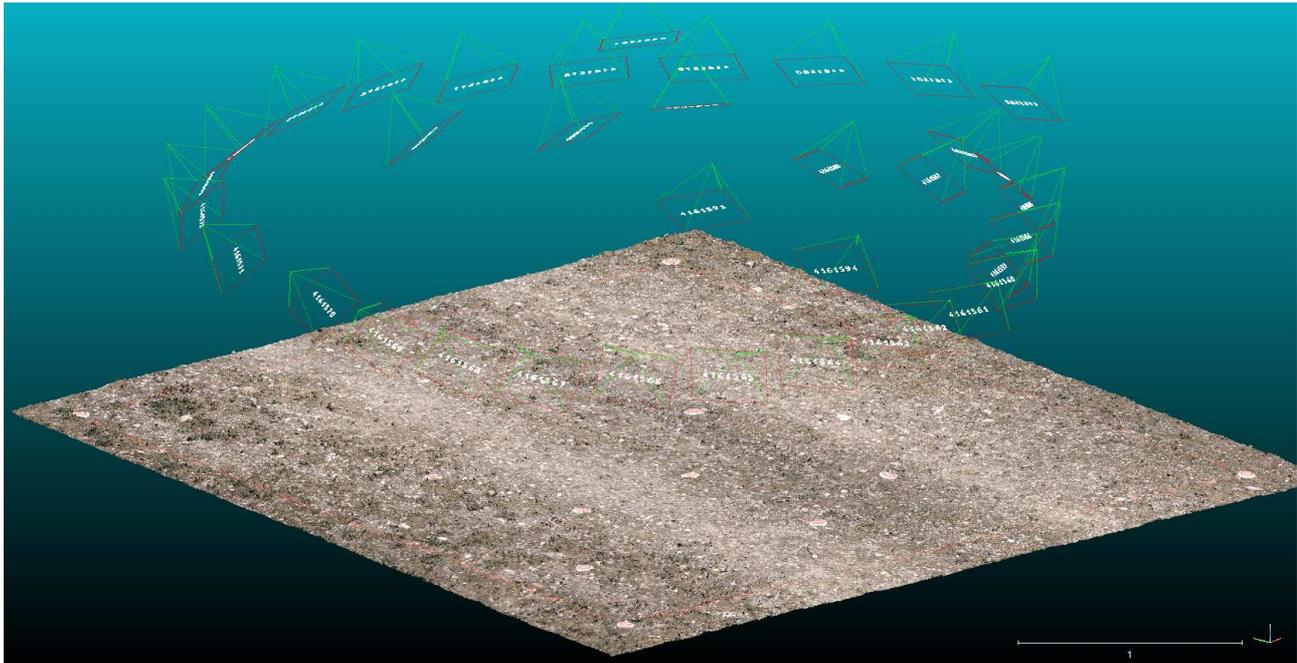


Illustration 114: Zone de contrôle utilisée pour la calibration de l'appareil photographique

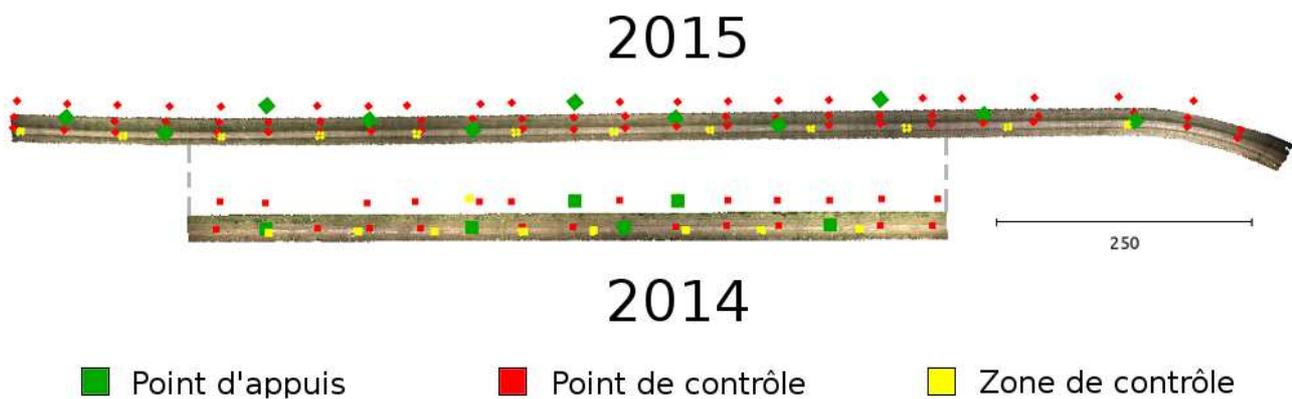


Illustration 115: Configuration du site

ACQUISITIONS PALLIERE-2015A ET PALLIERE-2015B

Le Service des Activités Aériennes de l'IGN est désormais compétent pour évoluer dans le cadre des scénarios S1, S2 et S3.

Équipé du drone DS6-1200, drone développé par une startup Française qui assemble des composants (notamment une électronique Mikrocopter), il fait

preuve d'une autonomie en vol et d'une stabilité plus forte que le modèle utilisé auparavant. La première acquisition (Pallière-2015a) nécessitera une demi-journée, alors que la seconde (Pallière-2015b) sera effectuée en moins de 2 heures. Les plans de vol, prévoyant l'acquisition d'images verticales et obliques sur 1100 mètres linéaires ont été effectués dans le cadre du scénario S1. Le vol a donc été découpé en segments de 200 mètres linéaires (en attendant l'application de la future législation qui permettra très prochainement de doubler ces distances).



Illustration 116: Le drone DS6-1200 utilisé par le SAA pour les acquisitions

Par mesure de sécurité, la première acquisition a été effectuée en 12 vols (6 pour les images verticales, 6 autres pour les images obliques). L'autonomie de l'appareil couplée à un contrôle à distance de la nacelle gyrostabilisée permettent néanmoins d'effectuer en un même vol les deux acquisitions, ce qui réduit considérablement le temps nécessaire à l'acquisition des images.

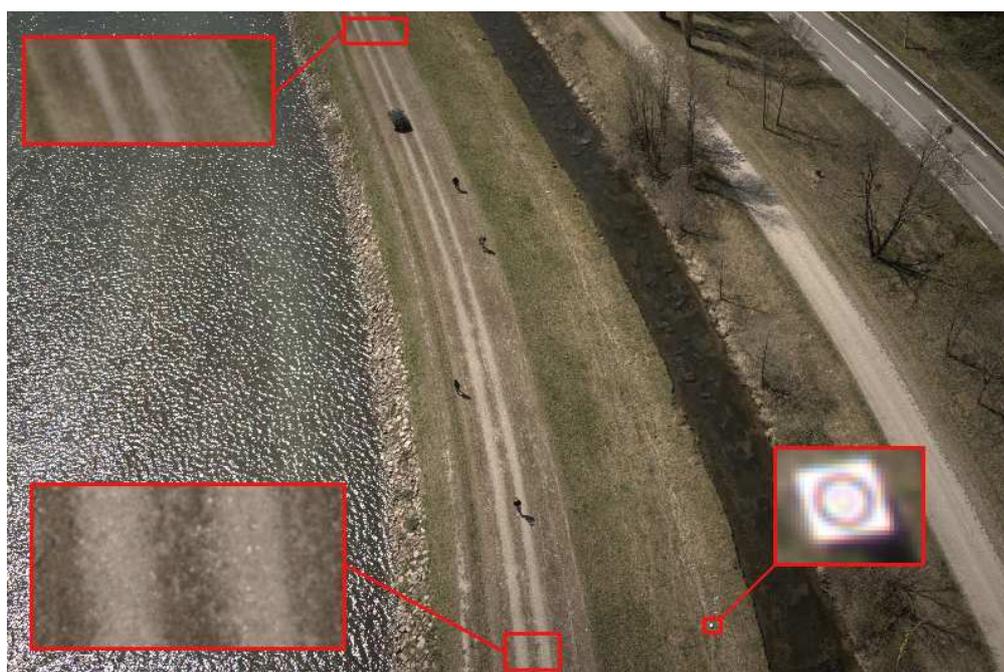


Illustration 117: Les images acquises avec le RX1 sont de bonne qualité. Les nouvelles cibles sont préférables aux bornes de géomètre

ACQUISITION PALLIERE-2015C

Le développement d'une caméra ultra-légère à l'IGN vise à répondre à une demande forte en capteurs légers et adaptés aux applications photogrammétriques. Dans le cadre de la thèse, nous avons pu effectuer une première acquisition opérationnelle avec un prototype permettant d'acquérir des images panchromatiques. La capacité d'enregistrement des images n'est pas encore optimale (le laboratoire vise une cadence de 10 img/s, mais a dû revoir ses plans suite à l'arrêt de production des SSD Toshiba initialement prévus).



Illustration 118: Le drone en phase de décollage au dessus de la digue de La Pallière

Comme pour l'acquisition Palliere-2015b, les images obliques et verticales sont acquises en un seul et même vol. Le temps d'acquisition est légèrement plus important, car la vérification des images (dont nous découvrons l'excellente qualité) est un peu plus chronophage.

Le poids plus faible de la caméra (300 grammes avec une optique Leica 35 mm) permet une autonomie accrue et nous constatons qu'en fin de vol, le niveau de batterie est supérieur à celui restant après les acquisitions avec l'appareil Sony.



Illustration 119: Image panchromatique acquise par la Camlight (Palliere-2015c)

ACQUISITION PALLIERE-2015-ULM

Il a été fait appel à l'entreprise Vinci Construction Terrassement (VCT) pour évaluer l'intérêt de l'hélicoptère ULM en tant que porteur. L'entreprise a développé, en partenariat avec la société Ecartip, un système LiDAR embarqué sur un hélicoptère ultra-léger. Couplé à un GPS-RTK et à une centrale inertielle, le système est régulièrement utilisé par VCT pour relever de longs linéaires.



Illustration 120: L'ULM est remorquable sur site. Il peut décoller depuis une digue et y atterrir, ce qui lui confère un intérêt accru

Le système présente un intérêt particulier pour les grands travaux (chantiers d'autoroute, de ligne ferroviaire à grande vitesse,..). Il pourrait également être adapté à l'auscultation de digues, mais sa précision n'est pas forcément adaptée aux besoins identifiés pour le suivi renforcé des ouvrages.

Cette expérience présente donc un intérêt double. D'une part, elle vise à estimer la précision du système et son intérêt pour l'auscultation des ouvrages hydrauliques. D'autre part, la charge utile étant importante, nous avons fixé sous l'appareil deux appareils photographiques : le Sony DSC-RX1 et la Camlight. Le premier appareil, équipé d'une focale de 35 mm permet d'acquérir des images d'une résolution de 2,5 cm ; le second équipé d'une optique 85 mm des clichés d'une résolution de 1 cm.

En utilisant les images acquises au 35 mm pour orienter les longues focales (dont le calcul est plus complexe), il est possible d'obtenir un MNT de résolution centimétrique. Cependant, la précision de ce MNT reste à confirmer. Le site de La Pallière, équipé de nombreuses mesures, est un banc d'essai remarquable pour ce type d'évaluation.

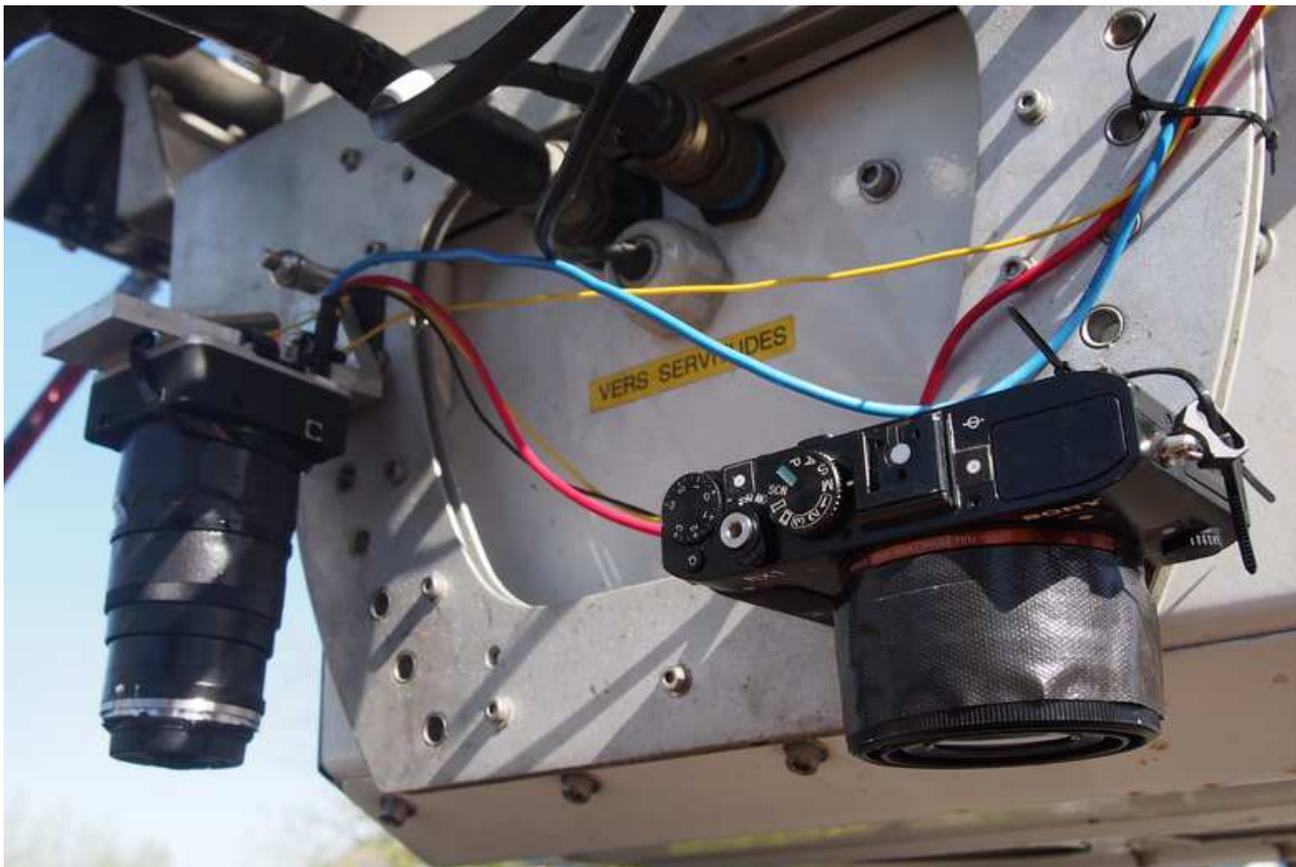


Illustration 121: Fixation de deux appareils photographiques utilisant des longueurs focales différentes



Illustration 122: Images capturées par le Sony DSC-RX1 35 mm (à gauche), et par la Camlight 85 mm (à droite). Même en volant à 150 mètres, la Camlight peut acquérir des images d'excellente qualité

CALCUL DES ORIENTATIONS

Les travaux de thèse ont permis de déterminer un *workflow* type qui a permis, jusqu'à présent, d'obtenir des résultats en accord avec les objectifs visés tout en limitant le nombre de points au sol. En appliquant cette procédure aux images acquises, les précisions atteintes sont satisfaisantes ([Illustration 123](#)).

Jeux de données	Linéaire	EMA _z [m]		Images verticales / Images obliques	Points d'appuis / Points de contrôle
		Avant compensation	Après compensation		
Palliere-2015a	1100 m	0,183	0,013	577 / 538	11 / 60
Palliere-2015b	1100 m	0,198	0,007	321 / 308	11 / 60
Palliere-2015c	1100 m	0,019	0,004	437 / 430	11 / 60
Palliere-2015-ULM	1100 m	0,125	0,010	372 / 0	11 / 60

Illustration 123: Résultats du calcul d'aérotriangulation avant et après compensation sur les points d'appui

On remarquera que le traitement des données issues de la Camlight semble particulièrement prometteur. En regardant de plus près ces résultats, on constate que la surcouche de calibration non radiale permet d'améliorer considérablement les précisions atteintes.

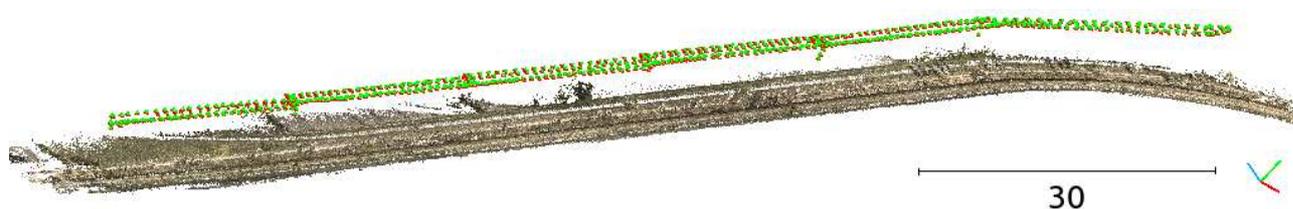


Illustration 124: Acquisiton drone, résultat type du calcul des points homologues et des orientations

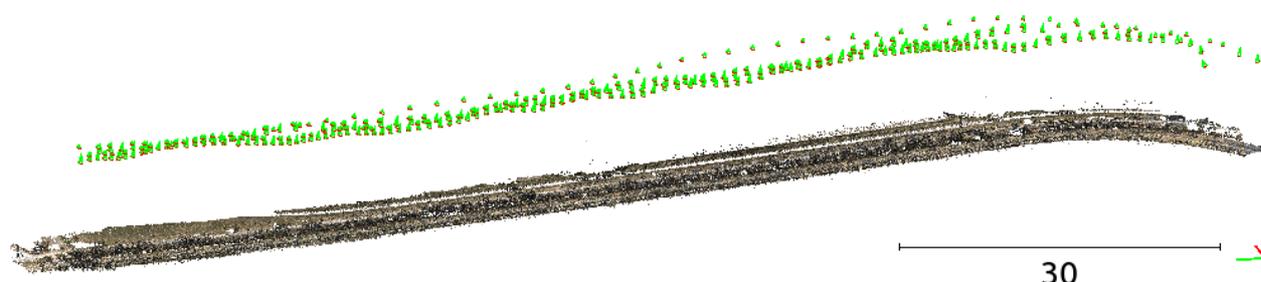


Illustration 125: Acquisiton ULM, résultat du calcul des points homologues et des orientations

On remarquera, malgré des indicateurs satisfaisants (erreurs de reprojection), que le calcul des orientations de l'acquisition ULM (avant compensation) est entaché d'une erreur évidente. La corrélation entre la valeur de la focale et la hauteur de vol, est ici évidente, puisque le système de prise de vue rigide et synchronisé (intervalle de 20 ms mesuré par oscilloscope par Olivier Martin, ingénieur du LOEMI) devrait restituer des sommets ayant eux aussi une base constante (à l'erreur de synchronisation près, multipliée par la vitesse de croisière de 20 m.s⁻¹ soit 40 cm). Or on distingue que les deux axes de prises de vue ne sont pas tout à faits corrélés.

Ce problème pourrait être résolu en fixant une contrainte lors de l'ajustement des faisceaux, et pourrait être une perspective pour l'amélioration de ce type d'acquisition.

ÉVALUATION DES MODÈLES 3D

Nous avons vu dans nos précédentes expériences que l'évaluation de modèles 3D par l'utilisation de points de contrôle peut être biaisée par des défauts de modélisation ponctuelle. Pour faire face à cette contrainte, nous avons installé des zones de contrôle sur lesquelles des MNT ponctuels ont été produits par photogrammétrie terrestre.

Nous avons donc généré des modèles 3D en utilisant différentes configurations de points d'appui :

- en utilisant un point tous les 200 mètres (6 références)
- en utilisant un point tous les 100 mètres (11 références)
- en utilisant tous les points disponibles (71 références)

En comparant chacun des nuages de points générés aux placettes de contrôle (desquelles un maillage tridimensionnel a été reconstitué), on observe que chaque échantillon suit une loi normale que l'on peut caractériser par sa moyenne et son écart-type. Les écart-moyens minimum et maximum permettent de donner une idée de l'amplitude des résultats.

Jeu	Points d'appuis	Moyenne générale [mm]	Écart-type général [mm]	Écart-moyen minimum [mm]	Écart-moyen maximum [mm]
Pallière-2015a 1100 m linéaires	71	-0,6	4,8	-13,9	3,1
	11	1,8	4,3	-27,0	25,2
	6	8,4	5,3	-7,9	50,7
Pallière-2014c 1100 m linéaires	71	2,2	3,8	0,1	5,5
	11	1,9	4,0	-2,1	7,6
	6	4,2	4,5	-5,8	11,3
Pallière-2015-ULM 1100 m linéaires	71	9,7	5,5	-1,0	18,3
	11	16,6	6,1	-1,6	28,3
	6	14,6	8,2	-3,7	28,8

Illustration 126: Comparaison entre les nuages drones et les maillages terrestres (zones de contrôle ponctuel)

On observe que les résultats obtenus avec la Camlight semblent de meilleure qualité. Par ailleurs, l'acquisition ULM semble permettre d'obtenir des résultats de qualité sensiblement équivalente à ceux obtenus sur l'acquisition Pallière-2015a.

Un autre type de contrôle est possible par en comparant les modèles 3D calculés par drone entre eux (test de répétabilité). Ce test semble confirmer que la Camlight produit les meilleurs résultats. Ils confirment que la photogrammétrie par drone est une alternative viable face au LiDAR, et que le développement des capteurs ultra-léger laisse augurer des résultats de plus en plus précis.

Chantier	Nombre de points d'appuis utilisés		Moyenne [mm]	Écart-type [mm]
	Maillage référence	Nuage comparé		
Pallièrre-2015a-b Sony DSC-RX1 Hauteur = 60 m 1100 m linéaires	71	71	2,7	20,6
	71	11	9,0	25,0
	11	11	-4,4	20,5
	6	6	-2,5	23,9
	71	6	-6,2	23,1
Pallièrre-2015a-c Référence = RX1 Comparé = CamLight Hauteur = 60 m 1100 m linéaires	71	71	-4,0	19,7
	71	11	-4,5	21,0
	11	11	-4,3	14,6
	6	6	-7,1	15,1
	71	6	-2,9	15,4

Illustration 127: Test de répétabilité, un maillage référence est calculé, auquel on compare un nuage de point

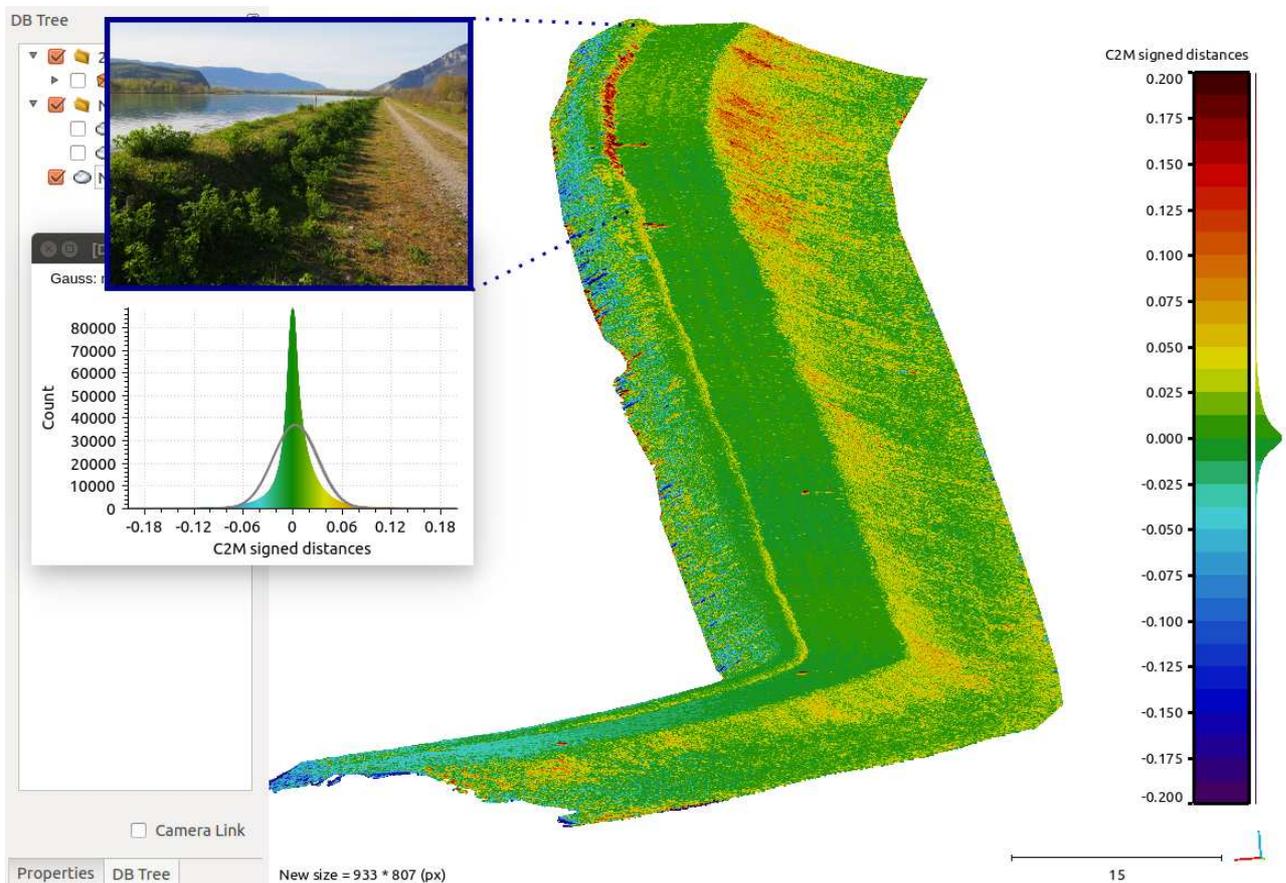


Illustration 128: Test de répétabilité, la répartition des écarts montre que la piste centrale, dépourvue de végétation, présente des écarts faibles. En revanche, les zones végétalisées semblent moins propices à la reconstruction 3D par photogrammétrie

LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Modèle physique (A et B) dans lequel une érosion interne a été simulée ; orthophotographies réalisées avant (C) et après (D) essai. La comparaison des modèles 3D (E) montre l'évolution de la surface de l'ouvrage suite à la perturbation interne. Source : rapport interne CNR.....22
- Figure 2: Estimation des conséquences d'une rupture de digues sur les populations urbaines. Source : Projet Didro.....23
- Figure 3: Coupe transversale d'un endiguement CNR équipé de deux piézomètres. Les mesures permettent d'estimer le niveau d'eau à l'intérieur de l'ouvrage, et ainsi de détecter d'éventuels dysfonctionnements (charge hydraulique importante). Source : rapport interne CNR.....25
- Figure 4: Profils types des aménagements sur le site de La Pallière (O1). Source : rapport interne CNR.....26
- Figure 5: Lithographie d'Honoré Daumier (journal Le Boulevard, 1863) illustrant la première prise de vue aérienne.....27
- Figure 6: La baignoire volante, considéré comme le premier ULM, développé par Dormoy en 1924.....28
- Figure 7: Les six classes d'ULM présentent des matériels aux caractéristiques variées.....29
- Figure 8: Tendances de recherche du terme "drone" sur le moteur de recherche Google. Source : <https://www.google.com/trends/explore?q=drone>.....29
- Figure 9: Montage illustrant un drone Parrot eBee à voilure fixe (à gauche), et un drone Dji Inspire à voilure tournante (à droite).....30
- Figure 10: Illustration des différentes catégories de drone. Source : société Vision du ciel.....31
- Figure 11: Espaces aériens (en rouge) où la navigation de drones est restreinte. Source : AIP-Drones.....31
- Figure 12: Scénarios encadrant l'utilisation de drones civils à des fins professionnelles. Schéma source : <http://my-drone-service.com/reglementation/>.....32
- Figure 13: Riegl LMS-Z620 utilisé par la société 3D Scan Map pour le relevé terrestre de la digue de Rochemaure.....33
- Figure 14: Système RiCOPTER équipé du LiDAR RIEGL VUX-SYS.....34
- Figure 15: Appareils de stéréorestitution permettant d'associer à chaque œil une image d'un couple stéréoscopique, de les orienter, et d'en restituer les éléments..36
- Figure 16: Logos de logiciels populaires de photogrammétrie automatisée.....37
- Figure 17: Exemple d'utilisation du module Tapas en ligne de commandes ; un

fichier d'aide décrit les arguments impératifs ou optionnels. La dernière ligne illustre un calcul pour lequel une calibration initiale est reprise, son point principal restant figé.....	39
Figure 18: Exemple d'interface individuelle pour l'outil Tapas.....	40
Figure 19: Interface développée par Isabelle Cléry avec la fenêtre principale (à gauche) et l'interface de saisie (à droite). Image extraite de [Cléry et Pierrot-Deseilligny 2011].....	40
Figure 20: Interface développée par Vinci Construction Terrassement et utilisée dans le groupe de construction dans le cadre de travaux de production.....	41
Figure 21: Version alpha de l'interface open-source développée par le Cerema.....	41
Figure 22: Coupe de la digue illustrant les phases de construction et matériaux...	44
Figure 23: Extrait de la carte aéronautique ICAO.....	44
Figure 24: Incident survenu début 2014.....	45
Figure 25: Illustrations de la digue de Rochemaure.....	45
Figure 26: Extrait de la carte aéronautique ICAO.....	45
Figure 27: Coupe de la digue au droit du site de Rochemaure (07).....	45
Figure 28: Extrait de la carte aéronautique ICAO.....	46
Figure 29: Emprise des linéaires de La Pallière (à gauche), Rochemaure (au centre) et Avignon (à droite).....	46
Figure 30: Illustration du Sony DSC-RX1. Source : https://www.alphaphotoclub.com/wp-content/uploads/2014/04/sensor1.jpg	47
Figure 31: Une nacelle gyrostabilisée de bonne qualité est préférable pour embarquer l'appareil photographique. Néanmoins, un montage simplifié est possible pour acquérir des images nadir de bonne qualité.....	48
Figure 32: Extrait d'images prises par le NEX7 (à gauche) et le DSC-RX1 (à droite) : au sol (en haut) et en vol (en bas).....	48
Figure 33: Le triangle de l'exposition expose le compromis nécessaire entre vitesse d'obturation, sensibilité et ouverture. Source: http://www.astuces-photo.com/wp-content/uploads/2012/10/Triangle-exposition.jpg	49
Figure 34: Exemples d'artefacts créés par l'utilisation d'un obturateur à rideau. Source : Google Images.....	50
Figure 35: Illustration du drone Gatewing X100. Source : http://uas.trimble.com	51
Figure 36: Image acquise avec le X100. Les points d'appui, prévus pour une acquisition à 60 mètres, restent visibles. Un léger flou est perceptible sur certaines images, spécifiquement dans les coins.....	52
Figure 37: Le drone est fixé sur une catapulte afin de faciliter son décollage.....	52
Figure 38: Le DT18 et sa station de contrôle.....	53

- Figure 39: Image acquise avec le DT18. Le réglage de l'appareil photographique sans retour d'image peut amener à surexposer des zones. L'intersection en damier des points d'appui n'est pas nette.....54
- Figure 40: Position des clichés obtenus selon deux géométries d'acquisition. Le vol en travers de la digue peut sembler contre nature. Dans le cas de la digue d'Avignon, il nécessite près de trois fois plus de temps d'acquisition qu'un vol le long de la digue. Le réseau est cependant nettement plus régulier et les images de meilleure qualité..... 55
- Figure 41: Station de contrôle du DT18.....56
- Figure 42: Mikrocopter HexaXL de l'IGN avec le Sony DSC-RX1 sur une nacelle gyroscopisée.....56
- Figure 43: Image acquise au Sony DSC-RX1 embarqué sur le Mikrocopter HexaXL. Les points d'appui sont nets, et l'image de très bonne qualité.....57
- Figure 44: DroneSys DS6-1200.....57
- Figure 45: Image oblique acquise par le DS6-1200. La résolution est meilleure dans le bas de l'image ; les points d'appui clairement repérables.....58
- Figure 46: L'hélicoptère ULM arrivant sur la digue à ausculter.....59
- Figure 47: Le Sony DSC-RX1 35 mm (à droite) et la Camlight équipée d'un 85 mm (à gauche) accrochés sous l'hélicoptère.....60
- Figure 48: Images capturées par le Sony DSC-RX1 35 mm (à gauche), et par la Camlight 85 mm (à droite). Même en volant à 150 mètres, la Camlight peut acquérir des images d'excellente qualité.....60
- Figure 49: Fixation de trois appareils photographiques sur le bord de l'avion. Un quatrième peut-être installé dans la trappe du cockpit.....61
- Figure 50: Résultat du calcul d'aérottriangulation (relatif). Position 3D des points homologues et des sommets de prise de vue orientés.....61
- Figure 51: Extrait des simulations menées par James (à gauche), et stratégies d'acquisition proposées par Nocerino (à droite).....63
- Figure 52: Plan de vol type pour une acquisition nadir en scénario S1.....63
- Figure 53: Plan de vol type pour une acquisition oblique en scénario S1.....64
- Figure 54: Stratégie suivie pour le calcul des orientations.....70
- Figure 55: Orientations et points homologues dans un cas aberrant (image de gauche) et dans un cas maîtrisé. Le contrôle visuel permet de repérer les erreurs les plus marquantes mais son intérêt est limité par la suite.....71
- Figure 56: L'écart entre la réalité terrain et le résultat de la photogrammétrie peut être estimé en géométrie terrain et en géométrie image.....71
- Figure 57: Détection et appariement automatisé des points homologues sur des images sous-résolues d'un facteur 4. Entre deux images verticales (à gauche) ou entre deux images obliques (au centre) les points sont nombreux hormis dans les zones végétalisées, sur l'eau et les surfaces peu texturées, ce qui limite les risques

d'outliers. Entre une image oblique et une image verticale (à droite) peu de points sont détectés. Les images acquises à partir de points de vue très différents compliquent la détection de points de liaison, qui reste cependant possible et suffisante pour relier les blocs. Si le résultat est jugé insuffisant, d'autres détecteurs tels ASIFT [Morel et Yu 2009] sont plus performants dans ces configurations.....75

Figure 58: Évolution de la dérive en fonction de la sous-résolution des images utilisées pour la détection des points homologues. Sur une acquisition où la courbure de bande est relativement maîtrisée, le diagramme montre logiquement que plus les images sont compressées (largeur initiale de 6000 pixels), plus l'erreur est importante. Jusqu'à un facteur de sous-résolution de 4, la perte de précision est relativement acceptable. Au-delà, des dérives planimétriques importantes se manifestent.....76

Figure 59: Déplacement des caméras par rapport à un cas parfait, dans l'hypothèse où la détection de points homologues est bruitée selon différentes valeurs. Bien que source d'erreur évidente, le phénomène de courbure n'est pas manifeste.....77

Figure 60: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle le long du profil. Quel que soit le modèle caméra utilisé, on observe un effet de courbure....80

Figure 61: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle en fonction du modèle caméra utilisé. L'ajout de degrés de liberté supplémentaire permet ici (Pallière-2015a) de réduire significativement les effets de courbure de bande (cf modèle R15)..... 82

Figure 62: Corrélation entre valeurs de focale et de la correction radiale. Une sous-évaluation de l'un des paramètres est compensée par une surévaluation de l'autre ; il est alors très complexe de déterminer quelle est la meilleure solution (intersections quasi-identiques).....83

Figure 63: Illustration du théorème de Stone-Weierstrass avec la fonction pour x défini sur l'intervalle $[-1;1]$. Une suite polynomiale converge vers la fonction cible. Source du graphique : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Sequence_of_polynomials_converging_uniformly_to_the_absolute_value.png (dernier accès le 25/09/2015).....84

Figure 64: Illustration des angles d'intersection entre les rayons perspectifs.....85

Figure 65: L'ajout d'images obliques permet d'augmenter l'angle d'intersection entre les rayons perspectifs.....86

Figure 66: Erreur moyenne absolue de reprojection selon diverses configurations de vol (jeux de données Palliere-2014), et selon la procédure de calibration employée. Alors que les images obliques apparaissent comme cruciales avec les modèles photogrammétriques standards, la procédure présentée permet de mieux exploiter des images acquises dans une configuration dégénérée.....87

Figure 67: Intersection de rayons perspectifs selon plusieurs géométries. L'imprécision de calibration interne est représentée par un cône dans l'espace. Lorsque l'angle d'incidence entre les rayons est faible, l'incertitude (en rouge) est forte. Au contraire, une intersection à angle droit est favorable.....87

- Figure 68: Les jeux acquis avec le RX1 font tous deux apparaître des dérives similaires. L'apport de la correction non radiale est ici minime, hormis pour la Camlight pour laquelle la dérive se limite alors à quelques centimètres.....89
- Figure 69: Erreurs de reprojection (moyennes absolues, en mètres) des orientations avant compensation sur les points d'appui. D'écarts initialement métriques, la méthode proposée réduit l'incertitude à quelques centimètres voire décimètres, pour les linéaires les plus importants (Palliere-2015).....90
- Figure 70: La transformation de Helmert à sept paramètres nécessite la correspondance entre trois points terrain (au minimum) et leurs emplacements dans trois images. Il s'agit d'une transformation rigide et non d'une compensation. 92
- Figure 71: Pondération des points homologues en fonction de leurs résidus, fonction \cdot . La nouvelle pondération des points homologues affecte la valeur 0.2 au coefficient k , et accepte un écart maximal de 5 fois ce coefficient. En fixant $k=1$, la sélection est plus souple et les dérives moins bien maîtrisées.....94
- Figure 72: Selon les chantiers, de nombreux paramètres entrent en compte lors de la compensation (nombre et qualité des points homologues, angles d'intersection, multiplicité, nombre et qualité et des points d'appui,...). Le paramètre k optimal semble varier d'un chantier à un autre..... 95
- Figure 73: Estimation de la dérive altimétrique par un modèle quadratique calculé à partir des erreurs de reprojection, et correction des orientations sur des mesures terrain..... 96
- Figure 74: Évolution de l'erreur de reprojection des points de contrôle le long du profil, sur Pallière-2014. Ici, la dérive altimétrique peut être estimée et corrigée efficacement par un modèle quadratique.....97
- Figure 75: Lorsque seules des images verticales sont utilisées, les résultats sont particulièrement dégradés. La correction quadratique semble apporter sur ce jeu les meilleurs résultats, hormis sur l'axe dont Y (gain marginal par rapport à Helmert)..... 98
- Figure 76: Entre images verticales seules ou images obliques seules, le calcul d'aérotriangulation est plus précis dans le second cas. Les précisions atteintes ne sont toutefois pas suffisantes pour répondre besoin d'une précision centimétrique identifié par la CNR..... 98
- Figure 77: Lorsque des images obliques et verticales sont utilisées, on constate que les dérives planimétriques sont maîtrisées et la compensation efficace. La méthode quadratique donne des résultats légèrement meilleurs qu'une compensation optimisée (par défaut)..... 98
- Figure 78: La compensation par défaut (§5.2) est presque toujours moins performante que l'optimisation présentée (§5.3). La méthode quadratique (§5.4) est encore plus bénéfique dans certains cas, mais elle est inadaptée dans d'autres 98
- Figure 79: Bug impactant le calcul des orientations avec Pix4D.....100
- Figure 80: Création d'un modèle numérique de terrain par corrélation dense en

géométrie terrain. Après avoir discrétisé un repère terrain local, chaque nœud de la grille est projeté dans les images individuelles à différents niveaux de parallaxe. Un score de corrélation est calculé pour chaque altitude d'un nœud donné, permettant de sélectionner les pixels les plus ressemblants.....102

Figure 81: Le modèle de référence doit être plus vaste que le modèle à évaluer...106

Figure 82: Comparaison grille à grille effectuée via la suite MicMac. Un gradient indique la dispersion des écarts entre deux MNE, le blanc indiquant des changements importants. On repère la présence d'un véhicule (cercle bleu), d'un flash correspond à des travaux d'aménagement (ellipse jaune).....107

Figure 83: Comparaison entre deux nuages de points issus d'un scan laser terrestre. On détecte des écarts importants sous les stations de scan, où la densité de points est minimale. Les écarts les plus importants n'indiquent pas forcément une déformation de la surface, ce qui pourrait perturber un suivi diachronique. 107

Figure 84: Comparaison des différentes méthodes de comparaison. Il faut être vigilant à sélectionner une méthode appropriée.....108

Figure 85: Évolution des écarts entre mesure terrain et point calculé par photogrammétrie. Le graphique montre des écarts importants, posant la question de la pertinence de ce type de contrôle.....109

Figure 86: Contrôle ponctuel avec un maillage sur Pallière-2013 (11 appui).....110

Figure 87: La régularisation du MNT engendre un lissage qui permet de réduire le bruit du modèle. Cependant, il rend obsolète le contrôle ponctuel des modèles lorsque les références ne sont pas implantées au niveau du sol.....111

Figure 88: Relevé LiDAR terrestre effectué par 3D Scan Map, avril 2013. Plan de localisation des stations (à gauche), densité de points résultante (au centre), et comparaison entre deux relevés terrestres (à droite). Le test montre des écarts importants sur les zones végétalisées et de faible densité (ellipse bleue), mais aussi sur des zones stables à forte densité (ellipse rose) ce qui représente un faux positif. 112

Figure 89: Comparaison entre le nuage de points issu de la transformation des images drone (1 point d'appui tous les 100 mètres, soit 6 points), par rapport aux maillages tridimensionnels reconstitués à partir de scans lasers terrestres. Outre les zones où la végétation est dense, on constate des écarts importants sous les stations de scan (LiDAR 1), dus à des difficultés de remaillage. La zone entourée en rose est relativement dépourvue de végétation ; elle permet une évaluation cohérente des résultats.....113

Figure 90: Test de répétabilité entre Pallière-2015a et Pallière-2015b, tous générés en utilisant 71 points d'appui. La comparaison nuage à maillage, effectuée avec le logiciel CloudCompare, fait apparaître de faibles écarts sur le chemin, dépourvu de végétation. En revanche, les zones enherbées sont plus complexes à modéliser. 115

Figure 91: Présence de rejets inadaptés à l'auscultation photogramétrique aérienne. Pour de meilleurs résultats, une tonte fine est préférable.....116

Figure 92: Implantation des zones de contrôle sur les jeux de données Pallière-

2014 et Palliere-2015. L'illustration indique également l'emplacement des points d'appui et de contrôle pour les configurations à 6 et 11 points d'appui respectivement.....117

Figure 93: Une prise de vue circulaire (à gauche) permet de déterminer les paramètres d'orientation interne. Les zones suivantes sont modélisées à partir de quelques images (au centre). Un test de répétabilité (à droite) montre un écart moyen de 1 mm et écart-type de 2 mm.....117

Figure 94 : Images individuelles (en haut), extrait d'une zone de contrôle maillée (bas-gauche), du nuage drone - plus diffus - au dessus de la zone de contrôle (bas-centre), et de la comparaison entre les deux (bas-droite). On constate que les irrégularités du terrain naturel sont modélisées à partir de la prise de vue terrestre, mais sont lissées sur le nuage drone. Cela souligne que le contrôle ponctuel d'un modèle surfacique est inadapté.....118

Figure 95: La Pallière - Vue perspective de la comparaison entre les modèles de 2015 (11 points d'appui) et 2013 (46 points d'appui).....122

Figure 96: Modèles reconstitués à partir des prises de vue sur Rochemaure en 2013 (à gauche) et 2014 (à droite). La zone encerclée (en bleu) met en valeur l'arrivée d'eau en pied de digue (à gauche), et l'aménagement réalisé pour prévenir d'une détérioration.....122

Figure 97: Évolution de la géométrie de la digue de Rochemaure de 2013 à 2014. La zone d'incident (en rouge à gauche) et les changements altimétriques sur la route cailloutée (zones jaunies) ne sont pas corrélées avec des changements sur la zone d'enrochements et le talus en contrebas. Le passage de poids lourds sur un chemin non prévu à cet effet peut être le responsable de ces évolutions.....123

Figure 98: Vue perspective de l'évolution de la partie centrale de la digue de La Pallière, de 2013 à 2015, modèles générés avec 6 points d'appui (hormis le modèle 2014, la « vérité-terrain établie avec 25 points). Les écarts importants sont dus à une tonte irrégulière. Des herbes hautes en bas de talus ainsi que de petits arbustes sur le cavalier de la digue (image centrale) perturbent l'analyse. Une tonte rase est recommandée avant le passage du drone ; à défaut, ces zones doivent être exclues. On remarque néanmoins que la partie centrale présente des indicateurs d'évolution neutres, ce qui est rassurant quant à la stabilité de l'ouvrage, mais valide aussi la précision et l'intérêt de la méthode proposée pour la détection de changements.....124

LISTE DES TABLES

Table 1: Périodicité des mesures de sécurité sur les ouvrages hydrauliques. Source : Décret n° 2015-526.....	21
Table 2: Besoins identifiés par la CNR pour améliorer le suivi de ses ouvrages.....	22
Table 3: Évolution du nombre d'appareils enregistrés à la DGAC. Source : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Statistiques-ULM,12288.html pour les statistiques ULM, recensement personnel pour les statistiques drone.....	66
Table 4: Description des modèles de calibration standards sous l'interface Tapas. Le choix d'un modèle de distorsion va influencer sur la qualité du calcul d'aérotriangulation résultant.....	79
Table 5: Angle d'incidence maximal des rayons perspectifs entre No et une caméra donnée.....	86
Table 6: Précisions atteintes dans différentes configurations. L'utilisation des seules images obliques est préférable à celle des seules images nadir. La combinaison des deux permet d'atteindre une excellente précision planimétrique. Les meilleurs résultats en altimétrie sont atteints lorsque seules des images obliques sont utilisées.....	86
Table 7: Récapitulatif des précisions atteintes sur chaque jeu de données, après application du workflow présenté en Annexe 2 du second Tome. Hormis les jeux de Palliere-2013 (images de qualité moyenne) et Palliere-2015a (météo agitée), la méthode présentée permet – en utilisant un point d'appui par tranche de 100m – d'obtenir une précision altimétrique (EMA) meilleure que le centimètre.....	99
Table 8: Erreurs de reprojection après compensation sur les points d'appui. Même en utilisant tous les points d'appui disponibles, les résultats obtenus par Photoscan sont insuffisants pour répondre aux objectifs visés.....	99
Table 9: Évaluation des résultats obtenus par photogrammétrie face à ceux obtenus par LiDAR.....	112
Table 10: Résultats des tests de répétabilité menés en faisant varier le nombre et la répartition des points d'appui.....	115
Table 11: Écarts moyens absolus de reprojection des points de contrôles sur les placettes. L'acquisition de 2015, menée avec un appareil photographique de qualité moindre et une focale plus longue, fait apparaître des résidus plus élevés malgré un nombre d'images plus conséquent. Ces indicateurs restent néanmoins de l'ordre de grandeur de la précision du relevé.....	118
Table 12: Évaluation de la précision des nuages de points (drone) sur les placettes de contrôle (maillage par photogrammétrie terrestre).....	119
Table 13: Palliere-2014a - Comparaison entre le nuage calculé en utilisant 6 points d'appui et les placettes de contrôle (maillage).....	120
Table 14: Comparaison entre les nuages produits à partir des acquisitions	

aériennes, et les 12 zones de contrôle terrestre. Les comparaisons font apparaître pour chaque zone une répartition suivant une loi normale, dont nous donnons ici la moyenne et l'écart-type général, ainsi que les écarts-moyens individuels minimum et maximum (amplitude). De manière générale, les précisions atteintes avec MicMac et 6 points d'appui sont plus satisfaisantes qu'un traitement via Photoscan et 71 points d'appui.....121

Table 15: Retour d'expérience sur les moyens aériens évalués au cours de cette étude.....127

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1: Planning de la mission.....	147
Illustration 2: Appareil photo prêt à glisser sur le rail. Les éléments jaunes permettent d'ajouter de la hauteur (25cm), et ainsi d'acquérir plusieurs axes.....	148
Illustration 3: Avec l'ancienne version du calcul des orientations, les modèles Fisheyes donnent les meilleurs résultats avec une focale de 35mm. Cela a été corrigé en raffinant le critère de convergence des modèles standards.....	149
Illustration 4: Le polynôme de distorsion calculé ne semble pas optimal. Lorsqu'on manipule ses valeurs, on s'aperçoit que la courbure résultante peut être minimisée.	149
Illustration 5: Ajustement des faisceaux avec mesures terrain. Le coefficient « SigmaTieP » (k présenté §5.3) n'est pas optimal par défaut.....	150
Illustration 6: Récapitulatif des caractéristiques des différents porteurs.....	151
Illustration 7: Déroulement chronologique de la mission.....	153
Illustration 8: Plan d'implantation des repères à installer.....	153
Illustration 9: L'acquisition est découpée en 7 bandes pour satisfaire aux conditions réglementaires et pallier la faible autonomie du drone.....	154
Illustration 10: Dispositif avec nacelle gyrostabilisée.....	154
Illustration 11: Adaptation d'une pièce de mousse pour contrer les vibrations....	154
Illustration 12: Résidus des bornes (nouvelles) sur la digue en XY (bleu), et XYZ (rouge).....	156
Illustration 13: Résidus altimétrique des bornes (nouvelles) sur la digue.....	156
Illustration 14: Résidus des bornes (nouvelles) sur le contre-canal en XY (bleu) et en XYZ (rouge).....	156
Illustration 15: Erreurs de reprojection des bornes (nouvelles) sur le contre-canal	157
Illustration 16: Interpolation du MNT sur les points de contrôle.....	157
Illustration 17: Interpolation du MNT sur les points de contrôle (invisibles dans les images).....	158
Illustration 18: Coordonnées des points d'appui mesurés le 25/06/2013.....	162
Illustration 19: Plan de vol initial.....	163
Illustration 20: Points homologues et orientations des caméras.....	163
Illustration 21: Orthophotographie produite à partir des images acquises.....	164
Illustration 22: Interpolation du MNT tous les 50m, différence en Z (m).....	164

Illustration 23: Nuage de points généré à partir de l'acquisition.....	165
Illustration 24: Comparaison entre deux relevés Lidar terrestre effectués à quelques jours d'intervalle, méthode de comparaison par le plus proche voisin..	166
Illustration 25: Répartition des écarts entre modèles photogrammétriques et relevés Lidar, méthode de comparaison par le plus proche voisin.....	167
Illustration 26: Écarts entre relevé Lidar et modèle photogrammétrique obtenu avec une distorsion radial basique, méthode de comparaison par le plus proche voisin.....	168
Illustration 27: Comparaison « Grid to Grid » entre les deux levers Lidar avec Surfer (à gauche, maille de 5cm), et avec l'algorithme développé (à droite, maille de 1,1cm). Partie Sud.....	170
Illustration 28: Comparaison « Grid to Grid » entre les deux levers Lidar avec Surfer (à gauche, maille de 5cm), et avec l'algorithme développé (à droite, maille de 1,1cm). Partie centrale.....	170
Illustration 29: Comparaison grille à grille entre les relevés LiDAR et photogrammétriques.....	171
Illustration 30: Répartition des écarts.....	171
Illustration 31: Répartition des GCP, comparaison Grille à grille Lidar/photogrammétrie.....	172
Illustration 32: Écarts entre photogrammétrie et Lidar, en fonction du nombre de points d'appui, comparaison Cloud to Cloud.....	173
Illustration 33: Répartition des écarts en fonction de la répartition géographique des points d'appui.....	174
Illustration 34: Rappel du CR du comité de suivi de thèse #1.....	177
Illustration 35: Hexaoptère de l'IGN utilisé pour les acquisitions.....	178
Illustration 36: Premier vol avec les nouvelles hélices.....	179
Illustration 37: Plan de vol, position des sommets de prise de vue.....	179
Illustration 38: Plan de vol, position des sommets de prise de vue.....	180
Illustration 39: Plan de vol à 60 mètres.....	181
Illustration 40: Plan de vol à 30 mètres.....	181
Illustration 41: Plan de vol à 120 mètres.....	181
Illustration 42: Gatewing UX100 utilisé pour l'acquisition S2.....	182
Illustration 43: Drone sur sa catapulte, paré au décollage.....	182
Illustration 44: Drone DT18.....	183
Illustration 45: Station de contrôle du drone.....	183
Illustration 46: Écart moyen absolu associé à chaque configuration.....	187

Illustration 47: Caméras & Points homologues. Une erreur lors de l'acquisition ne permet pas de relier les deux segments.....	188
Illustration 48: Orthophotographie de la partie 1 (segments 1, 2 et 3).....	188
Illustration 49: Orthophotographie de la partie 2 (segments 5 & 6).....	188
Illustration 50: Erreurs de reprojection (moyennes absolues) des points de contrôle répartis sur la digue (cf CR Palliere-2013).....	189
Illustration 51: Comparaison des altitudes mesurées en 2013 et 2014.....	189
Illustration 52: Nuage de points homologues & caméras.....	190
Illustration 53: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points au sol (en relatif, sans adaptation, calculs effectués avec l'ancienne procédure).....	190
Illustration 54: Résidus moyens absolus de la similitude (sans adaptation), en utilisant les images à 60m.....	191
Illustration 55: Résidus moyens absolus de la similitude après adaptation sur 6 GCP.....	191
Illustration 56: Erreurs de reprojection des points de contrôle sur l'axe Est.....	192
Illustration 57: Erreurs de reprojection des points de contrôle sur l'axe Ouest....	192
Illustration 58: Nuage de points homologues & caméras.....	193
Illustration 59: Résidus moyen absolus de la similitude (sans adaptation).....	193
Illustration 60: Erreurs de reprojection après compensation sur 6 points d'appui	194
Illustration 61: Erreurs de reprojection après compensation sur 12 points d'appui	194
Illustration 62: Interpolation de l'altitude du MNT et comparaison aux mesures terrain.....	194
Illustration 63: Interpolation de l'altitude du MNT et comparaison aux mesures terrain.....	194
Illustration 64: Vol le long de la digue, points homologues & caméras.....	195
Illustration 65: Vol perpendiculaire à la digue, points homologues & caméras....	195
Illustration 66: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points d'appui..	196
Illustration 67: Résidus moyens absolus de la similitude sur les points d'appui (sans adaptation).....	196
Illustration 68: Résidus de la similitude entre Orientations relatives/adaptées et mesures images (tous les points).....	197
Illustration 69: Plan de vol images nadir.....	200
Illustration 70: Plan de vol images obliques.....	200
Illustration 71: Déroulement chronologique de la mission.....	201

Illustration 72: Une tonte du site a été réalisée la veille de l'arrivée du drone.....	201
Illustration 73: Cheminement polygonal par centrage forcé.....	202
Illustration 74: Rattachement altimétrique des repères topographiques.....	202
Illustration 75: Installation et relevé (photogrammétrie terrestre et scan laser) des zones de contrôle.....	203
Illustration 76: Distribution des jeux de données.....	203
Illustration 77: Échantillon d'image nadir : bande aller (à gauche) et bande retour (à droite).....	203
Illustration 78: Déplacement des ombres, changement de luminosité, apparition d'objets mobiles,... entre deux prises de vue en fin de journée.....	204
Illustration 79: Exemple de surexposition constaté.....	204
Illustration 80: Échantillons de zones de contrôle surexposées.....	204
Illustration 81: Nuage de points épars, images obliques et nadir.....	205
Illustration 82: Nuage de points épars, images obliques.....	205
Illustration 83: Nuage de points épars, images nadir.....	205
Illustration 84: Écarts moyens absolus des résidus de la similitude spatiale sur les GCP (valeurs en mètres).....	206
Illustration 85: Résidus avant adaptation sur les points d'appui.....	206
Illustration 86: Résidus après adaptation sur les points d'appui.....	206
Illustration 87: Ecarts moyens absolus des résidus de la similitude spatiale sur les GCP.....	207
Illustration 88: Géométrie de la zone utilisée pour l'auto calibration.....	207
Illustration 89: Prise de vue type pour le calcul de MNT terrestre (ici : Z1).....	207
Illustration 90: Maillage reconstitué sur un GCP.....	208
Illustration 91: Calcul des MNT terrestres.....	208
Illustration 92: Z2.....	209
Illustration 93: Z3.....	209
Illustration 94: Z1.....	209
Illustration 95: Z4.....	209
Illustration 96: Z6.....	209
Illustration 97: Z5.....	209
Illustration 98: Z8.....	209
Illustration 99: Z10.....	209

Illustration 100: Z7.....	209
Illustration 101: Écart mesuré sur chaque zone.....	209
Illustration 102: Z9.....	209
Illustration 103: Précision du modèle sur chacune des zones de contrôle.....	210
Illustration 104: Zone 1, MNS généré au niveau de dézoom 4 (étape 6/10).....	210
Illustration 105: Zone 1, MNS généré au niveau de dézoom 2 (étape 7/10).....	210
Illustration 106: Zone 1, étape 7/10, scale=4.....	211
Illustration 107: Zone 1, étape 7/10, scale=2.....	211
Illustration 108: Zone 1, étape 7/10, scale=8.....	211
Illustration 109: Zone 1, MNS généré au niveau de dézoom 8 (étape 5/10).....	211
Illustration 110: Organisation de la mission de relevé.....	214
Illustration 111: Points d'appui/contrôle ancien (à gauche), nouveaux (au centre), et cible délimitant une zone de contrôle (à droite).....	214
Illustration 112: Extrait du plan d'implantation et du canevas polygonal.....	215
Illustration 113: Erreurs de reprojection des points de contrôle (avant ajustement)	215
Illustration 114: Zone de contrôle utilisée pour la calibration de l'appareil photographique.....	216
Illustration 115: Configuration du site.....	216
Illustration 116: Le drone DS6-1200 utilisé par le SAA pour les acquisitions.....	217
Illustration 117: Les images acquises avec le RX1 sont de bonne qualité. Les nouvelles cibles sont préférables aux bornes de géomètre.....	217
Illustration 118: Le drone en phase de décollage au dessus de la digue de La Pallière.....	218
Illustration 119: Image panchromatique acquise par la Camlight (Palliere-2015c)	218
Illustration 120: L'ULM est remorquable sur site. Il peut décoller depuis une digue et y atterrir, ce qui lui confère un intérêt accru.....	219
Illustration 121: Fixation de deux appareils photographiques utilisant des longueurs focales différentes.....	220
Illustration 122: Images capturées par le Sony DSC-RX1 35 mm (à gauche), et par la Camlight 85 mm (à droite). Même en volant à 150 mètres, la Camlight peut acquérir des images d'excellente qualité.....	220
Illustration 123: Résultats du calcul d'aérotriangulation avant et après compensation sur les points d'appui.....	221
Illustration 124: Acquisition drone, résultat type du calcul des points homologues	

et des orientations.....	221
Illustration 125: Acquisition ULM, résultat du calcul des points homologues et des orientations.....	221
Illustration 126: Comparaison entre les nuages drones et les maillages terrestres (zones de contrôle ponctuel).....	222
Illustration 127: Test de répétabilité, un maillage référence est calculé, auquel on compare un nuage de point.....	223
Illustration 128: Test de répétabilité, la répartition des écarts montre que la piste centrale, dépourvue de végétation, présente des écarts faibles. En revanche, les zones végétalisées semblent moins propices à la reconstruction 3D par photogrammétrie.....	223

BIBLIOGRAPHIE

[123DCatch 2015] <<http://www.123dapp.com/catch>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Acute3D 2015] <<http://www.acute3d.com/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Alcantarilla et al. 2012] ALCANTARILLA, P. F, BARTOLI, A & DAVISON, A. J (2012). *KAZE features*. Computer Vision–ECCV 2012, pp. 214-227. Springer Berlin Heidelberg.

[ANN 2010] ANN 2010 : <<https://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>> Dernier accès le 25/09/2015

[Apollonio et al. 2014] APOLLONIO, F.I, BALLABENI, A, GAIANI, M, & REMONDINO, F (2014). *Evaluation of feature-based methods for automated network orientation*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, XL-5, pp. 47-54.

[Assenbaum 2014] ASSENBAUM, M (2014). *Approche économique, coût d'acquisition vs sous-traitance*. Colloque « Drones et moyens légers d'observation », Montpellier, 06/2014.

[Barbey et al. 2014] BARBEY, C, HELBERT, J, JAËN, A, PAGOT, E, SAMALENS, J. C, VALETTE, L & WIGNERON, J. P (2014). *Comparaison des images pléiades et drone pour la viticulture de précision dans le cadre du programme earthlab*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection (208), p. 123.

[Barisin et al. 2009] BARISIN, I, LEPRINCE, S, PARSONS, B & WRIGHT, T (2009). *Surface displacements in the September 2005 Afar rifting event from satellite image matching: asymmetric uplift and faulting*. Geophys. Res. Lett. 36 (L07301).

[Beguïn 2011] BEGUIN, R (2011). *Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

[BIPM et al. 2008] BIPM, I, IFCC, I, ISO, I & IUPAP, O (2008). *The international vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM 200: 2008.

[Brandenberger 1958] BRANDENBERGER, A. J (1958). *Some considerations about error propagation in strip triangulations*. Attainable accuracy. Photogrammetria (14), pp. 78-85.

[Bonneau 1993] BONNEAU, D (1993). *Le régime administratif de l'eau du Nil dans l'Égypte grecque, romaine et byzantine (Vol. 8)*. Brill.

[Boudon et al. 2015] BOUDON, R, REBUT, P, MAURIS, F, FAURE, P. H, TOURNADRE, V & PIERROT-DESEILLIGNY, M (2015). *Les nouvelles techniques topographiques 3D surfaciques pour optimiser le suivi des ouvrages hydrauliques*. Actes du Vingt-Cinquieme Congrès des Grands Barrages, Q. 99 - R.53, 742-765. Symposium ICOLD, Stavanger (Norvège), 06/2015

[Borouchaki et al. 1997] BOROUCHAKI, H, GEORGE, P. L, HECHT, F, LAUG, P & SALTEL, E (1997). *Delaunay mesh generation governed by metric specifications*. Part I. Algorithms. Finite elements in analysis and design, 25(1), pp. 61-83.

[Brown 1971] BROWN, D. C (1971). *Close-range camera calibration*. *Photogramm. Eng.*, vol. 37, pp. 855-866.

[Bundler 2015] *Bundler – Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collecitons*. <<http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/>>. Dernier accès le 25/09/2015.

[Buckley et al. 2002] BUCKLEY, S. J, MILLS, J. P, CLARKE, P. J, EDWARDS, S. J, PETHICK, J & MITCHELL, H. L (2002). *Synergy of GPS, photogrammetry and INSAR for coastal zone monitoring*. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(4), pp. 581-586.

[Clarke et al. 1998] CLARKE, T. A, WANG, X & FRYER, J. G (1998). *The principal point and CCD cameras*. The Photogrammetric Record, 16(92), pp. 293-312.

[Cléry et Pierrot-Deseilligny 2011] CLÉRY, I & PIERROT-DESEILLIGNY, M (2011). *An ergonomic interface to compute 3D models using photogrammetry*. In Proceedings du XXIIIe symposium de la CIPA. Prag.

[Colomina et Molina 2014] COLOMINA, I & MOLINA, P (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 92, pp. 79-97, ISSN 0924-2716.

[Canny 1986] CANNY, J (1986). *A computational approach to edge detection*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, (6), pp. 679-698.

[Chandelier et al. 2011] CHANDELIER, L, DISSARD, O, DUPÉRET, A, HÉNO, R & SCHELSTRAETE, D (2011). *La prise de vues photogrammétriques. 19 décembre 2011*. Support de cours de photogrammétrie de l'ENSG <<http://fad.ensg.eu/moodle/course/view.php?id=316>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Cignoni et al. 2008] CIGNONI, P, CORSINI, M & RANZUGLIA, G. (2008). *Meshlab: an open-source 3d mesh processing system*. Ercim news, 73, pp. 45-46.

[CloudCompare 2015] <<http://www.danielgm.net/cc/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Cramer et Haala 2012] CRAMER, M & HAALA, N (2012). *Genauigkeitspotential der photogrammetrischen Bildauswertung für Daten unbemannter Luftfahrzeuge*. DGPF Tagungsband, 21, pp. 428-440.

[Daakir et al. 2015] DAAKIR, M, PIERROT-DESEILLIGNY, M, BOSSER, P, PICHARD, F & THOM, C (2015). *UAV onboard photogrammetry and GPS positioning for earthworks*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, XL-3/W3, pp. 293-298, 2015.

[Dall'Asta et Roncella 2014] DALL'ASTA, E & RONCELLA, R (2014). *A comparison of semiglobal and local dense matching algorithms for surface reconstruction*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 40, pp. 187-194.

[De Branges 1959] DE BRANGES, L (1959). *The Stone-Weierstrass theorem*. Proceedings of the American Mathematical Society 10.5 (1959): pp. 822-824.

[DiBiagio et Myrvoll 1986] DIBIAGIO, E & MYRVOLL, F (1986). *Instrumentation techniques and equipment used to monitor the performance of Norwegian embankment dams*. Publikasjon-Norges Geotekniske Institutt, (165), pp. 1-14.

[Doyle 1964] DOYLE, F (1964). *The Historical Development of Analytical Photogrammetry*. Photogrammetric Engineering, XXX(2), pp. 259-265.

[Ebner 1976] EBNER, H. (1976). *Self calibrating block adjustment*. Bildmessung und Luftbildwesen, 44, pp. 128-139.

[Eisenbeiss 2009] EISENBEISS, H (2009). *UAV photogrammetry*. Thèse de doctorat, ETH Zürich.

[Eisenbeiss et Sauerbier 2011] EISENBEISS, H & SAUERBIER, M (2011). *Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications*. The Photogrammetric Record, Vol. 26(136), pp. 400-421.

[Everaerts 2008] EVERAERTS, J (2008). *The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, 37 (B1), pp. 1187-1192.

[Fischler et Bolles 1981] FISCHLER, M. A & BOLLES, R. C (1981). *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography*. Communications of the ACM, 24(6), pp. 381-395.

[Fraser 1987] FRASER, C. S (1987). *Limiting error propagation in network design in photogrammetry*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, pp. 487-493

[Fraser 1997] FRASER, C. S (1997). *Digital camera self-calibration*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing, 52(4), pp. 149-159.

[Girardeau-Montaut et al. 2005] GIRARDEAU-MONTAUT, D, ROUX, M, MARC, R & THIBAUT, G (2005). *Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(part 3), W19.

[Girardeau-Montaut 2006] GIRARDEAU-MONTAUT, D (2006). *Détection de changement sur des données géométriques*. Thèse de Doctorat, Telecom Paris.

[Glennie et al. 2013] GLENNIE, C, BROOKS, B, ERICKSEN, T, HAUSER, D, HUDNUT, K, FOSTER, J & AVERY, J (2013). *Compact multipurpose mobile laser scanning system—Initial tests and results*. Remote Sensing, 5(2), pp. 521-538.

[Grussenmeyer 1994] GRUSSENMEYER, P (1994). *Contrôle géométrique de la saisie en photogrammétrie*. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg 1.

[Hansen et al. 2006] HANSEN, H, CARNEIRO, K, HAITJEMA, H & DECHIFFRE, L (2006). *Dimensional Micro and Nano Metrology*. CIRP Ann.- Manuf. Technol. 55 (22), pp. 721-743.

[Harris et Stephens 1988] HARRIS, C & STEPHENS, M (1988). *A combined corner and edge detector*. In Alvey vision conference (Vol. 15, p. 50).

[Helava 1978] HELAVA, U. V (1978). *Digital correlation in photogrammetric instruments*. Photogrammetria, 34(1), pp. 19-34.

[Hirschmüller 2005] HIRSCHMÜLLER, H (2005). *Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information*. In Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on (Vol. 2, pp. 807-814).

[Hobrough 1959] HOBROUGH, G. L (1959). *Automatic stereo plotting*. Photogrammetric Engineering, 25(5), pp. 763-769.

[Jacobsen 2007] JACOBSEN, K (2007). *Geometric handling of large size digital airborne frame camera images*. Optical 3D Measurement Techniques VIII, Zürich, 2007, pp. 164-171.

[James et Robson 2014] JAMES, M. R & ROBSON, S (2014). *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks*. Earth Surface Processes and Landforms, 39(10), pp. 1413-1420.

[Jiang et Whitehouse 2012] JIANG, X & WHITEHOUSE, D. J (2012). *Technological shifts in surface metrology*. CIRP Ann.- Manuf. Technol. 61 (2) pp. 815-836, 2012.

[Kazhdan et Hoppe 2013] KAZHDAN, M & HOPPE, H (2013). *Screened poisson surface reconstruction*. ACM Transactions on Graphics (TOG), 32(3), p. 29.

[Kelcey et Lucieer 2012] KELCEY, J & LUCIEER, A (2012). *Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing*. Remote

Sensing 2012, 4(5), pp. 1462-1493.

[Konecny 1985] KONECNY, G (1985). *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - 75 Years Old, or 75 Years Young*. Keynote Address, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(7), pp. 919-933.

[Kraus 2007] KRAUS, K (2007). *Photogrammetry - Geometry from Images and Laser Scans*. Walter de Gruyter, Goettingen, Germany, p. 459.

[Laliberte et al. 2010] LALIBERTE, A. S, HERRICK, J. E, RANGO, A & WINTERS, C (2010). *Acquisition, orthorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76(6), pp. 661-672.

[Lavoué, 2011] LAVOUÉ, G. *A multiscale metric for 3D mesh visual quality assessment* (2011). Computer Graphics Forum (Vol. 30, No. 5, pp. 1427-1437), Blackwell Publishing Ltd.

[Lewis, 1995] LEWIS, J. P. (1995). *Fast normalized cross-correlation*. In Vision interface (Vol. 10, No. 1, pp. 120-123).

[Lin et al. 2011] LIN, Y, HYYPPÄ, J, JAAKKOLA, A (2011). *Mini-UAV-Borne LiDAR for fine-scale mapping*. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett 2011, 8, pp. 426–430.

[Lingua et al. 2009] LINGUA, A, MARENCHINO, D & NEX, F (2009). *Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications*. Sensors 2009, 9, pp. 3745-3766;

[Lisein et al. 2013] LISEIN, J, PIERROT-DESEILLIGNY, M, BONNET, S, LEJEUNE, P (2013). *A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery*. Forests 4 (4), pp. 922–944.

[Longuet Higgins 1981] LONGUET HIGGINS, H.C (1981). *A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections*. Dans : Nature, 293 : p. 42).

[Lourakis et Argyros 2009] LOURAKIS, M. I. & ARGYROS, A. A. (2009). *SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment*. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 36(1), 2.

[Lowe 1999] LOWE, D. G. (1999). *Object recognition from local scale-invariant features*. In Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on (Vol. 2, pp. 1150-1157). IEEE.

[Lowe 2004a] LOWE, D. G (2004). *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. International journal of computer vision 60.2 (2004): pp. 91-110.

[Lowe 2004b] LOWE, D. G (2004). *Method and apparatus for identifying scale invariant features in an image and use of same for locating an object in an image*. Provisional application filed March 8, 1999. Assignee: The University of

British Columbia. US Patent 6,711,293 (March 23, 2004)

[McHenry et Bajcsy 2008] MCHENRY, K & BAJCSY, P (2008). *An overview of 3d data content, file formats and viewers*. National Center for Supercomputing Applications, 1205.

[Meshlab 2015] <<http://meshlab.sourceforge.net/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[MicMac 2015] <<http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3->>. Dernier accès le 25/09/2015

[Mikolajczyk et Schmid 2005] MIKOLAJCZYK, K & SCHMID, C (2005). *A performance evaluation of local descriptors*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 27(10), pp. 1615-1630.

[Mills et al. 2005] MILLS, J. P, BUCKLEY, S. J, MITCHELL, H. L, CLARKE, P. J, & EDWARDS, S. J (2005). *A geomatics data integration technique for coastal change monitoring*. Earth Surface Processes and Landforms, 30(6), pp. 651-664.

[Moré 1978] MORÉ, J. J, (1978). *The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory*. Numerical analysis, 105-116. Springer Berlin Heidelberg.

[Morel et Yu 2009] MOREL, J. M, and YU, G (2009). *ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison*. SIAM Journal on Imaging Sciences 2.2 (2009): pp. 438-469.

[Moulon 2014] MOULON, P (2014). *Positionnement robuste et précis de réseaux d'images*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

[Neininger et Hacker 2011] NEININGER, B & HACKER, J. M (2011). *Manned or unmanned—does this really matter*. In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Zurich, Switzerland. Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (Vol. 38, p. 1).

[Newhall 1964] NEWHALL, B. *The history of photography from 1839 to the present day*. Book. (1964): p 215.

[Nocerino et al. 2013] NOCERINO, E, MENNA, F, REMONDINO, F & SALER, R (2013). *Accuracy and block deformation analysis in automatic uav and terrestrial photogrammetry - lesson learnt*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, II-5/W1, pp. 203-208.

[Nocerino et al. 2014] NOCERINO, E, MENNA, F & REMONDINO, F (2014). *Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci, XL-5, pp. 465-472.

[Olague 2002] OLAGUE, G (2002). *Automated photogrammetric network design using genetic algorithms*. doi=10.1.1.211.4755

[Paparoditis et al. 2012] PAPANODITIS, 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), pp. 69-79.

[Photomodeler 2015] *PhotoModeler – Close-range photogrammetry and image-based modeling*. <<http://www.photomodeler.com/index.html>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Photoscan 2015] *Agisoft PhotoScan* <<http://www.agisoft.com/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Pierrot-Deseilligny et Paparoditis 2006] PIERROT-DESEILLIGNY, M & PAPANODITIS, N (2006). *A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery*. In: *ISPRS Workshop on Topographic Mapping from Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turkey.

[Pierrot-Deseilligny et Cléry 2012] PIERROT-DESEILLIGNY, M, CLERY, I (2012). *Some possible protocols of acquisition for the optimal use of the "Apero" open source software in automatic orientation and calibration*. Tutorial for EuroCow, Castelldefels, Espagne, 8–10 February 2012.

[Pierrot-Deseilligny et al. 2015] PIERROT-DESEILLIGNY, M et anonymes (2015). *MicMac, Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell*. <<http://logiciels.ign.fr/?Micmac>>.

[Pirotti et al. 2013] PIROTTI, F, GUARNIERI, A & VETTORE, A (2013). *State of the art of ground and aerial laser scanning technologies for high-resolution topography of the earth surface*. *European Journal of Remote Sensing*, 46, pp. 66-78.

[Pix4D 2015] <<https://pix4d.com/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Pognonec 2014] POGNONEC, G, LECCHI, M, SUEZ, G, SCHOLTZ, A, LANA, J. A & ENAGÁS, S. A (2014). *Threat detection to pipelines using an automated aerial surveillance system*. GRC 2014, Copenhagen, DK, September 17th–19th 2014

[Pouliquen et Lagarde 2014] POULIQUEN, F, LAGARDE, M. *Interview de Michael de Lagarde*, 19/02/2014.
<[http://www.expoprotection.com/site/FR/Michael de Lagarde Delair Tech L e drone pour surveiller les sites industriels,I1602,Zoom-03282df667769f68e35ee43b522dcc3c,KW-,FromPage-Search.htm](http://www.expoprotection.com/site/FR/Michael%20de%20Lagarde%20Delair%20Tech%20L%20e%20drone%20pour%20surveiller%20les%20sites%20industriels,I1602,Zoom-03282df667769f68e35ee43b522dcc3c,KW-,FromPage-Search.htm)>

[Rabin et al. 2008] RABIN, J, DELON, J, & GOUSSEAU, Y (2008). *A contrario matching of sift-like descriptors*. In *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on (1-4)*. IEEE.

[Remondino et al. 2013] REMONDINO, F, SPERA, M. G, NOCERINO, E, MENNA, F, NEX, F & GONIZZI-BARSANTI, S (2013). *Dense image matching: comparisons and*

analyses. In Proc. IEEE Conference" Digital Heritage (Vol. 1, p. 28).

[Remondino et al. 2014a] REMONDINO, F, DEL PIZZO, S, KERSTEN, T & TROISI, S (2012). *Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – A critical overview*. Proc. LNCS 7616, pp. 40-54.

[Remondino et al. 2014b] REMONDINO, F, SPERA, M. G, NOCERINO, E, MENNA, F & NEX, F (2014). *State of the art in high density image matching*. The Photogrammetric Record, 29(146), pp. 144-166.

[Robin 2013] ROBIN, Y (2013). *Levé lasergrammétrique terrestre d'une portion de digue*. Rapport interne de la Compagnie Nationale du Rhône.

[Rodgers et Thompson 2004] RODGERS, M & THOMPSON, K (2004). *Benefits of Freeform Mirror Surfaces in Optical Design*. Proc. ASPE Winter Top. Meet. Free. Opt, North Carolina USA, 2004: pp. 73–78.

[Rosu et al. 2015] ROSU, A. M, PIERROT-DESEILLIGNY, M, DELORME, A, BINET, R & KLINGER, Y (2015). *Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 100, pp. 48-59.

[Roy et Cox 1998] ROY, S & COX, I. J (1998). *A Maximum-Flow Formulation of the N-camera Stereo Correspondence Problem*, Proc. IEEE Intern. Conference on Computer Vision, pp. 492-499, Bombay.

[Saleri et al. 2013] SALERI, R, ERICA, N, REMONDINO, F & MENNA, F (2013). *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 (Vol. 2, pp. 203-208).

[Simm et al. 2012] SIMM, J. D, JORDAN, D, TOPPLE, A, MOKHOV, I, PYAYT, A, ABDOUN, T & MEIJER, R (2012). *Interpreting sensor measurements in dikes-experiences from UrbanFlood pilot sites*. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam, The Netherlands, pp. 19-23 November 2012.

[Singh et Fiume 1998] SINGH, K & FIUME, E (1998). *Wires: a geometric deformation technique*. In Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 405-414). ACM.

[Souchon et al. 2006] SOUCHON, J. P, PAPANODITIS, N, MARTIN, O, MEYNARD, C & THOM, C (2006). *Is there an ideal digital aerial camera*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(6).

[Souchon et al. 2010] SOUCHON, J. P, THOM, C, MEYNARD, C, MARTIN, O & PIERROT-DESEILLIGNY, M (2010). *The IGN CAMv2 System*. The Photogrammetric Record, 25(132), pp. 402-421.

[Souchon 2015] SOUCHON, J.P (2015). Camlight, une caméra métrologique pour drone. Journées de la Recherche de l'IGN, Marne-la-Vallée, 19 Mars 2015.

- [Sorkine et Alexa 2007]** SORKINE, O & ALEXA, M (2007). *As-rigid-as-possible surface modeling*. In Symposium on Geometry processing (Vol. 4).
- [Snavely et al. 2006]** SNAVELY, N, SEITZ, S, SZELISKI, R (2006). *Photo tourism: exploring photo collections in 3D*. In SIGGRAPH, pp. 835–846.
- [Stamatopoulos et Fraser 2011]** STAMATOPOULOS, C & FRASER, C. S (2011). *Calibration of long focal length cameras in close range photogrammetry*. The Photogrammetric Record, 26 (135), pp. 339-360.
- [Stempfhuber 2013]** STEMPFHUBER, W (2013). *3D-RTK capability of single GNSS receivers*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XL-1/W2, pp. 379-384.
- [Stone 1948]** STONE, M. H (1948). *The generalized Weierstrass approximation theorem*. Mathematics Magazine, 21(5), pp. 237-254.
- [Tang 2012]** TANG, R, FRITSCH, D & CRAMER, M (2012). *New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 71, pp. 76-85.
- [Thom et Souchon 1999]** THOM, C & SOUCHON, J.P (1999). *The IGN digital camera system in progress*. Fritsch, D, Spiller, R. (Eds.), Photogrammetric Week '99. Wichmann, Karlsruhe, pp. 89–94.
- [Triggs 1998]** TRIGGS, B.. *Autocalibration from planar scenes*. Proc. 5th European Conference on Computer Vision, pages 89–105, Freiburg, Germany, June 1998
- [Triggs et al. 2000]** TRIGGS, B, McLAUCHLAN, P. F, HARTLEY, R. I & FITZGIBBON, A. W (2000). *Bundle adjustment—a modern synthesis*. Vision algorithms: theory and practice (298-372). Springer Berlin Heidelberg.
- [Tommaselli et Tozzi 1996]** TOMMASELLI, A. M. G & TOZZI, C. L (1996). *A recursive approach to space resection using straight lines*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62(1), pp. 57-65.
- [Tournadre et al. 2014]** TOURNADRE, V, PIERROT-DESEILLIGNY, M & FAURE, P. H, (2014). *UAV photogrammetry to monitor dykes – calibration and comparison to terrestrial LiDAR*. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 1 (1), pp. 143–148.
- [van Blyenburgh 2013]** VAN BLYENBURGH, P (2013). *2013–2014 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014*. Technical Report. UVS International. Paris, France.
- [Verhoeven 2009]** VERHOEVEN, G. J (2009). *Providing an archaeological bird's-eye view—an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology*. Archaeological Prospection, 16(4), pp. 233-249.

[Vevaldi 2010] VEVALDI, A. (2010). *A lightweight C++ implementation of SIFT detector and descriptor*. <<http://vision.ucla.edu/~vedaldi/code/siftpp.html>> Dernier accès le 25/09/2015

[Vincent et al. 2012] VINCENT, G, SABATIER, D, BLANC, L, CHAVE, J, WEISSENBACHER, E, PÉLISSIER, R & COUTERON, P (2012). *Accuracy of small footprint airborne LiDAR in its predictions of tropical moist forest stand structure*. *Remote Sensing of Environment*, 125, pp. 23-33.

[Vsfm 2015] WU, C. *VisualSFM : A Visual Structure from Motion System*. <<http://ccwu.me/vsfm/>>. Dernier accès le 25/09/2015

[Vuitton 2012] VUITTON, R (2012). *Relevés topographiques haute résolution par laser hélicopté*. *Travaux*, (890), pp. 64-66.

[Wallace et al. 2012] WALLACE, L. O, LUCIEER, A & WATSON , C. S (2012). *Assessing the feasibility of uav-based lidar for high resolution Forest change detection*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B7, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.

[Wang et al. 2012] WANG, K., TORKHANI, F. & MONTANVERT, A. (2012). *A fast roughness-based approach to the assessment of 3D mesh visual quality*. *Computers & Graphics*, 36(7), 808-818.

[Warner et al. 1998] WARNER, E. S, GRAHAM, R. W & READ, R. E (1996). *Small format aerial photography*. Whittles Publishing, Caithness (Scotland), UK, p. 348.

[Williams 1959] WILLIAMS, R. E (1959). *The automatic map compilation system*. *Photogrammetric Engineering*, 25(1), pp. 103–110.

[Willmott et Matsuura 2005] WILLMOTT, C. J & MATSUURA, K (2005). *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*. *Climate research*, 30(1), p. 79.

[Wu 2011] WU, C (2011). *VisualSFM: A visual structure from motion system, 2011*. <<http://ccwu.me/vsfm>> Dernier accès le 25/09/2015

[Wu 2014] WU, C (2014). *Critical configurations for radial distortion self-calibration*. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 25-32.

[Xu et al. 2006] XU, D., ZHANG, H., WANG, Q. & BAO , H. (2006). *Poisson shape interpolation*. *Graphical Models*, 68(3), pp. 268-281.

[Yellowscan 2015] YELLOWSCAN (2015). *Ultra-light laser scanner for UAV applications*. <<http://yellowscan.lavionjaune.com/>> Dernier accès le 25/09/2015