

14^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 20 AU 22/09/17

Des systèmes de cartographie mobiles
au Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS):
besoins, enjeux, applications



Sommaire

Mot du directeur	- - - - -	p. 4
Programme	- - - - -	p. 5
Salon des exposants	- - - - -	p. 6
Conférence : « Des systèmes de cartographie mobiles au Plan Corps de Rue Simplifié [PCRS] : besoins, enjeux, applications »	- - - - -	p. 7
Ordre de passage des PFE	- - - - -	p. 9
Résumés des PFE	- - - - -	p. 15

Mot du directeur

Dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie, les Journées de la topographie (JDT) 2017 de l'INSA Strasbourg représentent la 14^e édition de cet événement en grande partie organisé par les étudiants de la spécialité.

Certes marquées par les soutenances des projets de fin d'études, ces journées donnent également lieu à des rendez-vous ludiques entre étudiants et professionnels à l'occasion de jeux permettant de tester les connaissances des différents acteurs, notamment en matière de cartographie mobile et de PCRS*. Ce thème sera en effet au cœur des débats tout au long de ces journées. Enfin, de nombreux sujets d'actualité sont également traités dans le cadre des soutenances de projets de fin d'études de nos futurs diplômé.e.s.

L'édition 2017 des JDT voit également le retour du salon des exposants auquel les entreprises peuvent participer et contribuer ainsi au financement des voyages techniques des étudiants.

Aussi, en tant que directeur de l'INSA Strasbourg, je ne peux que me réjouir de ce rendez-vous marquant de la communauté des topographes. Grâce au partenariat avec l'Ordre des géomètres experts et avec l'Association française de topographie ainsi qu'à l'aide apportée par les professeurs de l'INSA Strasbourg, nos élèves ingénieurs ont à nouveau su relever le défi de l'organisation des JDT à la grande satisfaction de tous.

Je tiens enfin à remercier tous les acteurs à savoir les étudiantes et étudiants, l'équipe pédagogique et technique qui les encadre, ainsi que les professionnels qui leur font confiance, pour leur engagement au service d'une profession dynamique qui honore une spécialité emblématique de notre établissement.

* Plan Corps de Rue Simplifié

Programme

MERCREDI 20 SEPTEMBRE

8 h

Accueil [hall d'entrée]

8h30 - 12h30 et 14h30 - 17h30

Soutenances de Projets de fin d'études (PFE)

[salles C.111 et C.116, bâtiment C]

JEUDI 21 SEPTEMBRE

8 h

Accueil [hall d'entrée]

8h30 - 11h30

Soutenances de PFE

[amphis Arts & industries et Vinci, bâtiment E]

13 h - 18 h

Salon des exposants et animations [salle d'exposition]

17h30

Conseil de l'Association française de topographie (AFT)

[salle C.116, bâtiment C]

VENDREDI 22 SEPTEMBRE

8 h

Accueil [hall d'entrée]

8h30 - 11h30

Soutenances de PFE [salles C.111 et C.116, bâtiment C]

14 h - 16 h

Conférence: « Des systèmes de cartographie mobiles
au Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS):

besoins, enjeux, applications » [amphi de Dietrich]

16 h - 17h30

Présentation de l'Ordre des géomètres-experts (OGE)

[amphi de Dietrich]

17h30

Annonce des résultats [salle d'exposition]

18h30

Verre de l'amitié [salle d'exposition]

Salon des exposants

JEUDI 21 SEPTEMBRE DE 13 H À 18 H
SALLE D'EXPOSITION

Le salon des exposants est de retour!

Il sera une pause technologique au milieu des soutenances des projets de fin d'études.

Ce salon permet à une quinzaine d'entreprises de présenter leurs matériels aux professionnels et aux futurs ingénieurs présents, le tout dans une ambiance conviviale.

Durant l'après-midi, des jeux seront organisés afin de tester les connaissances du public sur la topographie et sur le matériel présenté au salon. Les gagnants seront récompensés!

Liste des entreprises du salon des exposants

- | | |
|---|--|
| 1. Association française de topographie | 8. Lepont |
| 2. Exagone | 9. Ordre des géomètres experts |
| 3. Fit Esic | 10. Positics |
| 4. Geomedia | 11. Reshaper – Technodigit part of Hexagon |
| 5. Geotopo - Trimble | 12. Sdmo Quiniou |
| 6. JSInfo | 13. Topcon |
| 7. Leica Geosystems | |

≡ **Conférence : des systèmes de cartographie mobiles au Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS) : besoins, enjeux, applications**

VENDREDI 22 SEPTEMBRE DE 14 H À 16 H
AMPHITHÉÂTRE DE DIETRICH

Nous connaissons tous la Google-car avec sa caméra sur le toit, nous en voyons les résultats au quotidien avec Google Maps. Mais que se passe-t-il quand les topographes s'emparent de l'idée ? En y ajoutant un système GNSS, une centrale inertielle et un scanner laser, on obtient des nuages de points très complets.

Les améliorations récentes apportées aux logiciels de traitements, aux algorithmes ainsi qu'aux ordinateurs permettent de représenter des rendus fidèles des objets scannés et ce, de manière de plus en plus automatisée.

La réalisation d'un PCRS nécessitant un maximum d'informations, la cartographie mobile pourrait être une solution mais de nombreuses questions se posent : quelles sont ses limites ? À quoi ces données peuvent-elles servir aux topographes ? Comment les intégrer dans les systèmes d'information ou de cartographie ? Quel sera le niveau de détails requis ?

Pourquoi créer et utiliser un nouveau document comme le PCRS, quels sont les besoins ayant entraîné la création de ce nouvel outil, quels en sont les enjeux ? Des topographes aux architectes, en passant par les entreprises de réseau, un grand nombre de professionnels utilisera ce type de plan.

Le sujet peut être traité selon plusieurs points de vue. Rendez-vous à la conférence pour savoir le(s)quel(s) seront explorés !



≡ Ordre de passage des PFE

MERCREDI 20 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle C.111, bâtiment C)

8 h 30 • Traitements de nuages de points automatisés et évaluation d'algorithmes de filtrage pour le développement de logiciels liés • p. 17

- Étudiant : CAPRA Thibaud
- Structure d'accueil : Drone Alsace, Strasbourg
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre et KOEHL Mathieu

9 h 30 • Modélisation 3D du souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données Graffiti avec QGis • p. 21

- Étudiant : CARON Pierre
- Structure d'accueil : Communauté de communes de Bocage-Hallue, Villers-Bocage
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre et KOEHL Mathieu

10 h 30 • Apport d'une solution visuelle 3D de la montée des eaux en période de crue au sein de l'entreprise Technidrone • p. 25

- Étudiante : BEVENGUT CHATONEY DZUIRA Claire
- Structure d'accueil : Techni Drone, Baix
- Correcteur : FERHAT Gilbert

11 h 30 • Utilisation de GPS en auscultation de précision : association à un système tachéométrique automatisé • p. 29

- Étudiante : JOUSSET Émilie
- Structure d'accueil : Sixense Soldata, Aix-en-Provence
- Correcteur : FERHAT Gilbert

14 h 30 • Analyse sémantique de scène obtenue par vérité terrain et mise en correspondance en vue de la validation sensorielle du véhicule autonome • p. 33

- Étudiant : DEFRAITEUR Rémi
- Structure d'accueil : Adas véhicule autonome & technologie électrique, Guyancourt
- Correcteurs : ALBY Emmanuel et LANDES Tania

15 h 30 • Analyse du risque végétation dans les emprises ferroviaires à partir de données Lidar acquises par drones • p. 37

- Étudiant : PERRIN Luc
- Structure d'accueil : SNCF Réseau, Paris
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre et LANDES Tania

16h30 • Prise en compte optimale des facteurs météorologiques dans les mesures automatiques tachéométriques sur les chantiers d'auscultation de Sixense Soldata • p. 41

- Étudiant: CHÉREL Benjamin
- Structure d'accueil: Sixense Soldata, Nanterre
- Correcteurs: FERHAT Gilbert et LEDIG Jacques

JURY 2 [salle C.116, bâtiment C]

8h30 • Géoréférencement et filtrage de nuage de points sur des relevés de grande envergure en environnement industriel • p. 45

- Étudiante: DHONT Marie-Anaïs
- Structure d'accueil: Sites, Rueil-Malmaison
- Correctrice: LANDES Tania

9h30 • Traitement d'un nuage de points scannés via GeoMoS en vue d'automatiser le post-traitement des données • p. 49

- Étudiant: PENY William
- Structure d'accueil: Mire SAS, Nanterre
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Étude technique concernant les auscultations automatiques par différents supports tels que des stations totales de précision et des scanners lasers 3D • p. 53

- Étudiant: GUILLEREY Joseph
- Structure d'accueil: Alpes Topo, Ivry-sur-Seine
- Correcteur: ALBY Emmanuel

11h30 • Mise en place d'un procédé de relevé photogrammétrique par drone au sein du cabinet SEGC Topo et étude de la trajectographie du drone • p. 57

- Étudiante: PORTES Inès
- Structure d'accueil: SEGC Topo, Cagnes-sur-Mer
- Correcteur: KOEHL Mathieu

14h30 • Test et évaluation de l'influence de paramètres d'acquisition UAV sur la précision des données et détermination de la solution optimale pour l'entreprise LE34 • p. 61

- Étudiante: LE BIGOT Gaëlle
- Structure d'accueil: LE34, Ballerup [Danemark]
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

15h30 • Développement et mise en œuvre de procédures d'acquisitions par photogrammétrie au sein de l'entreprise Altea. Applications à l'acquisition de données en milieu urbain • p. 65

- Étudiant: COURTOIS Yoann
- Structure d'accueil: Altea, Lyon
- Correcteur: ALBY Emmanuel

16 h 30 • LIDAR aéroporté: de l'acquisition aux livrables. Étude méthodologique et critique à partir de cas concrets en vue de la rédaction d'un « Guide et manuel » applicable à l'Exploration & Production

• p. 69

- Étudiante: THOURY Coline
- Structure d'accueil: Total SA, Pau
- Correcteur: ALBY Emmanuel

JEUDI 21 SEPTEMBRE

JURY 1 (amphi Arts & industries, bâtiment E)

8 h 30 • Structuration technique et qualité du partenariat TPLM-3D/Sodera Expertise appliqué à la photogrammétrie par drone

• p. 73

- Étudiant: LHÉRITIER Théodore
- Structure d'accueil: TPLM-3D, Givors
- Correcteurs: LANDES Tania et KOEHL Mathieu

9 h 30 • Modélisation tridimensionnelle du monument antique du Meisenbachschloessel de Sparsbach (Bas-Rhin)

• p. 77

- Étudiant: DIETHRICH Julien
- Structure d'accueil: Archéologie Alsace, Sélestat
- Correcteurs: KOEHL Mathieu et ALBY Emmanuel

10 h 30 • Étude conceptuelle de constitution et d'exploitation de données parcellaires historiques

• p. 81

- Étudiant: PERTSINIDIS Nicolas
- Structure d'accueil: Strasbourg Eurométropole, Strasbourg
- Correcteurs: Koehl Mathieu et Alby Emmanuel

JURY 2 (amphi Vinci, bâtiment E)

8 h 30 • Développement d'une procédure d'amélioration du calcul de trajectographie d'un système de cartographie dynamique

• p. 85

- Étudiante: MIRANDE Katia
- Structure d'accueil: GEOFIT, Nantes
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

9 h 30 • Développement d'un algorithme de détection et de mesure d'un fil tendu sur des photos de l'accélérateur LHC au CERN

• p. 89

- Étudiante: SCANELLA Lucie
- Structure d'accueil: CERN, Genève (Suisse)
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

10h30 • Mise en place d'un capteur à faible coût (*action camera*) pour la photogrammétrie sur un système MLS (*Mobile Laser Scanner*) pour les contraintes de détection et d'interprétation d'objets ainsi que pour la colorisation de nuages de points • p. 93

- Étudiant: TEODOMANTE Romain
- Structure d'accueil: GEOSAT, Pessac
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

JURY 3 (salle C.116, bâtiment C)

8h30 • Inventaire et analyse de la situation foncière des usines souterraines des concessions hydroélectriques EDF • p. 97

- Étudiant: LANTHIEZ Quentin
- Structure d'accueil: EDF-DTG, Lyon
- Correcteur: LEDIG Jacques

9h30 • Le GNSS-RTK pour l'optimisation des relevés photogrammétriques • p. 101

- Étudiant: VAUCLARE Simon
- Structure d'accueil: Site Rhône-Alpes, Dardilly
- Correcteur: FERHAT Gilbert

VENDREDI 22 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle C.111, bâtiment C)

8h30 • Développement d'un processus de traitement de données *Mobile Mapping* pour la production d'un livrable type PCRS (Plan Corps de Rue Simplifié) • p. 105

- Étudiante: FORRLER Marine
- Structure d'accueil: Futurmap, Madagascar
- Correcteurs: LANDES Tania et KOEHL Mathieu

9h30 • Numérisation et anastylose d'éléments statuaire du projet INRAP « Pont-Sainte-Maxence » • p. 109

- Étudiant: BITARD Laurent
- Structure d'accueil: Laboratoire Icube - Équipe TRIO-PAGE, INSA Strasbourg
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre et ALBY Emmanuel

10h30 • Utilisation de la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles • p. 113

- Étudiant: CARTIER-XATARD Maxime
- Structure d'accueil: Compagnie nationale du Rhône, Lyon
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre et ALBY Emmanuel

JURY 2 (salle C.116, bâtiment C)

8 h 30 • Caractérisation de précision d'un GNSS mono-fréquence à bas coût et développement d'une chaîne de traitement automatisée pour l'auscultation d'ouvrages d'art ou de mouvements géotechniques • p. 117

- Étudiant: MARQUES Thomas
- Structure d'accueil: Itmsol, Paris
- Correcteur: FERHAT Gilbert

9 h 30 • Création et intégration d'une propriété par étages en 3D dans la plateforme ArcGIS (ESRI) et partage via le cloud • p. 121

- Étudiante: BARRAND Laura
- Structure d'accueil: MBC Ingéo SA, Vessy (Suisse)
- Correcteur: KOEHL Mathieu

10 h 30 • Étude du potentiel des drones dans les domaines de la géomatique et de l'urbanisme, au sein d'un bureau de géomètre genevois • p. 125

- Étudiant: ARNOLD Pierre
- Structure d'accueil: MBC Ingéo SA, Vessy (Suisse)
- Correcteur: KOEHL Mathieu

Projet de fin d'études soutenus au mois de juin et juillet 2017

Mise en place de l'utilisation d'instruments de mesure 3D dans le cadre d'auscultations de barrages • p. 129

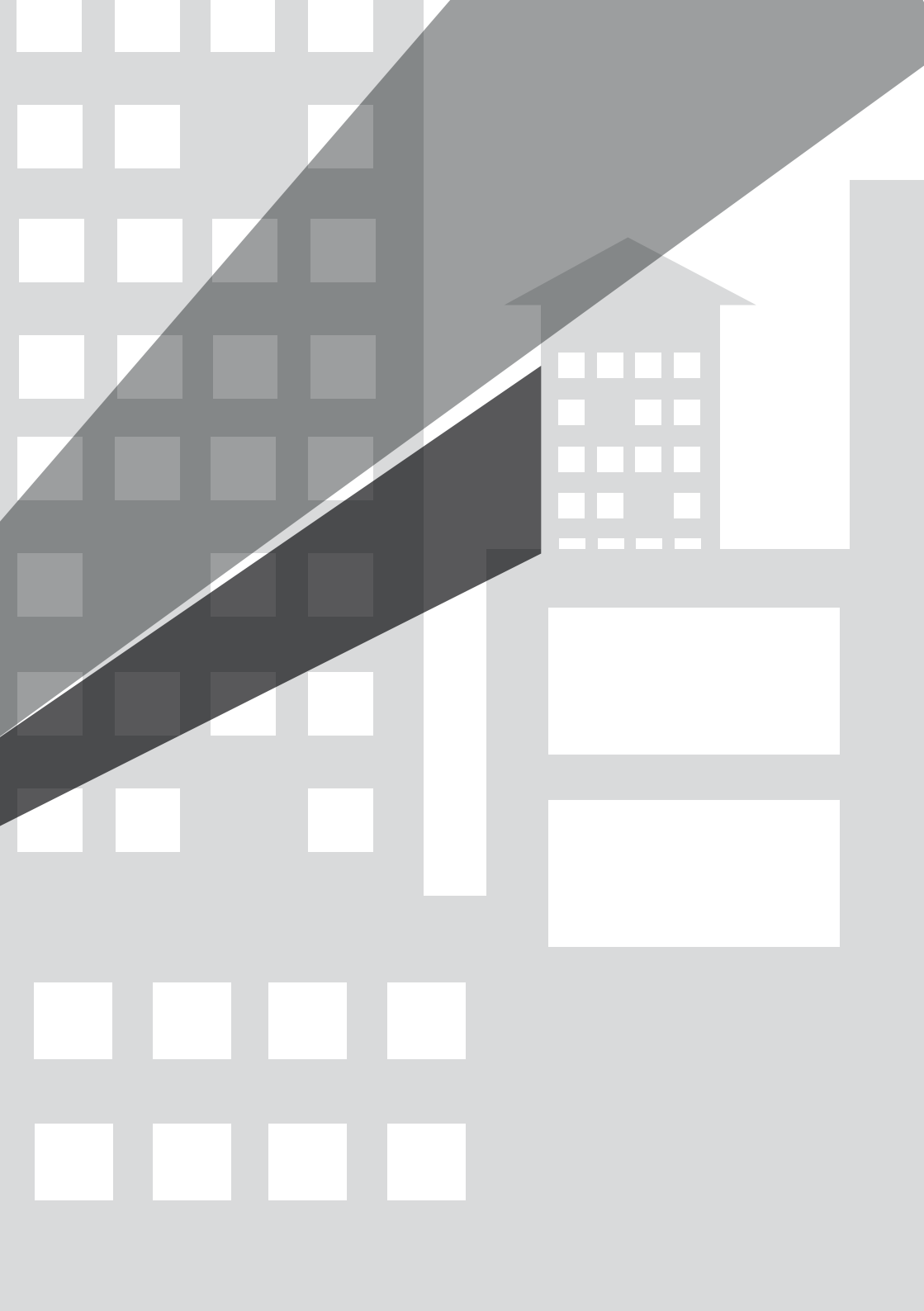
- Étudiant: CADIOU Cyril
- Structure d'accueil: Cabinet de Géomètres Experts dGEma, Montpellier
- Correctrice: LANDES Tania

Analyse der raum-zeitlichen Dynamik von Bodenfeuchte mit Spektralmessungen • p. 133

- Étudiante: MOHR Perrine
- Structure d'accueil: KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Allemagne
- Correcteurs: HINZ Stefan, KELLER Sina (KIT)

Multi-Laserscanner: integration, calibration and evaluation for an Unmanned Aerial System • p. 137

- Étudiant: REYDEL Nicolas
- Structure d'accueil: KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Allemagne
- Correctrice: LANDES Tania



Résumés des PFE

Traitements de nuages de points automatisés et évaluation d'algorithmes de filtrage pour le développement de logiciels liés

PFE présenté par : **Thibaud CAPRA**
Société d'accueil : **Drone Alsace**
Directeur de PFE : **Tristan Freville**
Correcteurs : **Pierre Grussenmeyer**
Matthieu Koehl



1. INTRODUCTION

Ce Projet de Fin d'Études est effectué pour l'entreprise Drone Alsace, au sein du laboratoire de photogrammétrie de l'INSA de Strasbourg. Drone Alsace est opérateur de drone civil dans les domaines de la géomatique, de l'inspection technique et de l'audiovisuel. En s'appuyant sur une flotte conséquente de drones spécifiques à chaque application, Drone Alsace peut alors intervenir dans de nombreux domaines : topographie et cartographie, modélisation 3D, inspection technique, géomagnétisme...

L'objectif principal de ce Projet de Fin d'Études est d'automatiser au maximum les traitements de données photogrammétriques par drone en développant un processus de traitement automatisé des données afin d'obtenir une méthode répétable avec d'autres données. Les essais sont effectués sur le Golf de la Wantzenau, situé au Nord de Strasbourg.

Les traitements effectués sont donc séparés selon deux applications, et orientent les travaux en deux parties distinctes : l'une pour Green 3D Mobile (G3DM), focalisée sur l'automatisation des calculs via Python, l'autre pour Green 3D Reconnaissance (G3DR), où la principale tâche est d'évaluer la performance de l'algorithme de filtrage utilisé lors du processus, afin d'en valider la robustesse et de l'intégrer à la chaîne de traitement en découlant.

2. AUTOMATISATION DES CALCULS PAR PYTHON

L'établissement d'un cahier des charges est donc nécessaire afin de définir le format de chacun des livrables ainsi que leur poids maximal. En plus de définir des contraintes quant à leur forme finale, le cahier des charges permet de donner une idée générale du workflow à développer. Les critères retenus sont présentés dans le Tableau 1.

Livrable	Conditionnement
Maillage	60000 faces Approche / 60000 faces Green
Texture	2048 x 2048 px / 1 tuile
Orthophotographie	Résolution au sol : 2.5 cm/px
Géoréférencement	Lambert 93 / CC48
Taille maximale du package / golf	250 Mo

Tableau 1 : Conditionnement des livrables pour Green 3D Mobile

Les fichiers sont destinés à être traités dans Unity afin d'obtenir les modèles finaux et être intégrés à l'application G3DM. Ces traitements étant automatisés, il faut que les fichiers fournis à l'issue des traitements PhotoScan soient ordonnés et respectent des normes régulières. Nous avons donc défini une nomenclature permettant d'organiser les fichiers pour que la chaîne de traitement sous Unity soit fonctionnelle. Celle-ci se base sur les noms des fichiers, il faut veiller à organiser et nommer convenablement ceux-ci. Enfin, la structure des golfs en plusieurs types de parcours (Standard, Compact et Practice) oblige à séparer ceux-ci en sous-dossiers pour chaque type de parcours, et à renuméroter à partir de 1 chaque trou. On obtient donc l'arborescence finale (Fig. 1).



Figure 1 : Nomenclature et organisation des fichiers à exporter

Plusieurs étapes empêchent de traiter de manière entièrement automatisée les données et obligent à séparer la chaîne de traitement en deux scripts avec une intervention humaine entre ceux-ci. Enfin, un troisième script traitera les données en vue d'obtenir le modèle global de G3DR (Fig. 2). La chaîne de traitement semi-automatique pour G3DM est intégralement effectuée en 21 heures, dont environ un tiers du temps compté en traitements manuels.

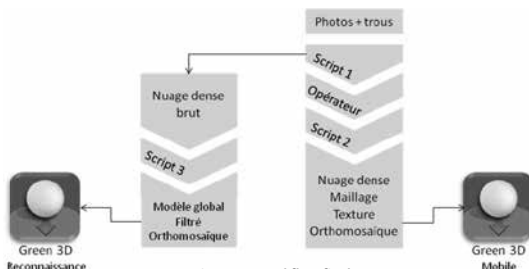
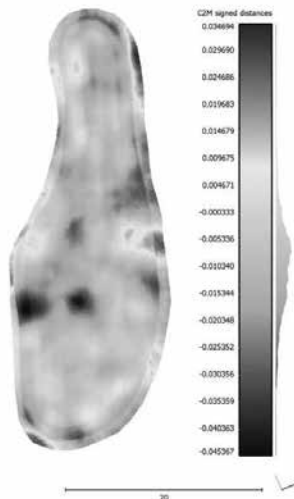


Figure 2 : Workflow final



La qualité des données produites doit être vérifiée. À l'aide d'un scanner laser FARO Focus 3D X120, nous avons relevé l'approche du trou numéro 18 du golf de la Wantzenau. Le nuage de points issu du scanner laser n'est pas géoréférencé. On procède donc à une transformation spatiale grossière puis une ICP (Iterative Closest Point) afin de remplacer le nuage sur le maillage et obtenir des écarts relatifs (Fig.3).

Sur le green, zone devant être la moins entachée de défauts, ces erreurs sont réduites à un maximum $M_{max} = +3,5 \text{ cm}$, et un minimum de $M_{min} = -4,5 \text{ cm}$. La moyenne est de $m = -1 \text{ cm}$ et l'écart-type est de $= +1,2 \text{ cm}$. On peut considérer les modèles alors générés comme bons et valider intégralement la procédure de traitement pour Green 3D Mobile.

Figure 3 : Distances nuage-maillage (CQ)

3. L'ALGORITHME DE FILTRAGE PHOTOSCAN

Maintenant que l'automatisation de Green 3D Mobile est maximisée, il faut automatiser les traitements destinés à Green 3D Reconnaissance. L'objectif est d'obtenir un modèle nettoyé de tous les arbres, des étendues d'eau et autres éléments hors-sol. Pour cela, il est prévu d'utiliser l'algorithme de filtrage de PhotoScan, car celui-ci est directement intégré au logiciel. Néanmoins, dans une démarche de rigueur, il faudra d'abord évaluer la qualité de cet algorithme en le comparant à un autre algorithme dont les performances ont déjà été prouvées : CSF, Cloth Simulation Filtering.

La taille du golf de la Wantzenau (75 ha) est rédhibitoire pour effectuer un filtrage manuel des données. Bien que les deux algorithmes puissent parfaitement être lancés sans problème sur de telles surfaces, la création de données de références manuelles serait bien trop longue sur l'ensemble du domaine. Il faut donc choisir une zone présentant plusieurs éléments complexes pour le filtrage automatique, de taille raisonnable (Fig. 4).

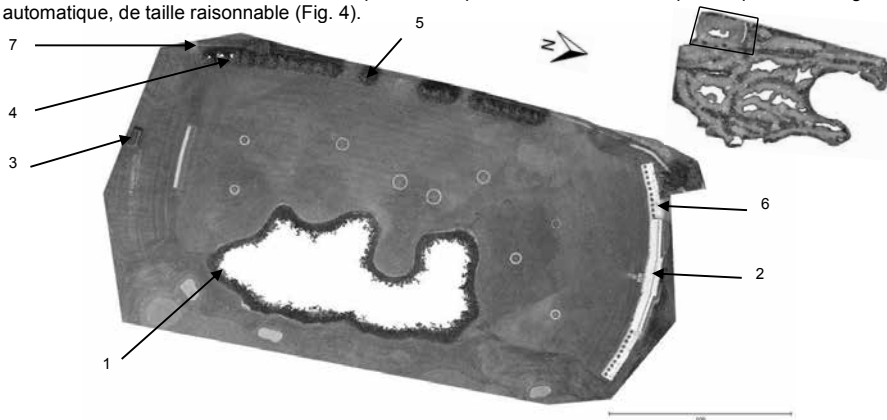


Figure 4 : Zone échantillon pour l'évaluation de l'algorithme de filtrage de PhotoScan

La zone choisie est le driving range du Golf de la Wantzenau, car celui-ci contient une grande variété d'éléments pouvant présenter des difficultés aux algorithmes de filtrage automatique :

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Un lac artificiel, avec des berges | 5. Des arbres isolés |
| 2. Un grand bâtiment | 6. Des pentes raides |
| 3. Un petit bâtiment | 7. De la végétation sur les pentes |
| 4. Des groupes d'arbres | 8. Des points aberrants (non visibles) |

Le nuage échantillon est constitué de 4 487 746 points. Notre classification manuelle classe 3 795 421 points en BE (*Bare-Earth*, points du sol), en laissant 692 325 points en OBJ (*Object*, points hors-sol). La classification selon PhotoScan classe 3 904 515 points dans la classe BE, et 583 171 points dans la classe OBJ. Au total, 4 487 686 points ont été classifiés sur les 4 487 746 de la zone échantillon, 60 points n'ont donc pas été traités. La classification selon CSF classe 3 934 519 points dans la classe BE, et 553 227 points dans la classe OBJ. La totalité des 4 487 746 points de la zone échantillon ont été classifiés.

Afin d'évaluer la qualité du filtrage automatique, on effectue des soustractions nuage-nuage, entre la référence manuelle BE et le nuage filtré OBJ. Les points communs sont erronés, représentés en gris sur la figure ci-contre. (Fig. 5). Cela permet une évaluation qualitative des données. L'évaluation quantitative est effectuée en calculant les taux d'erreurs de Type I, Type II et Totale (Sithole & Vosselman, 2003), ainsi que le coefficient Kappa (Cohen, 1960 ; Girard & Girard, 2010).

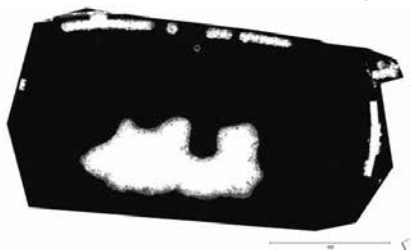


Figure 5 : Erreurs de classification

$$\begin{aligned} \text{Type I} &= \frac{a}{BE} \\ \text{Type II} &= \frac{b}{OBJ} \\ \text{Erreur totale} &= \frac{a + b}{BE + OBJ} \\ \kappa &= \frac{|N \cdot \sum_{i=1}^I x_{ii} - \sum_{i=1}^I (x_{i+} \cdot x_{+i})|}{N^2 - \sum_{i=1}^I (x_{i+} \cdot x_{+i})} \end{aligned}$$

Les erreurs de Type I correspondent à des erreurs de commission, la classification erronée de points hors-sol en tant que sol. Les erreurs de Type II correspondent à des erreurs d'omission, la classification erronée de points du sol en tant qu'hors-sol. L'ensemble des résultats est obtenu grâce aux matrices de confusion (Tab. 2).

CSF		Inutillisés		0	
Filtré					
Référence	BE	OBJ			
BE	3777326	18095	3795421	84,57%	
OBJ	157193	535132	692325	15,43%	
	3934519	553227	4487746		
	87,67%	12,33%			
Ratio BE-OBJ / OBJ-BE				0,12	
Type I	0%	Erreur Totale		4%	
Type II	29%	Coeff. Kappa		96%	

PhotoScan		Inutillisés		60	
Filtré					
Référence	BE	OBJ			
BE	3776991	17470	3794461	84,55%	
OBJ	127524	565701	693225	15,45%	
	3904515	583171	4487686		
	87,01%	12,99%			
Ratio BE-OBJ / OBJ-BE				0,14	
Type I	0%	Erreur Totale		3%	
Type II	23%	Coeff. Kappa		97%	

Tableau 2 : Matrices de confusion pour l'évaluation des performances des algorithmes de filtrage

Les erreurs de Type II viennent de la classification des berges. Ne faisant pas la différence entre points sous l'eau et points hors de l'eau, les critères de classification sont validés et engendrent des points faux. Néanmoins, on observe un taux d'erreur totale très bas (3%) et un excellent coefficient Kappa (97%). L'algorithme de filtrage de PhotoScan est donc considéré comme robuste et peut être utilisé dans la chaîne de traitement pour Green 3D Reconnaissance. Celle-ci est principalement constituée du filtrage puis du maillage du sol ainsi que de sa texture. Le maillage présentant des trous en lieu et place de l'eau et des arbres, un traitement final de ces maillages permet de dessiner automatiquement les contours de ces trous afin d'y insérer des textures d'eau convenables ainsi que des modèles d'arbres de meilleure qualité que ceux obtenus par photogrammétrie.

4. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Ce sujet de Projet de Fin d'Études est séparé en deux parties distinctes : Green 3D Mobile et Green 3D Reconnaissance. Au final, l'ensemble des traitements semi-automatiques représentent un temps de traitement de 24 heures, où seulement un tiers des traitements sont manuels.

Afin d'augmenter la part d'automatisation des traitements, plusieurs conditions et développements doivent voir le jour. D'abord, la manipulation des boîtes de traitement dans PhotoScan et l'automatisation du dessin et de l'export des fichiers de formes permettrait d'automatiser très largement les traitements liés à Green 3D Mobile, actuellement automatisé à environ 70%. Concernant Green 3D Reconnaissance, la manipulation de l'outil *Rasterize* de CloudCompare, et plus particulièrement du dessin des courbes de niveaux, en C++, permettrait d'automatiser les traitements pour G3DR à 100%. Une autre piste d'automatisation utilisant ce langage des traitements pour G3DR est l'utilisation de LASTools¹, permettant de générer des polygones depuis les trous du modèle. Ceux-ci pourront alors être texturés. Néanmoins, il reste toujours le problème de l'identification des zones à traiter comme les greens et approches, pour lequel il est difficile de remplacer l'œil humain.

RÉFÉRENCES

1. Cohen, J., 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, XX(1), pp.37–46.
2. Girard, M.-C. & Girard, C., 2010. *Traitement des Données de Télédétection : Environnement et Ressources Naturelles* 2nd ed. Dunod, ed., Dunod.
3. Sithole, G. & Vosselman, G., 2003. ISPRS Test on Extracting DEMs from Point Clouds: A Comparison of Existing Automatic Filters - Full Report. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25(7), p.28.

¹ LASTools est un logiciel de traitements de données LIDAR développé par Martin Isenburg pour Rapidlasso GmbH – Site internet : <http://www.lastools.org>

Modélisation 3D du Souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données Graffiti avec QGis.

PFE présenté par : **Pierre Jules André Caron**
Société d'accueil : **C.C. du Territoire Nord Picardie**
Laboratoire ICube UMR 7357, équipe TRIO
Directeur de PFE : **Mathieu Beuvin**
Correcteurs : **Mathieu Koehl et Pierre Grussenmeyer**



1. Introduction

La célébration du centenaire de la Première Guerre Mondiale fait naître de nombreux projets qui ont en commun l'idée du devoir de mémoire. C'est notamment dans ce contexte que s'inscrit le projet de la numérisation de la cité souterraine de Naours. D'autres projets similaires à celui-ci ont également été réalisés. Citons le projet de numérisation des souterrains de Maison Blanche à Neuville-Saint-Vaast, mené par un étudiant du Laboratoire de l'INSA, ou encore la numérisation des souterrains de la ville d'Arras. Tous ces projets ont pour objectif la mise en valeur et la conservation du patrimoine dans les Hauts-de-France.

2. Le contexte et l'histoire

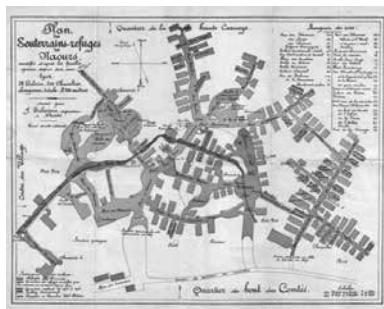


Figure 1: Plan de Balesdens (1905)

Ces Graffitis suscitent aujourd'hui l'intérêt des archéologues et la curiosité du public. C'est une des raisons qui a poussé l'archéologue responsable du site, Gilles Prilau, à initier le projet de réalisation d'un modèle 3D des lieux et à concevoir une base de données (« Graffiti ») afin de recenser toutes les traces présentes dans le souterrain, laissées par des soldats de nationalités différentes.

L'objectif de ce Projet de Fin d'Etudes est donc de poursuivre la numérisation de la cité souterraine de Naours afin que celle-ci soit entièrement modélisée. Une seconde partie sera consacrée à la mise en place d'une Interface Graphique qui permettra d'exploiter les données contenues dans la base de données Graffiti.

3. Les travaux préalables

Les travaux de modélisation de la Cité Souterraine ont débuté en octobre 2015 avec le Projet de Recherches Technologiques (PRT) mené par Maxime Balland et Joseph Guillerey. Les travaux ont ensuite été poursuivis par Maxime Balland au cours de son Projet de Fin d'Etudes (PFE) intitulé *Numérisation 3D dans le souterrain de Naours et intégration des données 3D de la base de données Graffiti*. Durant ce PFE, une partie importante a fait l'objet de numérisations à l'aide du Scanner Laser Faro et de restitutions photogrammétriques afin de modéliser avec précision les Graffitis laissés par

les soldats Australiens et Américains. Ces deux techniques d'acquisition ont permis de réaliser un modèle 3D qui a été présenté au travers d'une vidéo disponible sur le site de la cité souterraine. Une seconde partie de ces travaux a été consacrée à l'implémentation en Python d'un outil (Q3DView) de visualisation de modèle 3D ou de nuages de points.

Un second Projet de Recherches Technologiques m'a permis de poursuivre la numérisation du souterrain.

4. Missions de terrain

L'ensemble des travaux a représenté 6 missions de terrain, c'est-à-dire près de 20 jours de terrain durant lesquels un réseau de polygonation a été mis en place, la totalité du souterrain a été numérisée, et de nombreuses parois photographiées.

Pour mener à bien les missions de ce projet, nous avons des outils et instruments mis à disposition par la plateforme Topographie de l'INSA à savoir un Scanner Laser Faro Focus X330, un tachéomètre Leica TS02 et des appareils photos reflex (Canon 5Dsr) permettant de réaliser la restitution des parois en photogrammétrie.



5. Présentation des travaux de modélisation

Topographie et Lasergrammétrie



Plusieurs étapes ont rythmé ce Projet de Fin d'Etudes. La première consistait à calculer le cheminement polygonal réalisé à l'aide du Tachéomètre TS02. Le cheminement a été utilisé pour géo-référencer les nuages de points.

Suite à la mission de terrain, la seconde étape consistait à consolider puis géo-référencer les nuages de points à l'aide du logiciel SCENE (FARO). Les données ont été exportées au format « .fls » afin de pouvoir les importer dans plusieurs autres logiciels de traitement.

CloudCompare a ensuite été utilisé pour ré-échantillonner, nettoyer les nuages de points et enfin réaliser le maillage pour construire la volumétrie du souterrain. Le maillage a été réalisé sur un nuage de points échantillonné à 3 cm.

Enfin, le logiciel 3DReshaper a permis de texturer le modèle à l'aide des vues planaires en nuances de gris ou en couleurs que l'on a exportées depuis le logiciel SCENE. Afin que la texture puisse s'appliquer correctement, un lissage du modèle était nécessaire pour diminuer les ruptures importantes dues à l'irrégularité des parois du souterrain. Deux applications, Irfan View et Photofiltre, ont permis respectivement, de redimensionner les hauteurs des vues planaires et de faire disparaître, à l'aide de retouches, les artefacts présents dans les scènes tels que les sphères ou les câbles par exemple.

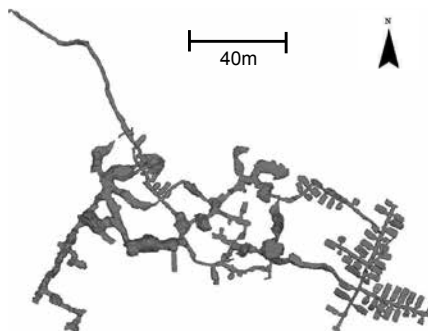


Figure 2: Modèle 3D du souterrain de Naours (2017)

Au cours de ces travaux, un second processus d'application de texture a été mis en place dans le but d'obtenir un résultat encore plus réaliste. Pour cela, les techniques de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie ont été combinées. Le modèle de la volumétrie a été obtenu à partir des nuages de points consolidés et géo-référencés grâce aux sphères placées dans l'environnement du scanner au moment de l'acquisition. Le Canon 5DSR muni du flash longue portée (600 EX-RT) a été utilisé pour acquérir des photographies des parois. Les prises de vues devaient respecter les 3 x 3 règles du CIPA afin de pouvoir réaliser l'alignement des photos lors de l'étape du traitement. Des cibles ont été positionnées dans les scènes puis levées au tachéomètre TS02 afin de pouvoir géo-référencer la position des photographies. Une fois les photographies alignées, le modèle 3D issu de la lasergrammétrie a été importé dans le logiciel Agisoft Photoscan puis texturé à partir des photos préalablement alignées.

La photogrammétrie



La photogrammétrie a été employée afin de modéliser avec une haute précision les parois du souterrain sur lesquelles les soldats de toutes nationalités ont inscrit des Graffiti. Ce PFE a permis de restituer 7 parois. L'ensemble des missions de terrain des deux Projets de Recherches Technologiques et des deux Projets de Fin d'Etudes ont permis de restituer 27 parois, ce qui représente une partie importante des 3000 Graffiti. Le logiciel Agisoft Photoscan a été utilisé pour traiter l'ensemble des photographies. La réalisation du modèle 3D nécessite plusieurs étapes: l'alignement des photos, la densification du nuage de points, le maillage puis la création de la texture. Enfin, des ortho-photos des parois ont été créées afin de fournir aux archéologues un support de travail à haute résolution.

La vidéo

Les travaux de modélisation et la cité souterraine sont valorisés grâce à la réalisation d'une vidéo qui a constitué l'étape finale de ce projet. Une vidéo combinant la réalité, le virtuel et les Graffiti a été conçue en collaboration avec Renan Larzul, membre du service Informatique et Communication de l'INSA Strasbourg. Cette vidéo sera diffusée sur le site touristique de la cité souterraine de Naours et pourra être consultée sur le site internet de la cité souterraine de Naours.

6. L'Interface Graphique



Afin de recenser tous les Graffiti présents dans le souterrain, une base de données a été créée en 2015 par Caroline Font (infographe et cartographe) et Thierry Hardier (historien spécialiste des traces épigraphes). Cette base de données a été conçue avec le Système de Gestion de base de données PostgreSQL. Le Gestionnaire de bases de données Libre Office Base permet quant à lui de compléter celle-ci. Les travaux de ce PFE ont pour objectif de créer une Interface Graphique qui permette d'exploiter les données de la base de données Graffiti. Pour cela, il a été décidé d'utiliser le logiciel de Système d'Information Géographique Libre QGIS afin de créer l'Interface Graphique sous la forme d'une extension appelée Plug-in. Le corps de l'Interface Graphique a été élaboré à l'aide de l'application Qt Designer et l'implémentation du script permettant la connexion à la base de données a été réalisée avec le langage Python et l'éditeur de texte Notepad++.

La base de données Graffiti se compose selon plusieurs Tables (Figure 3) dans lesquelles se trouvent plusieurs champs (Figure 4). Parmi ces tables, nous avons utilisé principalement la table « TRACE » qui contient les informations essentielles qui intéressent les scientifiques. Notamment les Nom, Prénom, Nationalité, Date de naissance et de décès des soldats.

Liste_Support
Liste_ThemePrincipal
Liste_Type_Modele
raster_columns
raster_overviews
spatial_ref_sys
SsTheme
Trace
Trace_Image
Trace_Internet

Figure 3: Liste des tables

Nom	Prenom	Date_Naiss	Date_Deces	UniteMili
AWAREING	Frank			RAMC
Nelson	H.W.			17 aero squadron
LANGLEY	F.W.			151 C Coy 2 AUSTI
Mc NAMARA	B.J.			148 aero squad
BUEK	H (ou W)			17 aero squad
PASSEYME	E.E.			
Mc WILSON				17 aero squad
WELLBORN	(C). A.			17 aero squad

Figure 4: Champs de la liste « Trace »

L'Interface Graphique permet à l'utilisateur d'effectuer des requêtes sur la base de données. L'utilisateur pourra donc faire de multiples requêtes, qu'il pourra rendre restrictives afin d'affiner ses recherches sur un soldat dont il connaît plusieurs éléments d'identité.

Lorsque l'utilisateur parvient à identifier un soldat dans la base de données, il lui est possible de visualiser une photographie du Graffiti du soldat mais également la photographie du soldat à condition que celles-ci soient présentes dans la base de données. Une seconde fonction donne la possibilité à l'utilisateur d'exporter les coordonnées géo-référencées d'un ou plusieurs Graffiti permettant ainsi de localiser le Graffiti du soldat ou les Graffiti d'un groupe de soldats sur un plan 2D. Ce plan pourra être intégré dans QGIS sous forme de couche. Les coordonnées géo-référencées exportées depuis l'Interface Graphique peuvent être superposées au plan 2D.

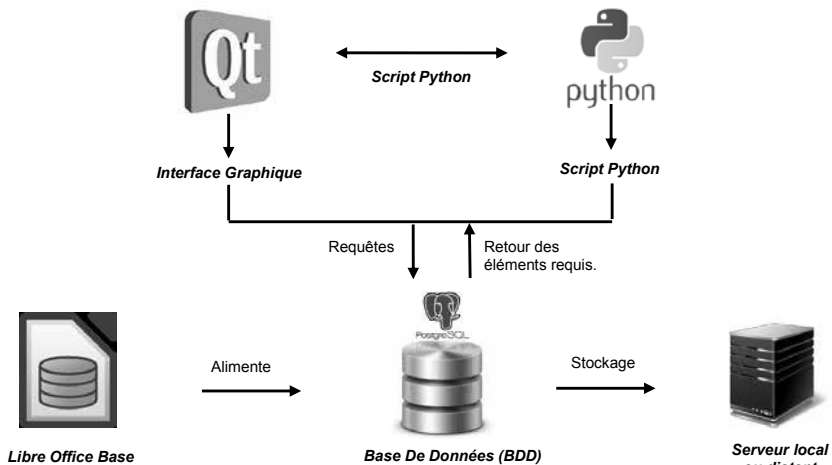


Figure 5: Schéma d'interaction entre les différents éléments nécessaires au fonctionnement du Plug-in.

7. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis de finaliser la numérisation et la construction du modèle 3D du souterrain. La numérisation du souterrain a permis de répondre aux nombreuses attentes de la communauté de communes et de la cité souterraine à savoir la constitution d'une archive de la volumétrie et des Graffitis, la mise à jour du plan du souterrain de 1905 ainsi que la détermination de la position du souterrain par rapport à son environnement extérieur et par rapport au cadastre. Ce projet avait une réelle fonction de conservation et de mise en valeur du patrimoine.

L'implémentation du Plug-in Python a permis d'élaborer un outil d'exploitation de la base de données pour les scientifiques, c'est-à-dire les archéologues ainsi que les historiens. Lorsque la base de données sera entièrement complétée, les archéologues pourront établir des statistiques sur les soldats qui ont visité ce souterrain. Puisque de nombreux souterrains des Hauts-de-France cachent des Graffitis, il pourrait être intéressant d'utiliser ce Plug-in pour exploiter ces Graffitis.

Bien que l'ensemble du souterrain ait été couvert par lasergrammétrie, de nombreux travaux peuvent encore être réalisés sur ces vestiges. En effet, il serait intéressant de poursuivre les travaux avec la mise en place d'un système de réalité virtuelle augmentée. En ce qui concerne l'interface graphique, il serait intéressant d'intégrer les scripts Q3DView et QGIS2DB établis par Maxime Balland et Arnaud Breitwieser au cours de leurs Projets de Fin d'Etudes de 2016. Le script Q3DView permettrait d'afficher un modèle 3D dans une seconde interface graphique et le script QGIS2DB permettrait de convertir des fichiers ASCII ou DXF en table SQLite. En parallèle de l'interface graphique une interface de consultation en ligne pourra être réalisée pour le grand public.

Références :

- Prilaux Gilles et Beuvin Matthieu, « Australie sera là ! Les soldats voyageurs de Naours », *Tranchées*, n°27, 2016, p. 48-55.
- Prilaux Gilles et Beuvin Matthieu, « La plus grande concentration de graffitis de la Grande Guerre », *Archéologia*, n° 548, novembre 2016, p. 36-37.
- Balland, M. (2016). Numérisation 3D dans les souterrains de Naours et intégration des données de la base de données Graffiti, *Mémoire de Projet de Fin d'Etude, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg*, pp.1-83.
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Guillemin, S., Prilaux, G. 2017. Centenary of the Battle of Vimy (France, 1917): Preserving the memory of the Great War through 3D recording of the Maison Blanche souterraine. *Proceedings of the XVth CIPA Symposium – Digital Workflows for Heritage Conservation*, Ottawa, Canada, 28 août – 1 septembre 2017.
- University of Otago, (2015). *LIDARRAS. Digging into our history, surveying our heritage*. [En ligne] Disponible à: <http://www.otago.ac.nz/lidarras/index.html> [Dernier accès le 05.07.2017]

Apport d'une solution visuelle 3D de la montée des eaux en période de crue au sein de l'entreprise TECHNIDRONE.



PFE présenté par : **Claire BEVENGUT-CHATONEY**
Société d'accueil : **TECHNIDRONE**
Directeur de PFE : **Michael PASTOR**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



1. Cadrage & objectifs

a- Introduction

L'eau a toujours été une ressource importante. Sa gestion est une des thématiques qui intéresse au plus haut niveau les élus. Ces derniers manifestent un réel besoin d'outils permettant la mesure et la gestion au quotidien de cette ressource. Les drones, avec leur développement actuel, présentent un fort potentiel dans l'étude de phénomènes à évolution rapide, comme les inondations. L'entreprise TECHNIDRONE qui a déjà quelques années d'expérience dans l'utilisation des drones en topographie, a souhaité s'intéresser au sujet. C'est dans ce contexte que le sujet de mon Projet de Fin d'Etudes a été proposé à l'INSA. Les résultats et les conclusions qui seront tirés de mon travail, permettront à l'entreprise d'apprécier les opportunités qui s'ouvrent à elle sur ce marché et éventuellement de diversifier son offre de services dans ce nouveau secteur d'activité.

b- Contexte

Le changement climatique est un phénomène dont l'existence n'est plus remise en cause par la communauté scientifique et dont l'impact est malheureusement grandissant. Les banquises fondent, les saisons ne se ressemblent plus d'une année sur l'autre et les catastrophes naturelles sont de plus en plus violentes. En se focalisant sur le Sud de la France, sur une courte échelle de temps, il est déjà possible de répertorier des événements naturels destructeurs dont une part importante d'inondations.

TECHNIDRONE a son siège à BAIX, une commune située en Ardèche. Le climat de ce département est typiquement cévenol. Ce climat se caractérise par de violents orages en automne et au printemps. Il en résulte d'importantes précipitations en un court laps de temps, provoquant des « crues éclairées » dans des rivières ou ruisseaux qui sont la plupart du temps desséchés. En plus des mouvements d'eau importants qui se produisent lors de ces événements, de dangereux transports solides sont aussi recensés. L'anthropisation croissante des cours d'eau n'améliore pas leurs écoulements. L'Ardèche est aussi un département côtier du Rhône qui a enregistré d'importantes inondations engendrant d'énormes dégâts, matériels et humains, tout au long de son histoire. Les crues de 1840 et de 1856 sont ainsi devenues les crues de références.

Les recherches réalisées au début de mes travaux m'ont permis de constater l'absence de solution permettant de visualiser en trois dimensions une inondation. Il existe des mesures préventives telles que les Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI) qui représentent, sous forme de rapports et de cartes, le résultat d'études relatives aux risques de crues. Cependant ces cartes sont générées par des spécialistes et ne sont pas toujours facilement compréhensibles par des personnes non initiées en matière de cartographie. Les élus locaux sont demandeurs d'outils permettant de visualiser et d'appréhender simplement l'information. La 3D, qui se rapproche le plus de la vision humaine, permet une bonne appropriation du lieu d'étude et une meilleure compréhension des enjeux et des risques.

Bien que les drones soient aujourd'hui largement utilisés pour la modélisation et la visualisation de divers objets et phénomènes en trois dimensions, leur potentiel n'a pas encore été testé pour l'étude

des phénomènes d'inondations. Ce sujet va ainsi s'intéresser aux possibilités offertes par les drones pour la modélisation et la visualisation 3D de crues.

c- Objectifs

Les objectifs de cette étude ont consisté en la mise en place d'un protocole d'acquisition, de traitement et de visualisation 3D d'une inondation à partir de données drones. Pour cela, plusieurs étapes ont pu être listées :

- la génération d'une maquette de la zone d'étude à partir de relevés photogrammétriques par drone,
- la création d'une modélisation hydraulique basée sur des études hydrauliques spécifiques aux lieux d'études,
- l'intégration du résultat de la modélisation hydraulique à la maquette 3D,
- la mise en place de rendus permettant l'exploitation et l'appropriation des résultats obtenus par les élus.

2. Qu'est-ce qu'une inondation ?

Tout d'abord, il est important de définir ce qu'est une inondation. L'inondation est un phénomène de submersion d'un espace terrestre qui peut être naturel ou artificiel. Durant une inondation, l'eau déborde de son lit et impacte les zones environnantes de manière plus ou moins importante. En cas de méconnaissance du phénomène, d'importants dégâts peuvent être enregistrés. Afin de délimiter les zones inondables et ainsi de prévenir le risque, les PPRI ont été créés. Les inondations ont des périodes de retour de 10, 30, 100 ou 1000 ans. Pour effectuer ces statistiques, la crue de référence est celle étant recensée comme la plus importante jamais connue.

Un cours d'eau se définit par son lit mineur, dans lequel coule habituellement l'eau, et par son lit majeur visible, qui permet d'identifier les niveaux d'eau les plus hauts jamais atteints. Il se caractérise aussi par son bassin versant qui regroupe toutes les eaux susceptibles d'atterrir dans son lit.

En France, il existe différents types de crues retenus par la communauté scientifique :

- les inondations lentes de plaines ou par remontée de nappes,
- les crues des rivières torrentielles formées rapidement par des averses violentes,
- les crues rapides des bassins périurbains dues au ruissellement de l'eau, à l'imperméabilisation des zones et à la saturation des réseaux d'écoulements.

3. La réponse aux objectifs fixés

Afin de répondre à ces objectifs, différents logiciels étaient à ma disposition tels que MENSURA GENIUS, PIX4D, Cloud Compare, QGIS... A ceux-ci j'ai rajouté un logiciel de modélisation hydraulique, HEC-RAS et un logiciel de modélisation 3D, SketchUp.

Les missions de relevé par drone ont été réalisées par une aile volante « EBEE » de la marque Sensefly. C'est un drone civil de moins de 2kg qui peut être utilisé dans tous les types de scénarios de vols définis par la législation française.

a- Site de l'étude

Pour tester et valider mon travail, il a été décidé de s'intéresser à un lieu d'étude de manière approfondie. Le choix de ce lieu s'est porté sur la rivière du Lavezon qui traverse la ville de Meysses. Une étude pour la communauté de communes de Meysses avait été réalisée en 2008 indiquant des données de débits, indispensables pour réaliser une modélisation hydraulique sous HEC-RAS. Ces données, si elles n'étaient pas existantes, auraient dû être relevées à l'aide de stations hydrométriques, ce que ne possède pas TECHNIDRONE.

b- Création d'une maquette réaliste

L'idée principale était de créer une maquette suffisamment réaliste pour qu'elle permette aux élus de la commune de s'y repérer facilement grâce à la vision 3D. Pour cela, la maquette réalisée sera du type LOD1 d'après la norme city GML. Ce niveau de détail 1 représente une vue urbaine avec des bâtiments à toits plats.

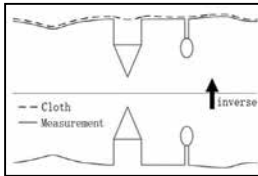


Figure 1: Principe de la méthode CSF décrite par les auteurs

Tout d'abord, le nuage de points a été nettoyé via Cloud Compare et grâce au nouveau plugin développé conjointement par Wuming Zhang, Jianbo Qi et Peng Wang nommé CSF Filter. Cet outil permet de filtrer les points du sol et du sursol en fonction de critères tels que la forme du terrain et la taille de la cellule concernée pour les calculs. Il segmente ensuite en deux nuages « ground » et « offground », le nuage initial. Un filtre anti bruit a ensuite été appliqué afin d'éliminer le maximum de points aberrants. Puis le nuage obtenu a été rééchantillonné avec un pas de 2 mètres afin de garantir une opérabilité dans les autres logiciels qui limitent le nombre de points utilisables.

Le nuage final a ensuite été importé sous Mensura et maillé. Certains triangles encore aberrants ont été supprimés. Les emprises des bâtiments ont été détournées sur l'orthophotographie générée par PIX4D, importée sous Mensura. Puis, grâce à l'outil « modeleur de bâtiments » de Mensura, les bâtiments ont été générés un à un afin de respecter leur hauteur vraie.

Pour une meilleure compréhension, j'ai texturé certaines façades et toutes les toitures, le plus fidèlement possible à l'aide d'une palette de textures prédéfinies. Des arbres et quelques voitures ont aussi été rajoutés afin d'augmenter le réalisme de la maquette.

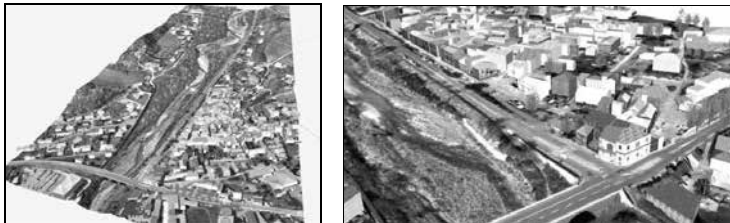


Figure 2: Visualisation de la maquette finale

c- Modélisation hydraulique du Lavezon

L'hydrologie est un domaine à part entière dans lequel des spécialistes sont nécessaires pour une bonne analyse des différentes situations. Deux méthodes sont utilisées en fonction du type de cours d'eau étudié. Lorsque le cours d'eau est sinueux et encaissé, une méthode qualitative, est utilisée à savoir l'hydrogéomorphologie. C'est donc par analyse de photographies aériennes et du terrain que les spécialistes déterminent les lits mineurs et majeurs du cours d'eau concerné. La seconde méthode, plus mathématique, est l'étude hydraulique. Trois modèles mathématiques permettent d'effectuer une étude hydraulique :

- Boîte noire : seules les variables d'entrées et de sorties sont ajustées
- Conceptuel : par échange de flux sous forme de résolution numérique
- Mécaniste : le plus souvent, la résolution des équations de Saint-Venant pour les écoulements de fluides. trois critères sont à prendre en compte à savoir la qualité des données, le résultat recherché en sortie et la complexité du site étudié. Ces calculs peuvent être effectués en 1D, 2D et 3D.

Le modèle mécaniste reste le plus utilisé par les hydrologues. En général, la modélisation hydraulique 3D est très peu utilisée car elle demande beaucoup de temps de calcul et ne permet pas de travailler sur d'importantes zones d'études. Les études se font très régulièrement en combinant les modélisations 1D et 2D.

Pour l'étude, c'est le modèle mécaniste 2D qui a été retenu. Pour faire fonctionner le logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS, il a fallu créer un Modèle Numérique de Surface raster via Pix4D, et avoir des hydrogrammes de crues. Ces hydrogrammes existent grâce à une étude effectuée par un bureau d'études pour le compte des collectivités locales. Toute la modélisation hydraulique est basée

sur les résultats de cette étude. Grâce à l'onglet (SIG) RAS Mapper du logiciel, il est possible d'ajouter des couches telles que l'orthophotographie et de visualiser l'emprise qu'occupera l'eau à un instant donné. En lançant la simulation, nous pouvons visualiser l'impact de la crue, la vitesse de l'eau et les hauteurs d'eaux.

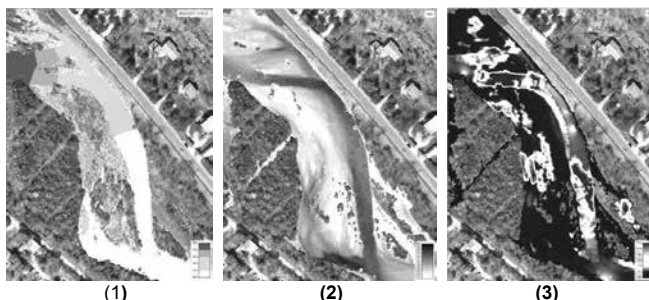


Figure 3: Résultats de la modélisation hydraulique : (1), l'altitude de l'eau, (2) les hauteurs d'eau, (3) la vitesse de l'eau à sa surface

d- Intégration du résultat de la modélisation hydraulique sur la maquette

Après avoir obtenu une modélisation hydraulique cohérente, il a fallu trouver un moyen permettant de convertir le résultat obtenu en 2 dimensions sous HEC-RAS, en 3 dimensions pour l'intégrer à la maquette sous Mensura. HEC-RAS ne permet pas d'exports compatibles avec Mensura. Pour récupérer les contours de chaque couche d'eau à un temps donné, des captures d'écrans ont été réalisées. Elles ont ensuite été géoréférencées sous QGIS afin d'extraire automatiquement les contours d'eau nécessaires pour la suite des travaux. Ces contours devaient tout de même être nettoyés et vérifiés après l'import sous Mensura. C'est ensuite avec le module « plateforme » de Mensura que les différentes couches d'eau ont été créées. Cette opération demande un ordinateur puissant car les calculs sont assez chronophages.

La maquette de base comprenant les bâtiments, les arbres et les voitures a été exportée en fichier COLLADA (.DAE) ce qui l'a rendue lisible par SketchUp. Ce type d'extension conserve les textures et rend le fichier moins volumineux mais ne conserve pas le géoréférencement du modèle. Dans le module visualisation 3D de Mensura, il est possible de générer la plateforme créée précédemment. L'ensemble du modèle peut être exporté en .DAE et nettoyé sous SketchUp en ne conservant que la plateforme qui représente une couche d'eau à un instant donné. Il faut aussi trouver un moyen de recalculer ce groupe sur la base de la maquette (un bâtiment spécifique par exemple). Cette opération est répétée jusqu'à l'obtention d'une maquette .DAE contenant toutes les couches d'eau aux instants conservés.

Sous SketchUp, il est possible de gérer les couches grâce à des calques que l'on peut rendre visible ou non. De cette manière, il est possible de créer une vidéo faisant apparaître successivement les couches d'eau. C'est une manière de les animer et de représenter en 3 dimensions le résultat d'une modélisation hydraulique.

4. En conclusion

Cette étude a permis la mise en place d'un protocole d'acquisition et de traitement permettant, à partir de levés drones et d'hydrogrammes de crues, de modéliser et de visualiser en 3D l'évolution d'une inondation durant une certaine période. Les élus auront à leur disposition un outil de visualisation simple, qui leur permettra de mieux comprendre les risques d'inondation pour leur commune.

Malgré ces premiers résultats encourageants, certains aspects sont à améliorer notamment dans la construction et le nettoyage de la maquette, qui restent encore très chronophages. L'automatisation de certains processus de traitement est à envisager. Des améliorations restent à faire concernant la modélisation des crues pour mieux prendre en compte certains paramètres comme par exemple l'apport des affluents, l'infiltration de l'eau et la forme du bassin entre autres.

Utilisation des GPS en auscultation de précision : Association à un système tachéométrique automatisé

PFE présenté par :

Emilie JOUSSET

Société d'accueil :

SIXENSE Soldata

Directeur de PFE :

Vincent BARBARROUX

Correcteur :

Gilbert FERHAT



1. Contexte et objectif de l'étude

Au cours de ces dix dernières années, de nombreuses recherches ont été effectuées afin d'utiliser la technologie GPS dans le cadre de travaux d'auscultation.

À travers ces études, la technologie de positionnement par satellite a beaucoup évolué. Dorénavant il est possible de mesurer des déplacements millimétriques à partir de réseaux de récepteurs GPS. Ce type de technique permet un contrôle en temps réel des zones de grande étendue. En contrepartie, à coût égal, la densité de points contrôlés est plus faible qu'avec un système optique.

Cette étude a pour objectif d'étudier la faisabilité du couplage de deux méthodes de mesure :

- Un réseau de capteurs GPS,
- Un système tachéométrique automatisé.

Dans un système tachéométrique automatisé les références sont positionnées hors des zones d'influence géotechnique. Un système couplé pourrait permettre de s'affranchir de cette contrainte ou de confirmer que l'on est bien en dehors des zones d'influence.

Il s'agit d'évaluer l'impact sur la précision des données tachéométriques lorsqu'elles sont associées à un réseau de capteurs satellites. L'étude doit également permettre de déterminer la vitesse de réponse d'un tel système lors d'un mouvement. Le comparatif entre temps de réponse, précision et coût doit valider ou non l'intérêt du couplage.

L'objet de ce projet est donc d'étudier, dans un premier temps, la faisabilité et les différentes méthodologies envisagées afin d'aboutir au couplage de ces deux solutions techniques.

Dans un second temps, un travail d'expérimentation est réalisé afin de quantifier l'impact sur la précision et sur le temps de réponse du système lors de l'ajout de la technologie 4DBloc au sein de la chaîne de traitement tachéométrique CYCLOPS existante.¹

Enfin, cette étude propose des pistes de développement afin d'améliorer la méthode expérimentée pour répondre au mieux au cahier des charges fixé par l'entreprise SIXENSE Soldata.

2. Méthodes d'auscultation et intérêt du couplage

L'auscultation de sols ou d'infrastructures consiste en une surveillance continue ou régulière d'une zone d'intérêt. Cette surveillance se traduit par des prises de mesures de différents paramètres. La topographie permet la mesure de phénomènes de déplacements de bâtis ou de sols. Actuellement diverses techniques sont utilisées. On distingue notamment les prises de mesure par procédés topométriques traditionnels automatisés ou manuels ou encore des méthodes d'enregistrement à

¹ 4DBLOC et CYCLOPS sont les noms donnés par SIXENSE Soldata à leurs systèmes de GPS et de tachéomètre automatisés
PFE 2017

distance telles que des procédés interférométriques, photogrammétriques ou encore lasergrammétriques. Les caractéristiques de ces différentes méthodes sont résumées en figure 1.

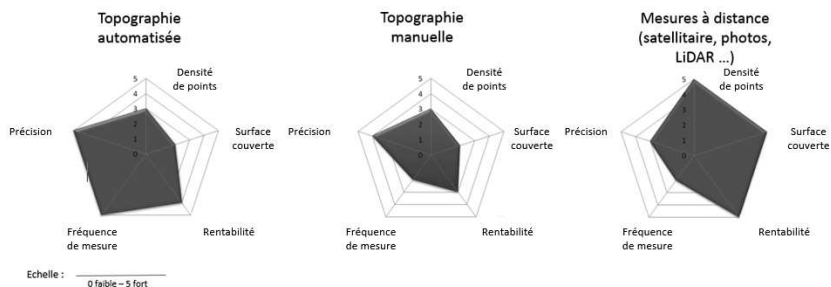


Figure 1 : Diagrammes des caractéristiques des méthodes d'auscultation couramment utilisées

Ces trois méthodes correspondent aux procédés utilisés actuellement au sein de l'entreprise SIXENSE Soldata. Il apparaît donc intéressant de développer une technique de mesure permettant de couvrir une surface importante en conservant la précision des données topométriques, et assurant une fréquence de mesure comparable aux procédés topométriques automatisés.

L'analyse des études sur l'utilisation des GPS en auscultation a permis de retracer les caractéristiques principales de ce type de procédé, résumées dans la figure 2.

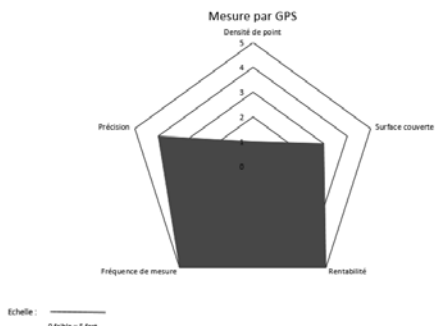


Figure 2 : Diagramme des caractéristiques des mesures 4DBlocs

3. Description des capteurs 4DBloc

Les capteurs GPS choisis pour l'étude sont des capteurs nommés 4DBloc. Cette technologie consiste en une mise en réseau de capteurs permettant la surveillance des mouvements de sols et de structures de zones limitées en surface. SIXENSE Soldata travaille sur ce système de réseau de capteurs depuis 2006.

Au sein d'un réseau 4DBloc on distingue trois entités principales résumées dans la figure 3 : le réseau de récepteurs GPS, le coordinateur qui est le centre de gestion et de calcul du réseau ainsi que la plate-forme d'accès à la configuration du système.

Les récepteurs GPS correspondent aux points auscultés. On distingue les récepteurs fixes et mobiles. Une liaison radio assure la communication entre les récepteurs.

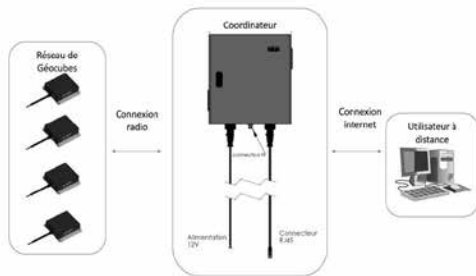


Figure 3 : Éléments constitutifs d'un réseau 4DBlocs

Le coordinateur représente le centre du réseau. Il coordonne les acquisitions, réalise les traitements des données GPS, les archive et assure l'interface entre le réseau et l'utilisateur.

Via une connexion internet, l'utilisateur paramètre et récupère les données du réseau à partir d'une plate-forme de gestion.

La technologie 4DBloc permet, grâce à son fonctionnement en réseau, d'obtenir une précision relative de positionnement millimétrique ainsi qu'une mutualisation des fonctions de gestion et de communication.

4. Méthodologie d'association

Sur le terrain l'association des deux technologies se résume par l'installation de récepteurs 4DBlocs fixes et mobiles. Les premiers sont placés en zones stables et sont utilisés comme points de référence pour le calcul des coordonnées des récepteurs. Les mobiles sont situés en zones instables et correspondent aux points dont on souhaite connaître le comportement.

Le procédé de couplage des données élaboré au cours de cette étude doit répondre à un cahier des charges strict. L'algorithme de calcul doit permettre plus précisément :

- Le suivi en temps réel des zones instables
- L'obtention d'une réponse rapide du système en cas de mouvements même de faible amplitude
- Précision des données GPS millimétrique pour une courte ligne de base (de l'ordre du kilomètre)

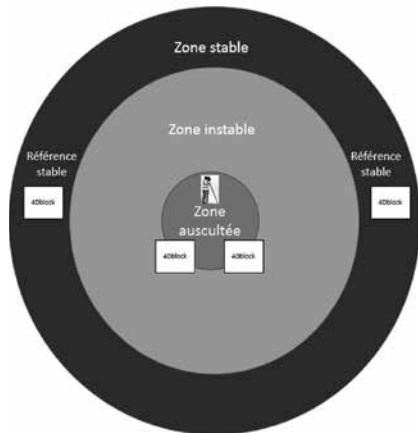


Figure 4 : Schématisation de la mise en place terrain de l'association Cyclops-4DBloc

Le procédé mis en place doit impérativement s'inscrire dans la suite logicielle déjà existante de l'entreprise SIXENSE Soldata, c'est-à-dire ne pas entraîner de modification de grande ampleur dans la chaîne de traitement des données de l'entreprise. Il est important de noter que celui-ci vient s'ajouter à un algorithme de traitement des données 4DBloc déjà existant.

Les données fournies par le coordinateur ne sont donc pas brutes. Un bilan des erreurs résiduelles permet de définir les éléments qui doivent être traités par le procédé de couplage afin de répondre au cahier des charges de SIXENSE Soldata. Pour répondre à ce cahier des charges trois phases de recherche ont été nécessaires.

La première consiste en la création d'un algorithme de traitement des données 4DBloc. Celui-ci récupère les données en sortie de l'algorithme existant, les filtre et les corrige de manière à obtenir des données précises au millimètre en conservant une fréquence de mesure suffisante.

Une seconde phase du processus consiste en la mise en forme des données afin de les associer aux données Cyclops et les insérer au sein de la chaîne de traitement des données tachéométriques.

Une dernière phase consiste en la correction des données Cyclops par les données 4DBloc. Celle-ci correspond donc plus précisément au couplage des deux technologies.

5. Éléments d'étude

L'étude se concentre essentiellement sur deux des trois phases du procédé de calcul. Dans un premier temps des expérimentations ont été réalisées afin de mettre au point l'algorithme de traitement des données satellites. Le réseau 4DBloc a été confronté à différentes configurations simulant des événements rencontrés dans des conditions de chantier.

En pratique, des mouvements sont induits au sein d'un réseau 4DBloc. Il s'agit ainsi d'observer la réponse du système à ces perturbations. Pour ce faire, des mouvements ont été induits alternativement sur les 4DBloc fixes, mobiles ainsi que sur des cibles de monitoring du Cyclops.

L'expérimentation vise à déterminer et évaluer l'impact de chaque étape de l'algorithme mis au point sur les données 4DBloc. Une étude sur la précision obtenue et le temps de réponse du système est effectué pour chaque configuration testée. Ces informations doivent permettre la validation ou non du processus de calcul. Cette étape permet aussi d'apporter une meilleure connaissance de la réponse du système lors d'événements. Des pistes de réflexions et de développement sont apportées à la suite de cette phase d'expérimentation.

Une seconde partie de l'étude se concentre plus particulièrement sur le processus de correction des données tachéométriques par les données GPS traitées. Elle vise notamment à répondre aux questions suivantes : quand et comment corriger les données tachéométriques afin de conserver la cohérence et la précision des données actuelles. Cette phase d'étude n'a pas fait l'objet d'expérimentation. Celle-ci se base sur l'analyse des possibilités qu'offre la chaîne de traitement des données tachéométriques et la suite logicielle Soldata, ainsi que sur une réflexion sur les précisions et fréquences comparées des deux systèmes.

6. Conclusions et perspectives

Les capteurs GPS offrent une réelle opportunité d'évolution des techniques de suivi de mouvement. De nombreuses études, visant à adapter cette technologie au cahier des charges très spécifique et complexe de l'auscultation de structure et de zones instables, ont été réalisées au cours de ces dernières années.

La technologie 4DBloc permet à la société SIXENSE Soldata de proposer une nouvelle solution technique à des besoins de surveillance. L'association de ces deux technologies permettrait en effet de simplifier et d'améliorer le suivi tachéométrique proposé par SIXENSE Soldata.

Au terme de cette étude, nous pouvons en conclure que cette association est réalisable, l'algorithme mis au point répond aux besoins de l'entreprise, même si certaines difficultés non topographiques (signal radio, alimentation électrique) nécessitent encore un travail important lors de la mise en place.

Analyse sémantique de scène obtenue par vérité terrain et mise en correspondance en vue de la validation sensorielle du véhicule autonome.

PFE présenté par : **Rémi Defraiteur**
Société d'accueil : **Groupe Renault**
Directeurs(trices) de PFE : **Marie-Anne Mittet, Nicole El-Zoghby**
Correcteurs(trices) : **Tania Landes, Emmanuel Alby**



1. Introduction

1-1. Contexte du projet

Le véhicule autonome doit reconstruire son environnement. Son principe repose sur l'emploi d'une multitude de capteurs complémentaires et redondants. Ceux-ci sont chargés de remplacer les sens que le conducteur emploie lorsqu'il conduit. Ces capteurs interviennent ainsi dans les domaines de la localisation et de la perception, et permettent la planification et le contrôle du véhicule autonome.

Les données issues de chaque capteur sont fusionnées afin de prendre une décision et de réduire les incertitudes sur le résultat final. La fusion de données nécessite alors la connaissance parfaite des erreurs de mesure réalisées par l'ensemble des capteurs. Il est alors nécessaire de disposer d'une vérité terrain.



Figure 1 - Lien vers la vidéo de présentation des capteurs déployés sur le véhicule autonome Renault

Dans le cadre de ce projet, les données issues du LiDAR sont considérées comme vérité terrain du fait de la capacité de ce capteur à capturer de façon précise une scène. Bien que le LiDAR soit un capteur permettant de mesurer des distances avec précision, il est toutefois nécessaire de réaliser un ensemble de traitements sur les nuages de points obtenus afin de les rendre exploitables. Ce projet réside donc dans la mise en place de traitements automatisés permettant de manipuler des nuages de points.

1-2. Objectifs du projet

L'objectif de ce projet consiste à mettre en place une méthodologie de traitements de nuages de points obtenus à l'aide d'un système LiDAR. Ces traitements ayant pour objectif d'être employés dans le cadre du véhicule autonome, ils se doivent d'être automatisés et indépendants de toute intervention humaine.

Les algorithmes seront mis en place grâce à deux langages. Dans un premier temps, MATLAB sera utilisé afin de prototyper et tester les algorithmes ainsi que de disposer du grand nombre d'outils fournis par ce logiciel. Dans un second temps, le programme développé sera réadapté au langage C++. Ce dernier langage offre un large choix de librairie permettant la manipulation et le traitement de nuages de points. De plus, dans l'optique d'utiliser nos algorithmes au sein d'un véhicule, le langage C++ est plus adapté pour l'intégration dans les systèmes embarqués.

2. Détermination d'une méthode de référence

Un état de l'art sur les différentes méthodologies de traitements de nuages de points a permis de définir les grandes étapes de traitement nécessaires. De nombreuses méthodes ont été développées dans le cadre du véhicule autonome comme dans celui du Mobile Mapping. Les systèmes d'acquisitions étant très proches, on retrouve, à travers les différentes méthodologies présentées de grandes étapes communes qui sont la détection, la segmentation puis la classification.

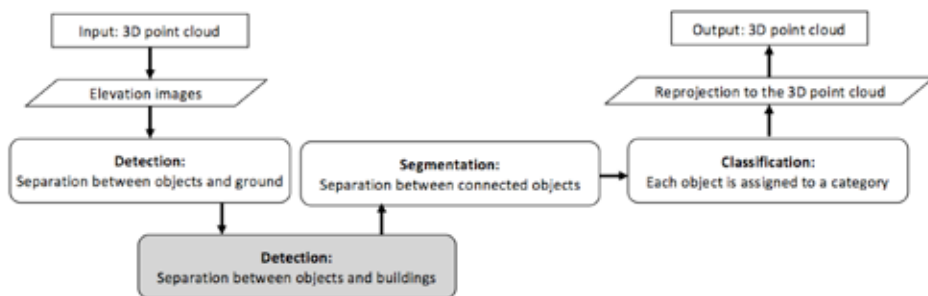


Figure 2 - Organigramme de la méthodologie suivie, basée sur [Serna & Marcotegui, 2014] modifié pour les besoins du stage

La détection d'objet : elle représente l'étape durant laquelle les données vont subir un premier traitement permettant de distinguer le sol des différents objets présents en sursol. Un objet quelconque est ainsi correctement détecté lorsqu'il n'est pas confondu et inclus dans l'image de projection du sol.

La segmentation d'objet : lorsque l'on dispose d'une image représentant des objets, ceux-ci ne correspondent en réalité qu'à des pixels non liés ayant une certaine valeur numérique. L'étape de segmentation va permettre d'étudier le voisinage de chaque pixel et de regrouper les pixels proches. La segmentation va ainsi permettre aux pixels jusqu'alors indépendants de former des groupes représentatifs des objets détectés.

La classification des objets : elle représente la dernière étape fondamentale du traitement et consiste à attribuer, pour chaque objet segmenté, une classe sémantique. Chaque classe représente un type d'entité qu'il est possible de rencontrer dans l'environnement d'un véhicule. On retrouvera par exemple, les autres véhicules, les lampadaires, les panneaux de signalisation, les piétons,... Cette étape permettra de connaître pour un jeu de données testé, la classe de chaque objet présent dans la scène ainsi que le nombre d'objets.

La méthodologie mise en place dans [Serna & Marcotegui, 2014] (Figure 2) s'est alors révélée comme étant adaptée pour la réalisation de ce projet. Au travers de cette approche, les traitements ne sont pas réalisés sur les nuages de points directement, mais sur des images d'élévation obtenues par projection. Il est alors possible de disposer d'une importante palette d'outils de morphologie mathématique afin de réaliser les étapes présentées précédemment. Une étape a été ajoutée par rapport à la méthode de base, il s'agit de la détection des bâtiments, ce qui permet d'avoir trois images : l'image du sol, l'image des bâtiments puis celle des objets restants.

[Serna & Marcotegui, 2014] Serna, A. & Marcotegui, B., 2014. *Detection, segmentation and classification of 3D urban objects using mathematical morphology and supervised learning*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 93, pp.243–255.

3. Mise en place des traitements

Dans le cadre de cette étude, on se cantonnera donc à maîtriser parfaitement les traitements sur les objets statiques de la scène. L'aspect « structure » d'une scène a été traité en priorité. Cet aspect correspond à la détection et comprend les éléments que l'on retrouvera dans la quasi-totalité des zones de circulations : Voirie, trottoirs, bâtiments, barrières de sécurité,...

3-1. Projection du nuage de points vers l'image d'élévation

Bien que la création et l'utilisation de nuages de points soient d'ores et déjà bien ancrées dans le milieu professionnel de la topographie ou de la robotique, les outils permettant de traiter automatiquement ce type de données restent jusqu'à présent limités. L'approche selon laquelle le nuage de points est transformé sous forme d'image d'élévation permet l'emploi de nombreux outils de morphologie mathématiques développés depuis plusieurs décennies.

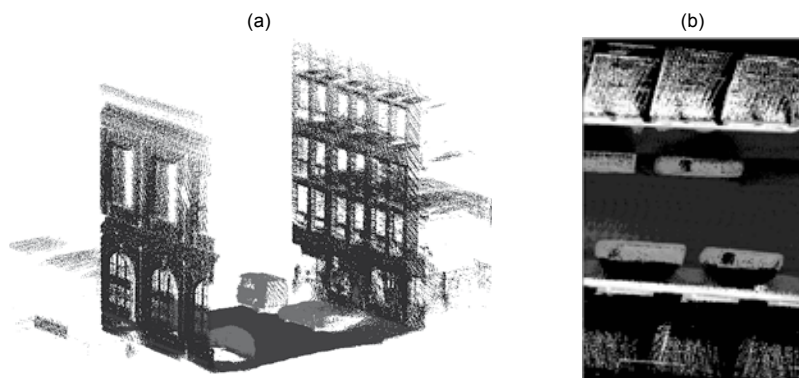


Figure 3 - (a) Extrait du jeu de données rue Madame, (b) même extrait projeté en image d'élévation

3-2. Détection des objets

Les premiers traitements ont été orientés, comme expliqué précédemment, sur les structures présentes dans la scène traitée. Le cas d'usage de notre projet est le milieu urbain, ainsi nous pouvons identifier certaines structures grâce à leurs caractéristiques.

Le sol qui représente un plan peut ainsi être identifié par des algorithmes de type croissance de régions¹. Une fois le sol identifié, on peut chercher à traiter les façades de bâtiments qui se situent autour du sol et qui sont généralement à des hauteurs plus importantes que les autres objets. Leur valeur de pixel est ainsi plus importante, il est alors possible de les identifier facilement, puis de les extraire et ne conserver que les objets restants de la scène. Cela permet également de pré-classer en tant que sol ou façade une grande partie des pixels de l'image.

3-3. Segmentation des objets

Une fois l'extraction des structures réalisées, il en résulte trois images : l'image du sol, l'image des bâtiments et l'image des objets restants en sursol (Figure 4). Bien qu'une grande partie des pixels soit correctement réparties, la présence de bruit autour des objets reste un phénomène constant. Il est alors nécessaire de mettre en place un traitement afin d'éliminer ce bruit.

1. Les algorithmes de type "croissance de régions" sont des algorithmes qui, à partir d'un pixel de départ défini, vont étudier ses voisins. Si les voisins respectent les conditions, ils seront ajoutés au sein de la région. Dans le cas contraire, les pixels ne respectant pas les conditions seront affectés à une autre région. Le protocole est répété jusqu'à ce que le voisinage de chaque pixel ait été étudié.

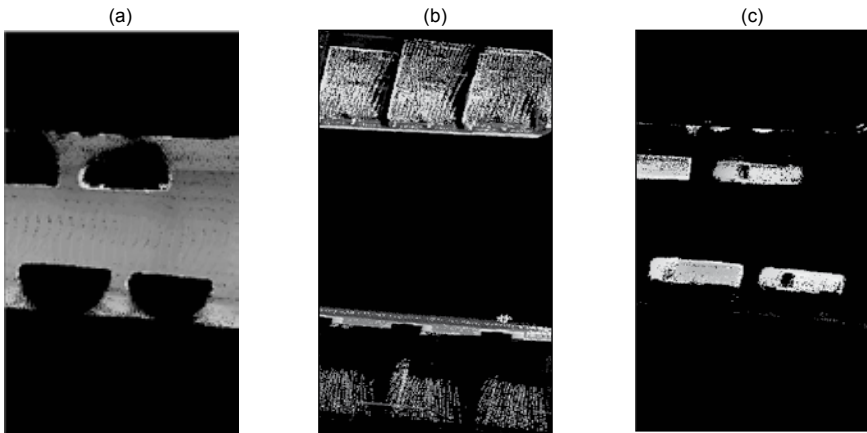


Figure 4 - (a) Image du sol, (b) Image des façades et points à l'intérieur des bâtiments, (c) Image des objets restants à classer

En effet, il est possible d'utiliser un algorithme de « composantes connectées ». Ce type d'algorithme permet de regrouper les pixels proches et faisant parti d'un même objet, sous la forme d'un groupe. Il est alors possible de déterminer si un groupe est effectivement un objet ou pas, par exemple en considérant le nombre de pixel par objet.

La création de ces groupes donne également la possibilité de préparer l'étape de la classification et d'alléger les données qui seront traitées au cours de cette prochaine étape.

3-4. Classification des objets

La dernière étape de l'approche développée est la classification des objets. Celle-ci a pour rôle, l'attribution à chaque groupe de pixel d'une valeur correspondante à une classe. Cette étape peut être décomposée selon deux sous-étapes. La première représente une classification basée sur des caractéristiques géométriques fixes. A ce stade du traitement, chaque groupe de pixels restant représente un objet.

Le calcul des boîtes englobantes orientées pour chaque groupe offre la possibilité de connaître la longueur, la largeur et la hauteur de chaque objet. Une première classification est ainsi réalisable sur la base de ces caractéristiques géométriques.

La deuxième étape est la mise en place d'algorithmes classifieurs plus complexes tels que les réseaux de neurones. Ceux-ci pourront après entraînement, classer de manière totalement autonome les objets de la scène.

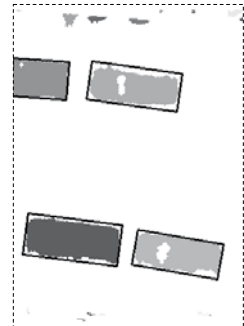


Figure 5 - Extrait zoomé de l'image objet avec boîtes englobantes des objets type « véhicules »

4. Conclusion et perspectives

L'analyse sémantique de scène obtenue par capteur LiDAR représente l'une des problématiques actuelles dans le milieu de la recherche et du développement. La mise en place d'algorithmes capables de s'adapter aux divers nuages à traiter, sans intervention d'un opérateur, reste jusqu'à présent un domaine complexe. Les traitements testés et mis en place durant ce projet permettent à l'entreprise de disposer d'une première approche des traitements nécessaires pour obtenir ce type d'analyse.

Les perspectives de ce projet s'orientent dans un premier temps sur la robustesse de ces traitements, afin qu'ils soient compatibles avec tout type de scène, tout en maintenant de bons résultats. Une fois que la mise au point des traitements sur des nuages de points statiques sera parfaitement maîtrisée, l'aspect dynamique pourra être pris en compte afin de traiter les objets dynamiques de la scène, tels que les piétons ou les véhicules en cours de déplacement.

Analyse du risque végétation dans les emprises ferroviaires à partir de données LiDAR acquises par drones

PFE présenté par : **LUC PERRIN**
Société d'accueil : **SNCF Réseau**
Directeurs de PFE : **M. Flavien VIGUIER**
Dr. Pierre ASSALI
Correcteurs : **Dr. Pierre GRUSSENMEYER**
Dr. Tania LANDES



1. Introduction

Avec ses quelques 33 000 km de lignes, SNCF assure la gestion d'un des réseaux ferrés les plus importants d'Europe. Ce patrimoine nécessite une maintenance et un entretien sans faille afin de garantir la sécurité des équipements, du personnel et des voyageurs. C'est pourquoi SNCF effectue quotidiennement à l'échelle du réseau des opérations d'inspection et de surveillance des installations.

Le suivi et la maîtrise du couvert végétal représentent le deuxième poste de coût de maintenance, atteignant plusieurs dizaines de millions d'euros de dépenses annuelles. Les enjeux économiques, sociaux, sécuritaires et écologiques de la maîtrise de la végétation sont considérables (retards de trains, risques d'accidents, etc.). C'est pourquoi SNCF s'est fixé l'objectif d'atteindre l'excellence opérationnelle en matière de maîtrise du couvert végétal.

L'usage de drones se présente comme une solution efficace, car il permet une grande souplesse d'intervention, sans perturbation du trafic ferroviaire. Ces aéronefs télépilotes qui peuvent embarquer un large panel de capteurs permettent des mesures par photogrammétrie, caméras thermiques et multi spectrales, ou encore LiDAR (*Light Detection And Ranging*).

Conscient des possibilités offertes par la récente émergence des drones, SNCF Réseau a mis en place dès 2014 un pôle dédié aux drones, chargé de missions d'inspections, de cartographie et de surveillance des installations du Réseau Ferré National (RFN). La photogrammétrie jusqu'alors utilisée pour répondre aux besoins présente des limites importantes, notamment en matière de mesures sous le couvert végétal. La technologie LiDAR, configurée sur des vecteurs drones, apparaît alors comme une solution très prometteuse. Dans cette perspective, le Pôle Drones de SNCF Réseau a récemment fait l'acquisition d'un système LiDAR hautement performant, constitué d'un scanner laser *Riegl VUX1-UAV*, et d'une centrale inertielle *Applanix AP20* (Figure 1).



Figure 1 : Drone RICOPTER et son système LiDAR en vol

Ce projet de fin d'études a pour but la cartographie du risque végétation dans les emprises ferroviaires. Pour y parvenir, il sera nécessaire de quantifier la qualité des données acquises par le système LiDAR, établir une méthodologie de classification de ces données et définir des processus de traitement pour détecter les lieux où le couvert végétal présente un danger pour les infrastructures ferroviaires.

A terme, ces travaux devront permettre d'anticiper les incidents Végétation, d'optimiser les missions d'élague sur le terrain, et donc de réduire considérablement les coûts de maintenance.

2. Etude de précision et d'exactitude du système LiDAR

Afin d'exploiter les données provenant de tout système de mesure, il est indispensable d'estimer quantitativement leur qualité. Cette étape est primordiale pour déterminer la précision des livrables, mais également pour optimiser les processus d'intervention terrain. Afin d'apprécier la qualité des nuages de points issus du système LiDAR, nous avons analysé l'ensemble des traitements qui permettent de les générer.

- Post-traitement des données trajectographiques

Le post-traitement des données trajectographiques permet de calculer précisément la trajectoire du drone à partir des données GNSS et inertielles mesurées en vol, ainsi que des observations du Réseau GNSS Permanent (RGP). La trajectoire ainsi calculée a une précision de l'ordre de 2 centimètres.

- Calibration du système LiDAR

Dans les traitements de données lasergrammétriques acquises par voie aérienne, la calibration vise à déterminer le désaxement entre le repère de la centrale inertielle et celui du drone. Pour se faire, la solution développée par *Riegl* se base sur la mise en correspondance de plans détectés dans différentes bandes de scan. Les valeurs calculées sont les trois angles de calibration (roulis, tangage et lacet) qui minimisent, au sens des moindres carrés, les écarts entre les plans détectés et appariés.

Les tests réalisés ont permis d'établir un protocole précis d'acquisition terrain afin d'obtenir des valeurs fiables de calibration, valeurs indispensables pour la fourniture d'un nuage de point de qualité.

- Amélioration de la trajectoire

L'incertitude sur la trajectoire post-traitée se propage directement dans le nuage de points lors de sa création. Ainsi, au sein d'une même zone couverte par différentes bandes de scans, nous pouvons constater des décalages de plusieurs centimètres dans le nuage. Ce calcul d'amélioration trajectographique (implémenté dans l'algorithme *RIPRECISION*) se base sur l'utilisation de points de contrôles (préalablement pointés), et de primitives géométriques automatiquement détectées dans les nuages. Des corrections angulaires et tridimensionnelles sont appliquées tout au long de la trajectoire améliorant ainsi les précisions relatives et absolues du nuage (Figure 2).

Les différents modèles de calculs d'amélioration de la trajectoire proposés par l'algorithme ont été testés, et la précision des nuages de points obtenus quantifiée, afin de valider un processus de calcul.

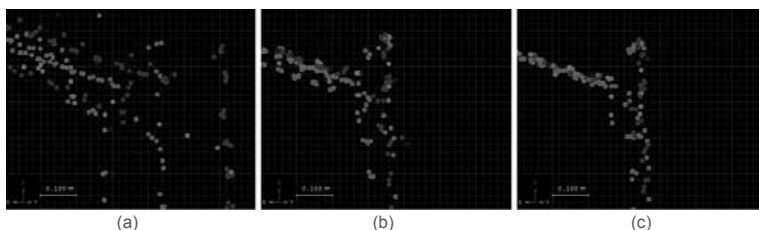


Figure 2 : Traitements sous RiPROCESS : coupe sur un coin de bâtiment, une couleur par bande de scan.

(a) Sans calibration ; (b) Après calibration ; (c) Après calibration et calcul d'affinement trajectographique

- Configuration des points de calage

Afin d'optimiser le temps des interventions terrain et la qualité des livrables, une étude sur le nombre de points de calage a été menée. Comme le montre la Figure 3, nous avons fait varier le nombre des points d'appui et déterminé l'exactitude du nuage pour chaque configuration. Les écarts moyens quadratiques calculés à partir des pointés sur les points de contrôle apparaissent dans le Tableau 1.

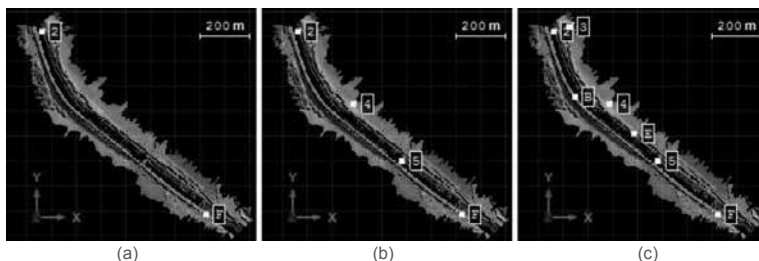


Figure 3 : Configurations des répartitions des points d'appuis

Configuration	(a) : 2 points d'appui	(b) : 4 points d'appui	(c) : 7 points d'appui
Emq total	11 cm	6 cm	4 cm

Tableau 1 : Ecart moyen quadratique par configuration

Ces résultats ont été obtenus sur une zone de faible densité de points. Une étude complémentaire de pointé montre que plus la densité de points est importante meilleure est la précision du pointé des points d'appuis, et donc meilleure sera la précision absolue du nuage. Ainsi, pour des acquisitions précises, on privilégiera la présence d'un grand nombre de points d'appui (tous les 500 mètres), où des acquisitions de haute densité.

En définitive, cette étude nous a permis de montrer que selon le protocole terrain, la précision absolue du nuage sera comprise entre 2 et 10 centimètres, et est suffisante pour la cartographie du risque végétation.

3. Classification de données LIDAR

La localisation du risque végétation implique la connaissance de la position du couvert végétal et des infrastructures. Pour détecter et dissocier ces éléments, une classification des nuages LiDAR est nécessaire.

Une chaîne de traitement de classification non supervisée a donc été mise en œuvre par édition de macros concaténant différents outils et fonctions proposés par le logiciel *TerraScan*. Le processus mis en place permet la classification semi-automatique du sol, de la basse végétation (inférieure à 2m), de la haute végétation (supérieure à 2m), des rails, des fils et poteaux caténaïres, ainsi que des points isolés (voir Figure 4).

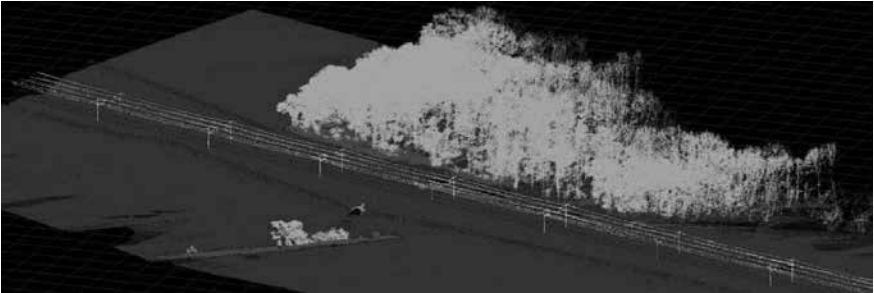


Figure 4 : Résultat de la chaîne de traitement de classification (sans échelle)

La littérature distingue deux principaux critères pour analyser une classification automatique : son efficacité (relative aux temps de traitements homme et machine), et son exactitude (coefficient *kappa*). Cependant, pour déterminer l'exactitude d'un nuage, il est nécessaire de le comparer à une donnée de référence considérée comme exacte. Confrontés à une classification manuelle et minutieuse, les résultats de notre chaîne de traitement sont fournis dans le Tableau 2 (étude réalisée sur un nuage de 8 millions de points répartis sur un linéaire de 250 mètres) :

Classification manuelle	Classification semi-automatique	Coefficient d'exactitude
t = 8 heures 30	t = 6 minutes	$\kappa = 98\%$

Tableau 2 : Comparaison des classifications manuelle et semi-automatique

Les performances atteintes, tant en termes d'exactitude que de rapidité de traitements, ont permis l'intégration de la chaîne développée aux processus de production du Pôle Drones. La solution est déployable à grande échelle. Sur la base de cette classification, l'étude du risque végétation a pu être entreprise.

4. Analyse du risque végétation

Les spécialistes végétation SNCF Réseau définissent principalement le risque végétation comme un danger immédiat pour les infrastructures. Dans notre analyse, nous avons approfondi le modèle en proposant une approche par imminence du risque. Nous pouvons dès lors distinguer trois types d'approches définissant la végétation dangereuse :

- L'approche curative, délimitant une bande de proximité de 3 mètres à partir des infrastructures ferroviaires : identification d'un danger immédiat
- L'approche préventive, visant à détecter toute végétation susceptible d'impacter les infrastructures lors d'une chute : identification du risque à court terme

- L'approche prédictive, qui pondère de façon probabiliste la précédente approche au regard du profil du terrain (déblais, remblais, inclinaison des pentes, etc.) : identification d'un risque potentiel (occurrence de risque plus faible)

Afin de conserver en permanence une visualisation complète des données, nous avons fait le choix de traiter la donnée sous sa forme tridimensionnelle. Nos chaînes de traitements permettent ainsi la création d'un attribut à tout point de la végétation du nuage, quantifiant le niveau de danger vis-à-vis des infrastructures selon l'approche choisie : curative, préventive ou prédictive (Figure 5).

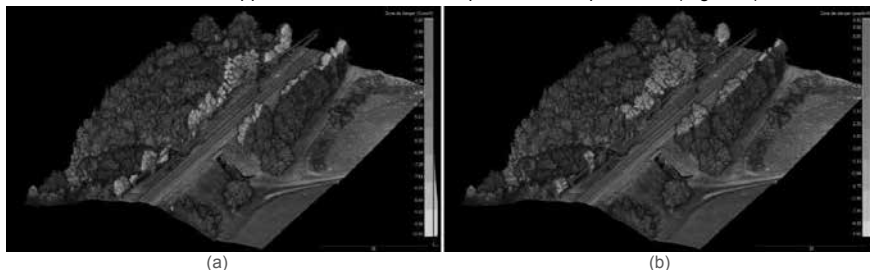


Figure 5 : Modèles de risque établis selon différentes approches ; (a) Approche curative ; (b) Approche prédictive

Dans le but de cartographier le risque végétation à grande échelle (dizaines ou centaines de kilomètres), nos chaînes de traitements ont été conçues pour être applicables à des données spatialement ré-échantillonnées ; les traitements sont donc rapides et scalables.

La limite des modèles réalisés réside dans le fait que l'entité de référence demeure le point du nuage et non pas l'« individu » (arbre, branche, etc.). Nous nous sommes donc tournés vers des solutions d'individualisation et une caractérisation de la végétation (voir Figure 6). Relativement complexes à établir de façon automatique et robuste, ces travaux sont encore dans leur phase expérimentale à la date de rédaction du présent résumé. Ceux-ci devraient permettre à terme de caractériser les dangers arbre par arbre, en intégrant des données dendrométriques (hauteur de l'arbre, taille du tronc, direction de poussée, etc.). Ces travaux permettront aux métiers d'optimiser les processus de maintenance (définition des moyens d'élagage, etc.) et de réduire les coûts d'intervention tout en éliminant le risque végétation.

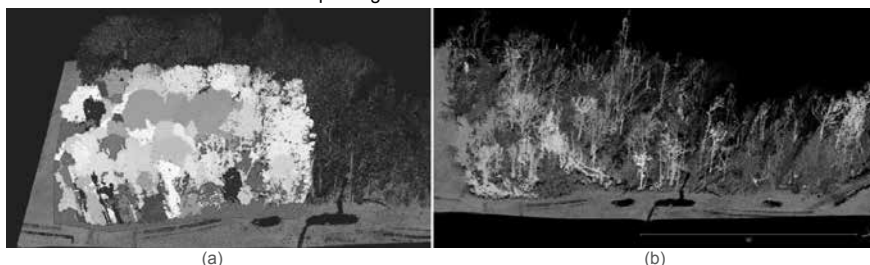


Figure 6 : Individualisation automatique de la végétation ; (a) Individualisation sous CompuTree (sans échelle) ; (b) Extraction des troncs et branches principales sous CloudCompare

5. Conclusion

Les travaux menés nous ont tout d'abord permis de quantifier précision et exactitude des données issues du système LiDAR VUX1-UAV. La chaîne de traitements de ces données a été affinée, et les protocoles terrain optimisés. La qualité des données du système LiDAR permet de répondre aux exigences de surveillance et de maintenance du RFN, repoussant les limites des méthodes photogrammétriques. Dans le but de cartographier le couvert végétal, une chaîne de classification des données a également été établie et intégrée aux processus de traitements, et est désormais déployable efficacement à grande échelle. Les objectifs de cartographie du risque végétation ont été atteints : les travaux permettent de détecter automatiquement sur de grands linéaires la présence de tout risque végétal. Cette cartographie va permettre la création automatisée de fiches signalétiques de danger végétation, qui seront utilisées par les équipes de maintenance terrain garantissant gains économiques et meilleure disponibilité du Réseau Ferré National.

Prise en compte optimale des facteurs météorologiques dans les mesures automatiques tachéométriques sur les chantiers d'auscultation de Sixense-Soldata

PFE présenté par : **Benjamin Chérel**
Société d'accueil : **Sixense-Soldata**
Directeurs de PFE : **M. Rémi Fejoz,**
Mme. Anaëlle Leleu
Correcteurs : **M. Gilbert Ferhat,**
M. Jacques Ledig



1. Contexte de l'étude

Les conditions météorologiques sont, pour le domaine de la topographie, des facteurs indésirables pour des mesures d'angles et de distances de précision. Le phénomène de réfraction des rayons lumineux s'applique lorsque le trajet lumineux d'un rayon traverse plusieurs strates de l'atmosphère possédant un indice de réfraction différent. Le trajet sera alors non pas rectiligne mais courbé et des erreurs d'observations d'angles et de distances seront présentes.

Depuis 25 ans, Sixense-Soldata utilise des systèmes d'auscultation (appelés CYCLOPS pour CYCLic Optical Surveyor), composés d'un tachéomètre robotisé et d'un contrôleur, afin d'ausculter des ouvrages pendant différentes phases de travaux. Les points ainsi auscultés sont soit des cibles (prismes) soit des points sans réflecteur. C'est par mesure d'angles et de distances que les coordonnées de chaque point sont mesurées et calculées. La mesure de distance se fait par le biais d'un télémètre laser, communément appelé EDM (Electronic Distance Measurement). Ce même laser est fortement impacté par les facteurs météorologiques - tels que la température, la pression, le taux d'humidité - sur tout le long de son trajet (aller et retour). La densité de l'air traversant l'onde électromagnétique est variable tout au long de la propagation du rayon lumineux. Cela induit alors une variation de l'indice de réfraction de l'air.

Avec plus de 500 Cyclops en fonctionnement dans le monde et dans différentes conditions, Sixense-Soldata souhaite confirmer et si possible perfectionner son système de correction de données impactées par les facteurs météorologiques. Cette phase a pour but d'améliorer la qualité des mesures automatiques proposées aux clients.

Les situations des chantiers ayant des conditions disparates, Sixense-Soldata ne souhaite pas une étude centrée sur un cas bien spécifique mais une large étude pouvant mener à une application dans n'importe quelle situation.

Dans un premier temps, mon étude mettra en lumière l'impact des facteurs météorologiques sur les données tachéométriques (angles horizontaux et verticaux, distances). Dans un second temps, j'exposerai les différentes corrections ou méthodes de cette étude, afin de corriger ou de limiter les effets sur les données brutes.

Mes différentes phases d'expérimentations m'ont permis de sélectionner les méthodes les plus optimales afin de corriger ou minimiser les facteurs météorologiques sur les données de Sixense-Soldata. Elles ont défini également dans quel cas il est impossible de garantir la précision souhaitée, faute d'erreur trop importante.

Equipée de multiples capteurs, Sixense-Soldata met tout en œuvre pour innover et rester à la pointe de la technologie. C'est notamment avec ces capteurs topographiques et météorologiques que j'ai effectué mes expériences.

2. Impacts des facteurs météorologiques sur les données tachéométriques

Les tachéomètres robotisés utilisés proviennent des trois plus grands fournisseurs de topographie : Leica, Trimble et TopCon/Sokkia. Cependant, les tests effectués ont seulement été réalisés avec les dernières générations de TM de l'entreprise Leica. Néanmoins, chaque RTS (Robotic Total Station) fonctionne de la même manière en mesurant deux angles (un angle horizontal et un vertical) et une distance inclinée par le télémètre laser (EDM).

Il y a plusieurs principes de mesures électroniques de distances. Le plus utilisé en géodésie terrestre et plus particulièrement dans les appareils de topographie est la mesure par différence de phases. L'appareil utilise des ondes lumineuses, infrarouges ou micro-ondes comme onde porteuse. Le signal mesuré est modulé sur l'onde porteuse au niveau de l'émetteur. Il se propage jusqu'au réflecteur (le prisme) pour revenir au récepteur. La distance mesurée provient alors de la comparaison de la phase du signal émis avec celle du signal reçu. C'est notamment durant le trajet aller-retour du faisceau que le signal subira les effets de la réfraction atmosphérique. Nous pouvons citer les trois composantes météorologiques de la plus importante à la moins significative : la température, la pression et l'hygrométrie de l'air.

La température est la principale composante météorologique. La variation de la température de l'air va directement impacter son indice de réfraction. Plus la température augmente, plus l'indice de réfraction de l'air diminue. Il est important de spécifier que la température émanant des surfaces telles que l'asphalte ou la végétation est différente. C'est-à-dire : l'indice de réfraction au-dessus de ces différentes surfaces ne sera pas le même. En outre, en s'éloignant verticalement du sol chaud du bitume, la température baisse et ainsi l'indice de réfraction augmente. Ce phénomène de stratification de la basse atmosphère est synthétisé sur la figure 1. Sur des sols gelés (à droite de la figure), le procédé est différent.

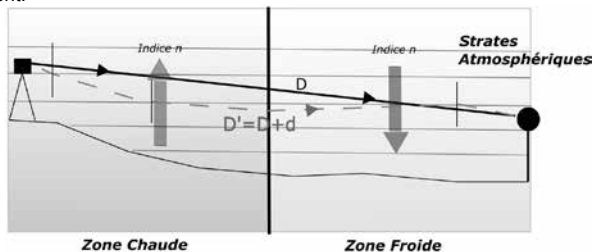


Figure 1 – Schéma explicatif de la réfraction atmosphérique suivant les différentes strates (source personnelle)

D la distance directe, D' la distance à corriger, d la correction et n l'indice de réfraction de l'air.

Le deuxième facteur influant le plus sur les corrections météorologiques est la pression. À l'inverse de la température, l'indice de réfraction est proportionnel à la valeur de la pression. L'air se comportant sensiblement comme un gaz parfait, nous pouvons définir le co-indice de réfraction N :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (1)$$

Tout d'abord, nous pouvons dire que le co-indice de réfraction de l'air est proportionnel à la densité des gaz traversés. Or, la densité de l'air dépend de ses composants soit l'oxygène (O₂), l'azote (N₂), la vapeur d'eau (H₂O) ou encore le dioxyde de carbone (CO₂). Seules les trois premières composantes de l'air sont significatives. De plus, l'association de la pression de l'oxygène avec celle de l'azote est stable et usuellement appelée pression atmosphérique (Pa). Cela nous permet alors de dissocier la pression atmosphérique et la pression de la vapeur d'eau. Ces deux éléments sont deux facteurs majeurs pris en compte lors des calculs de correction.

L'effet de l'hygrométrie de l'air est, quant à lui, faible sur la correction de distance. Le plus souvent les constructeurs omettent ce terme et le simplifient par un coefficient de 0.6 soit un taux de 60% d'humidité relative. En topographie générale et sur des courtes distances (une centaine de mètre) l'erreur induite par l'omission de ce terme est négligeable. Cependant, pour des mesures géodésiques de grandes précisions et sur de plus longues distances, il est fortement recommandé de tenir compte de ce paramètre comme nous pouvons le voir sur le tableau suivant.

Dans une zone très humide et très chaude, la pose d'un capteur d'humidité ainsi que le calcul de correction de distance avec la valeur h (taux d'humidité) doit être réalisé.

Température (°C)	Erreurs (mm/km)	
	$h = 50\%$	$h = 100\%$
0	0.1	0.2
10	0.2	0.5
20	0.4	0.9
30	0.8	1.6
40	1.4	2.8
50	2.3	4.6

Tableau 1 – Erreurs sur les distances en ne rajoutant pas le taux d'humidité

Autres phénomènes perturbant les mesures tachéométriques des déplacements structuraux : les effets pluviométriques et solaires.

En effet, les radiations solaires directes peuvent détériorer l'électronique de l'appareil et ainsi perturber considérablement les mesures. Pour une maîtrise optimale des précisions des livrables, il faut prendre en compte ce phénomène et donc installer les appareils de mesures à des endroits stratégiques. Il s'agira ensuite d'adapter l'installation pour réduire au maximum certains impacts qui ont pu être quantifiés lors d'expérimentations.

De plus, les effets pluviométriques ne peuvent pas être corrigés ou bien minimisés en tant que tels. Seules des précautions peuvent être prises. Il existe, cependant, plusieurs parties où nous pouvons intervenir afin de diminuer ces risques de perturbations. Tout d'abord, il y a l'appareil. Les dernières stations totales deviennent de plus en plus robustes, cependant elles n'en restent pas moins des appareils électroniques fragiles. Puis, nous avons les prismes d'auscultations, constitués exclusivement de verre. De ce fait, tous les inconvénients de ce matériau sont répercutés sur les prismes. Nous avons constaté un impact plus ou moins positif en protégeant ces parties dans différentes expérimentations.

D'autres expériences vont être établies utilisant les toutes dernières recherches en matière de protection d'objet en extérieur. Selon les résultats, une étude de faisabilité restera à faire afin d'évaluer les gains en les utilisant.

3. Modèles empiriques de corrections de données

La modélisation de la basse atmosphère pour des mesures topographiques est si complexe que les modèles déterminés ont été établis de manière empirique. D'études en études, les modèles sont devenus de plus en plus précis et exactes.

Le plus répandu dans le monde de la topographie a été établi par l'étude de Barrell & Sears en 1939 et adopté en 1963 par l'IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Le modèle permet de calculer l'indice de réfraction de l'air et plus précisément le groupe d'indice (n_g). Il a été déterminé non pas par des modèles mathématiques mais par des expériences. De plus, il est applicable pour les longueurs d'ondes comprises entre 436nm et 644nm :

$$(n_g - 1) \cdot 10^6 = 287.604 + 3 \cdot \frac{1.6288}{\lambda^2} + 5 \cdot \frac{0.0136}{\lambda^4} \quad (2)$$

Puis, en 1966 les travaux d'Edlén améliorent les équations de Barrell & Sears en les rendant plus simples et plus précises pour un plus grand nombre de configurations. Les équations de Barrell & Sears sont alors à prescrire car plusieurs études démontrent que les coefficients ainsi déterminés sont obsolètes et ne reflètent pas la vraie nature de l'air. Il est à noter que les formules d'Edlén ne modélisent pas clairement la dépendance de la réfraction sur la longueur d'onde et la quantité de vapeur d'eau.

C'est pourquoi, d'autres chercheurs ont continué de faire des études sur cette modélisation de l'atmosphère pour déterminer le plus précisément possible l'indice de réfraction, tels que Owens, Peck, Reeder ou Jones. Mais ce sont les dernières études de Ciddor et Hill de 1996 et de 1999 qui ont été adoptées par l'IAG (International Association of Geodesy) en 1999.

Il y a quatre raisons majeures qui justifient le choix de ce modèle :

- L'amélioration de la précision des EDM,
- De nouvelles mesures absolues et relatives de l'indice de réfraction de l'air,
- L'échelle de température revisitée en 1990,
- Et depuis 1963, le taux de dioxyde de carbone dans l'air modifié.

L'étude pour la société Sixense-Soldata était de vérifier quel modèle elle utilisait et de déterminer pour l'ensemble de leur chantier la justesse des corrections apportées. Il était alors nécessaire d'évaluer la précision gagnée pour tel ou tel modèle tout en relativisant les résultats par rapport aux capacités des appareils de mesures (capteurs météorologiques et RTS). Bien évidemment, nous ne pouvons garantir une meilleure précision que celles annoncées par les constructeurs.

Une erreur sur la détermination de l'indice de réfraction peut avoir un impact important sur la correction de la distance. Cette erreur peut provenir des appareils de mesure mais aussi du modèle utilisé.

Pour finir, dans l'ensemble de ces modèles, nous retrouvons un terme de la pression partielle de vapeur d'eau, notée e . Ce paramètre peut être calculé à l'aide des mesures d'un psychromètre (c'est un double thermomètre, l'un pour la température sèche et l'autre pour la température humide). Cependant, cet appareil n'est pas forcément utilisé sur les projets. Pour compléter correctement le processus de correction, un calcul de température humide a été élaboré. La formule met en relation l'humidité de l'air, la pression et la température sèche pour ainsi déterminer la température humide utile au calcul de e . La suite de l'étude consistait à définir l'exactitude de la formule en la comparant à d'autres procédés de détermination de température humide tels qu'un algorithme fonctionnant par itérations ou bien des abaques utilisés dans le monde de l'hydrologie.

4. Conclusion

Les chantiers de plus en plus exigeant et parfois de plus en plus complexes requièrent davantage d'attention et donc de précision lors de leur surveillance. Sixense-Soldata arrive à fournir des prestations millimétriques en précision relative. Il faut alors être capable de certifier la précision de tous les éléments qui entourent la mesure et le calcul d'un mouvement. C'est pour cela que l'étude sur les corrections des données tachéométriques des facteurs météorologiques a été réalisée.

Les modèles atmosphériques déterminés au XXème siècle sont aujourd'hui très utilisés, de manière complète ou simplifiée en fonction des instruments. Dans le cas de cette étude, il fallait utiliser une correction adaptée et applicable dans le plus de situations possibles et pour tout type de marque et de modèle de RTS.

Compte tenu des premiers résultats et dans la majorité des situations topographiques, nous pouvons affirmer que la correction sur les distances de l'EDM est correctement établie sans dégrader la précision des déplacements.

Il est également à noter que l'application d'une telle correction ne dispense pas l'opérateur de contrôler les résultats fournis afin de valider la qualité des livrables. En effet, une correction sur la mesure de distance laser va être réalisée continuellement et automatiquement tout le long des cycles de mesures. Il faudra faire attention aux sauts de mesures que peuvent entraîner les pertes de données des capteurs météorologiques sur site (température, pression et humidité) ou bien aux aléas de l'évolution du chantier (circulations des engins de chantier, déviations de trafic, déplacements d'installations) qui pourraient impacter le milieu traversé par les rayons lumineux émis par les stations totales. Pour finir, il faut se rendre compte de la respiration des structures à ausculter. Le béton armé ne réagit pas de la même manière que de la tôle sous l'effet des facteurs météorologiques. Et ces mouvements de dilatation sont indépendants des mouvements réels dus aux chantiers. Il s'agit d'effets périodique et saisonnier.

Géoréférencement et filtrage de nuage de points sur des relevés de grande envergure en environnement industriel

PFE présenté par : **Mlle Marie-Anaïs Dhont**
Société d'accueil : **SITES SAS, Dardilly (69)**
Directeur de PFE : **M. Pierre Carreaud**
Correctrice : **Mme Tania Landes**



1. Présentation de l'entreprise SITES et du scanner Imager 5010C

Dans un monde où les ouvrages construits par l'homme vieillissent et se dégradent et où les environnements industriels évoluent avec le temps, la société SITES SAS, acronyme de Société d'Instrumentation, de Traitements et d'Essais sur Sites, permet de gérer et suivre ces modifications depuis plus de 30 ans ; et ce, à travers ses différentes compétences, réparties dans 5 agences en France : Agence Paris : le siège social (92), Agence Provence (13), Agence Centre (37), Agence Nord (59) et Agence Rhône-Alpes (69), ainsi que dans deux filiales à l'étranger (Chine et Afrique du Sud). Parmi ses aptitudes, on trouve, entre autres, la lasergrammétrie terrestre aussi appelée LiDAR (acronyme de Light Detection And Ranging), développée depuis une dizaine d'années dans l'entreprise et particulièrement utilisée par les membres du service topographique de Dardilly (69) afin de réaliser des archives visuelles et géométriques exhaustives de diverses installations et notamment en environnement industriel.

La société possède plusieurs scanners laser : des Faro X130, un Riegl VZ-400 et des Z+F Imager 5010C (figure 1). Cependant, les scanners Imager 5010C sont plus prisés pour des relevés en environnement industriel du fait de leurs caractéristiques, notamment leur rapidité et leur ratio signal sur bruit. Ce scanner laser fonctionne par temps de vol indirect basé sur la technique du décalage de phase, c'est-à-dire, qu'il mesure le décalage de phase entre l'émission et la réception de l'onde.



Figure 1 : Le scanner laser terrestre Imager 5010C de la société Zoller+Fröhlich

2. Problématiques rencontrées

2.1. Problématiques liées au filtrage des données

Les relevés scanner étant réalisés dans des environnements industriels comme l'intérieur de centrales nucléaires, de nombreux problèmes interviennent lors du traitement : les lieux comprennent des zones à scanner complexes, encombrées, avec des formes, des textures et surtout des réflectivités différentes. Cela engendre alors un grand nombre de données dont un certain pourcentage (environ 40%) comprend des points aberrants qu'il faut alors éliminer. On peut trouver des fantômes dus au passage de personnes, des points faux ou des voiles de mariés dus à différentes causes (surfaces sombres, néons, passages du laser à travers des éléments tels que les caillebotis, réflexions sur des surfaces miroir, effets de bords, etc.), comme nous pouvons le visualiser sur la figure 2.

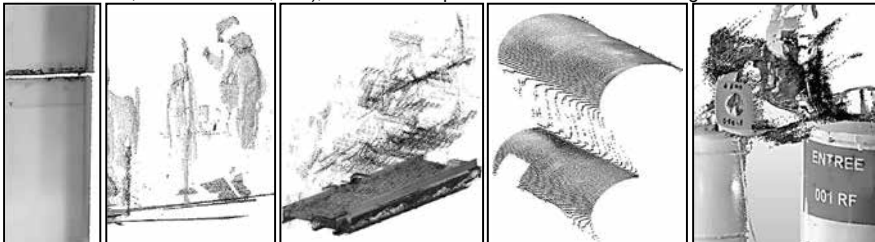


Figure 2 : Exemples de bruits à filtrer, de gauche à droite : défaut de colorisation, fantômes, traversée de caillebotis, liaison entre deux éléments, trainées dues à des éléments noirs.

Il y a aussi des problèmes de colorisation : par exemple, la couleur d'un élément en premier plan peut parfois être retrouvée en arrière-plan sur un mur, suite à une légère instabilité du scanner installé sur des caillebotis, et surtout à la non coaxialité du centre optique de la caméra et du centre de mesure du scanner. Ce dysfonctionnement ne peut être alors filtré que manuellement.

Il en découle alors un temps de traitement manuel particulièrement chronophage.

2.1. Problématique liée au géoréférencement

Le second enjeu de ce projet est d'étudier les limites du scanner dans le cadre du géoréférencement afin, éventuellement, de se passer du complément que représentent les cheminements polygonaux « traditionnels » utilisés pour garantir la qualité de celui-ci.

3. Filtrage des données

Deux types de filtrages sont réalisés manuellement : un filtrage avec tous les nuages assemblés pour enlever les problèmes les plus importants, ainsi qu'un filtrage nuage par nuage plus pointilleux. Ces deux étapes peuvent également, dans certains cas, être appliquées au filtrage automatique, même si la majorité des filtres ne fonctionnent que nuage par nuage.

Bien qu'étant des logiciels de traitement de nuages, certains logiciels ne s'intéressent pas ou très peu au filtrage automatique de nuages comme 3DReshaper ou Polyworks. Au-delà des possibilités de filtrage, les logiciels utilisés doivent être capables de traiter des projets ayant des nombres de nuages très élevés avec plus de 40 millions de points par scan. Cela élimine alors un certain nombre de logiciels comme CloudCompare, du moins dans le cadre du filtrage de nuages assemblés. Après une analyse des possibilités et au vu de ce qui se réalisait déjà dans l'entreprise, je me suis orientée plus particulièrement vers les outils de filtrage des logiciels de LaserControl de Z+F, de Trimble RealWorks mais également, grâce à une version d'essai d'un logiciel encore méconnu en Europe, InfiPoints de la société Elysium. Ces logiciels permettent de filtrer selon différents critères présentés ci-après.

➤ Filtre de portées

Selon le type de lieu scanné (petites salles, couloirs, escaliers, casemates, etc.) un filtre de portées peut être paramétré. Le but est de supprimer un grand nombre de points éloignés de la station et de garder l'ensemble des sphères visibles utilisées *a posteriori* pour la consolidation, ainsi que les plafonds ou autres éléments intéressants.

Ce filtre est utilisable sur un grand nombre de logiciels dont LaserControl, RealWorks, InfiPoints et Scene.

➤ Filtre de verticalité

Ce filtre permet de supprimer notamment les pieds de trépieds où est calé le scanner laser et visibles sur la numérisation.

Ce filtre est utilisable sous les logiciels LaserControl et RealWorks.

➤ Filtre en intensité

Les points situés sur des surfaces normales à la visée du scanner sont surexposés et peuvent être supprimés via un seuillage par intensité maximale.

Nous avons également pu remarquer que les points sombres présentaient un bruit plus important, c'est pourquoi un seuil en intensité minimal a été mis au point.

Ce filtre est utilisable sur un grand nombre de logiciels dont LaserControl, RealWorks, InfiPoints, Scene et CloudCompare.

➤ Filtre des effets de bord

Comme son nom l'indique, ce filtre sert à supprimer les points dus aux effets de bord et qui sont aux extrémités des objets ou reliés à d'autres objets. Pour chaque point, un certain nombre de points (selon le logiciel) environnants est examiné pour déterminer combien se situent dans un cône d'axe « le scanner-le point » et avec un angle spécifié par l'utilisateur. Si plus qu'un nombre N, choisi par l'utilisateur, est à l'intérieur de ce cône, alors le point considéré est évalué comme étant un « mixed pixel ».

Ce filtre est utilisable sur un grand nombre de logiciels dont LaserControl, RealWorks, InfiPoints et Scene. Selon le logiciel, ce filtre est plus ou moins performant mais permet toujours de supprimer un grand nombre de traînées.

➤ Filtre des points isolés

Le filtre « single pixel » (points isolés), ne nécessite pas les mêmes paramètres d'un logiciel à un autre, mais semble fonctionner sur le même principe de base, à savoir l'étude des plus proches voisins avec un critère de distance (différent et intégré dans les algorithmes de chaque logiciel).

Il est présent notamment dans LaserControl, RealWorks, InfiPoints, CloudCompare, Scene et 3dReshaper. Ici encore selon le logiciel, ce filtre est plus ou moins performant.

➤ Filtre d'espacement entre les points

Ce filtre permet de supprimer les points trop proches les uns des autres selon un seuil à choisir ; les points trop proches ne peuvent être le résultat d'une exactitude de mesure puisqu'inférieurs à la résolution utilisée sur le terrain.

Ce filtre est disponible dans les logiciels LaserControl, 3DReshaper et Scene.

➤ Filtre miroir

Ce filtre est utilisé si l'on scanne un objet de type fenêtre ou miroir. Dans ce cas, les données scannées auront une valeur en portée fausse car les points relevés sont reflétés. Ce filtre permet alors de projeter toutes ces données vers le plan du miroir. Ce filtre, bien qu'étant efficace, n'a malheureusement que peu de mise en pratique possible en environnement industriel car contraint par cette forme plane exigée, alors que la plupart des éléments réfléchissants sont des calorifuges cylindriques.

Il est disponible dans LaserControl.

➤ Filtre des points fantômes

Il supprime les points fantômes car visibles d'une station et non d'une autre. Ce filtre peut donc être utile dans nos cas. Cependant, le filtrage nécessite d'être fait après l'étape de consolidation, et donc de charger tous les points. On peut alors avoir à faire à un problème éventuel de saturation de mémoire pouvant causer des ralentissements ou des goulots d'étranglement dans le fonctionnement du système. Il est disponible dans InfiPoints.

4. Géoréférencement

Afin d'obtenir l'intégralité des environnements et objets désirés, plusieurs stations scanner sont réalisées ; par exemple, plus de 1300 stations ont été acquises pour la numérisation de l'intérieur d'un bâtiment réacteur. En effet, l'environnement dense et complexe nécessite la multiplication des points de vue. Il faut donc assembler dans un même système de coordonnées les nuages de points issus de stations différentes et ayant chacun un repère relatif. Ce recalage relatif est appelé consolidation et le rattachement au système de coordonnées du lieu est nommé géoréférencement.

Au sein de l'entreprise, on réalise une consolidation puis un géoréférencement indirect. Pour cela, on utilise des sphères comme primitives géométriques. Celles-ci ont l'avantage d'être facilement détectables dans le nuage de points, invariantes selon le point de vue de l'acquisition et très peu présentes dans les milieux industriels. Chaque station visualise au minimum trois sphères, réparties de façon homogène dans l'espace et dont les centres sont ensuite identifiés comme des points de correspondance entre les nuages.

Cette étape peut se réaliser sur de nombreux logiciels comme Trimble RealWorks, Z+F LaserControl (manuellement), Faro Scene, etc.

5. Résultats

5.1. Résultats du filtrage

Le tableau 1 permet de visualiser qualitativement les résultats de filtrage obtenus selon différents logiciels sur un nuage de 44 249 489 points et le nombre de points restant à la suite de ce prétraitement.

Logiciel	Nb de points	Résultats		
RealWorks	41 642 918			
Laser-Control	38 786 208			

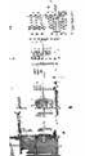
InfiPoints 	34 543 187			
PCL 	38 111 718			

Tableau 1 : Résultats de filtrage obtenu selon différents logiciels et algorithmes

On remarque ici l'intérêt de coupler les logiciels entre eux pour obtenir un meilleur résultat car chacun d'eux a son avantage. InfiPoints est particulièrement performant sur les points isolés, LaserControl sur les effets de bord. Cependant, la multiplication des logiciels ferait perdre un temps considérable d'import-export des données.

On remarque ainsi l'intérêt d'essayer de développer des algorithmes selon nos propres besoins, grâce à des bibliothèques d'algorithmes comme PCL (Point Cloud Library) par exemple.

De surcroît, certains problèmes devront toujours être filtrés manuellement tels que les défauts de colorisation, les éléments gênants comme les échafaudages, etc.

5.2. Résultats du géoréférencement

Sur un petit projet (de huit nuages et quinze sphères), on s'intéresse aux distances obtenues entre deux sphères après consolidation et par mesures tachéométriques. On peut alors observer un écart moyen en valeur absolue entre ces deux méthodes de 1.5 mm et un écart maximal de 4.2 mm (sur des distances inférieures à 8 m).

De plus, l'insertion des points topographiques peut parfois introduire des erreurs liées aux mesures tachéométriques et ainsi dégrader le résultat.

Cela signifie que les résultats obtenus lors de la consolidation sont auto-suffisants et n'exigent pas nécessairement le complément d'une importante polygonation pour améliorer sa qualité.

On pourrait alors se contenter de lever seulement quelques points topographiques (au moins trois) pour géoréférencer le projet et se recalcrer entre différentes salles. A noter que cela nécessite un positionnement des sphères à moins de 20 m des stations afin qu'elles soient correctement détectées (car comportant alors un minimum de 100 points).

5.3. Chaîne de prétraitement définie

La chaîne de prétraitement des nuages définie est visible en figure 3.



Figure 3 : Chaîne de traitement de nuages de points 3D

6. Conclusion

Ce projet a permis de faire un constat des différents problèmes et d'améliorer la qualité du filtrage automatique en analysant les différents paramètres et représente donc un gain de temps pour l'entreprise. La procédure interne de traitement a été complétée afin notamment de détailler le filtrage automatique. Une procédure de vérification des paramètres a également été créée afin de tester chaque future mise à jour du logiciel utilisé pour le filtrage avant son utilisation en production.

Par ailleurs, l'étude du géoréférencement (et de la consolidation) a permis de vérifier, sur un petit projet tout d'abord, la précision du travail réalisé au sein de l'entreprise et la possibilité de simplifier la polygonation topographique pour réaliser le géoréférencement.

En parallèle à cette étude, un banc test a été mis en place. Il sera amélioré et intégré à un système complet de contrôle du scanner interne à l'entreprise et élaboré entre les services de métrologie et de topographie permettant de fournir un certificat de contrôle de l'état de l'appareil.

Traitement d'un nuage de points scannés via GeoMos en vue d'automatiser le post traitement des données

PFE présenté par : William Peny
Société d'accueil : MIRE sas
Directeur de PFE : Pierre Gusmano
Correctrice : Tania Landes



Introduction

La société MIRE¹ effectue des opérations d'auscultation en temps réel suivant des méthodes topographique et complétées par des mesures instrumentale. L'entreprise a récemment fait l'acquisition d'une multi-station Leica Nova MS50. Cet appareil intègre le mode « scanning » et permet des mesures de nuages de points 3D. La société veut employer cette technologie pour le suivi de structure de génie civil.

Mon projet a consisté en une recherche de solution pour le post-traitement des nuages de points pour l'auscultation. Ce travail évalue la qualité des mesures effectuées et les possibilités d'automatisations du traitement des données.

Après avoir présenté les différentes méthodes d'auscultation utilisées par la société MIRE sas, je ferai l'analyse théorique des performances de la MS50. J'ai réalisé des tests de mesure sur différentes surfaces afin de déterminer les capacités et les performances de l'appareil. Une analyse comparative de différents logiciels de traitements de données 3D ainsi que les résultats des tests permettront le choix d'une méthodologie pour le traitement des données adaptées aux caractéristiques et aux contraintes liées à la surveillance d'ouvrage d'art.

1. Auscultations réalisées par la société MIRE sas

La société MIRE sas utilise différentes méthodes d'auscultation qui permettent le suivi en temps réel d'un ouvrage en fonction des mouvements à mesurer.

Le suivi par des méthodes de topographie classiques dite auscultation en mode absolu est réalisées par des instruments traditionnels comme un niveau, un tachéomètre, un scanner laser.

La surveillance d'ouvrage par tachéométrie se fait par mesure de distance et d'angles sur des prismes fixés sur la structure. Cette méthode permet d'obtenir des résultats rapidement de manière locale avec une précision de $\pm 2\text{mm}$. Avec l'aide d'un caisson de communication, cette méthode a été automatisée et permet l'auscultation en temps réel.

Le suivi par des méthodes d'instrumentation des ouvrages (auscultation en mode relatif) permet de compléter les méthodes topographiques. Les capteurs utilisés permettent de mesurer des inclinaisons, des rotations, des déformations, la température, etc.

L'utilisation d'un scanner laser permet de réaliser des levés exhaustifs d'une structure. Cette méthode permet un suivi non plus local mais global de l'ouvrage. Après un traitement des données, la précision est de l'ordre millimétrique. Toutefois, le scanner laser ne permet pas de mesurer précisément un point défini par un repère.

¹ Mètres, Implantations, Relevés, Etudes

2. La multi-station MS50

La MS 50 est un tachéomètre robotisé équipé d'une fonction scan. La précision de mesure de distance est $1\text{mm} + 1.5\text{ppm}$ sur prismes et de $2\text{mm} + 2\text{ppm}$ pour des mesures sans prismes. La précision angulaire (horizontale et verticale) est de 0.3 mgon . C'est un scanner laser à impulsions. Les données constructeurs nous informent qu'il a une portée de scan pouvant atteindre jusqu'à 1000m , et qu'il est possible de prendre 1000 points par secondes jusqu'à 300 mètres.



Figure 1 : Multi-station Leica Nova 50

Les mesures prises par cet appareil peuvent être entachées d'erreurs entraînant une incertitude. Celles-ci peuvent être dues aux fautes, aux erreurs accidentelles et aux erreurs systématiques, même si ces dernières peuvent être éliminées si l'appareil est correctement réglé. Pour la fonction scan, la fiche technique de l'appareil donne comme bruit de mesure 0.8mm à 50m . Le fichier du nuage de points généré est au format ScanDataBase.

3. Tests de la MS50 et expérimentations de mesure sur différents types de surface

Nous avons réalisé plusieurs tests sur la fonction scan que nous offre la MS50. Cette étude a été réalisée sur différents types de surfaces (bâtiments, terrain naturel), et suivant différents paramétrages de l'appareil afin de connaître la précision des mesures et des dans ces différents cas.

Le premier test réalisé est une comparaison sur une surface géométrique (bâtiment avec une façade ondulée) sur laquelle nous avons installé une plaque en PVC dont nous connaissons les dimensions. Tout comme la distance entre la plaque et la surface comme représentés sur la figure 2. Il a été fait de même pour une surface naturelle. L'objectif est de déterminer la précision que l'on peut obtenir sur les mesures ainsi que sur les résultats issus de la comparaison de deux états. Ce test nous a permis de constater que les résultats sur les écarts types sont conformes à ceux annoncés par le constructeur.



Figure 2 : Position de la plaque par rapport à la façade (vue de profil)

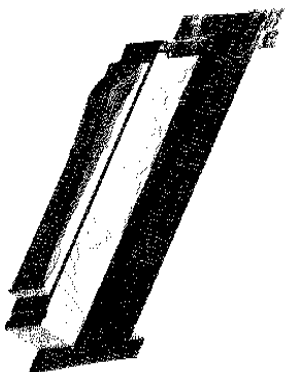


Figure 3 : Scan d'une fenêtre encaissée

Le deuxième test est une étude de la réflectance. Suivant le type de surface scannée, les matières qui composent l'objet n'ont pas toutes la même réflectance et cela peut impacter sur la mesure de distance. En effet, plus la surface sera sombre ou humide et plus la précision et l'exactitude de la mesure seront mauvaises.

Le troisième test est une mesure de points encaissés comme le montre la figure 3. On remarque que suivant le type de matériau, la distance est faussée. Cependant pour la majorité des matériaux, l'encaissement ne modifie pas la distance de manière significative.

Les différents paramétrages qu'il est possible de définir nous ont permis de déterminer le meilleur choix pour la densité de points en fonction de l'objet à scanner (pas angulaire ou en distance) afin d'optimiser le temps de scan sans perdre en précision sur le traitement des données et les résultats issus de la comparaison entre deux états.

Ces tests nous ont permis de déterminer la précision des mesures suivant les différents types de surfaces. Cette précision est de l'ordre de $\pm 3\text{mm}$ sur des surfaces géométriques (ouvrage en béton, pierre...), à $\pm 8\text{mm}$ sur des surfaces naturelles.

4. Recherche de solution

La société MIRE sas dispose d'un panel de logiciels permettant le traitement de nuages de points tel que Leica Infinity et Cyclone développés par Leica Geosystems, 3DReshaper développé par Hexagon ou encore Cloud Compare, un logiciel libre.

L'étude comparative des différents logiciels est résumée dans le tableau 1. Nous avons pris en compte les fonctions de lecture de type de fichier, de filtrage, de maillage, des différents types de comparaison possible (Nuage-Nuage, Nuage-Maillage et Maillage-Maillage) et enfin le prix d'une licence.

	Filtrage	Maillage 3D	Comparaison			Prix
			Nuage-Nuage	Nuage-Maillage	Maillage-Maillage	
Leica Infinity	+	+	NON	NON	NON	~ 10000 €
Cyclone	++	+++	NON	NON	NON	~ 12000 €
3D Reshaper	++	+++	+++	+++	+++	~ 6000 €
Cloud compare	++	++	+++	+++	NON	Gratuit (Logiciel libre)

(+ : moyen, ++ : bon, +++ : très bon)

Tableau 1 : Comparaison des logiciels

5. Réalisation de l'automatisation de la procédure

Suite à l'étude comparative des logiciels et des tests réalisés, une méthodologie a été mise en place pour le traitement des données comme représentée par la figure 2. Il a été fait le choix d'une combinaison de logiciels et de scripts.

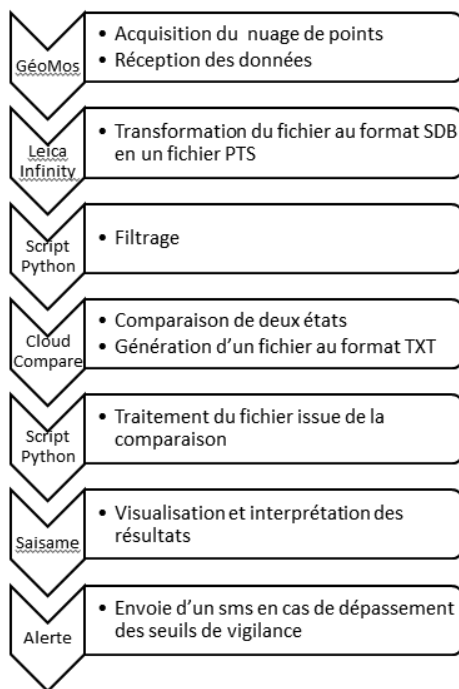


Figure 2 : Méthodologie de la procédure du traitement

L'automatisation de ce post-traitement a été réalisée à l'aide de fichiers batch, de scripts rédigés en langage python et autres langages informatiques.

Conclusion

Ce projet a permis d'expérimenter et de découvrir de nouvelles méthodes d'auscultation automatique d'ouvrage avec l'utilisation de la multi-station Leica Nova 50 et sa fonction de scan.

L'étude des résultats obtenus suite aux différents tests ont permis de déterminer que la précision des mesures est influencée par le type et les propriétés des surfaces scannées et par les conditions météorologiques.

Le développement de plusieurs scripts ont permis l'automatisation du traitement des nuages de points afin de pouvoir effectuer de l'auscultation en temps réel. Toutefois, ces programmes devront faire l'objet de maintenances et d'améliorations afin d'affiner les performances du système pour répondre aux futurs défis de missions d'auscultation et aux besoins des clients.

Etude technique concernant les auscultations automatiques par différents supports tels que des stations totales de précision et des scanners lasers 3D

PFE présenté par : **Joseph Guilleroy**
Société d'accueil : **Alpes Topo**
Directeur de PFE : **Cedric Daures**
Correcteur : **Emmanuel Alby**



1. Présentation de l'étude

De nombreux ouvrages sont régulièrement contrôlés via des mesures topographiques afin de détecter tout type d'évolution (affaissement, apparitions de fissures, ...), ce processus est appelé auscultation. Les auscultations sont souvent utilisées afin de protéger les monuments importants pour le patrimoine, on pourrait entre autres citer la surveillance constante de la tour de Pise. La plupart des chantiers d'auscultations sont cependant liés à la sécurité, 90% des chantiers concernent la vérification de l'intégrité du réseau ferroviaire, mais on retrouve également les surveillances de barrages ou le suivi des risques d'effondrement lors d'une construction souterraine.

L'un des soucis de l'auscultation est le fait qu'elle doit être effectuée en continu, nécessitant donc une équipe conséquente avec des relais d'opérateurs. L'automatisation des stations totales est donc un grand pas en avant. Rapidement, les trois fabricants principaux ont créé leur propre logiciel d'auscultation automatique : Geomos pour Leica, 4D Control pour Trimble et Delta pour Topcon. Par la suite, plusieurs grandes entreprises, comme Soldata ou Itmsol, ont développé leur propre logiciel afin de se démarquer lors des appels d'offres. Désormais, d'autres entreprises, de taille plus réduite, commencent à suivre ce mouvement. Cette tendance est encore accélérée par le fait que la SNCF et la RATP refusent de plus en plus de projets d'auscultations manuelles lors des appels d'offres, pour se concentrer sur les propositions d'auscultations automatiques.

Alpes Topo dispose déjà d'une grande expérience dans le domaine de l'auscultation manuelle, possédant entre autres une macro Excel interne à l'entreprise facilitant grandement le traitement et la présentation des données. L'entreprise a donc de nombreux clients potentiels pour des auscultations automatiques, il ne lui manque que le matériel et la formation. Bien qu'ayant été historiquement en partenariat avec Leica pour ce qui est du matériel, l'automatisation des auscultations nécessite de toute façon l'achat de nouveaux appareils et de nouveaux logiciels. Alpes Topo peut donc observer les différentes solutions existantes sur le marché sans craindre le coût supplémentaire que pourrait apporter un changement de marque.

Les différentes solutions seront donc comparées sur plusieurs niveaux. Premièrement vient bien sûr la comparaison financière. Alpes Topo a l'opportunité de répondre à de nombreux appels d'offres, ainsi la société tente de présenter des prix inférieurs à la concurrence afin de remporter ceux-ci lui permettant d'amortir ses coûts du matériel physique et informatique. Une solution moins onéreuse partira donc avec un avantage lors du choix final. La deuxième étape est la comparaison au niveau de l'ouverture de la solution aux éléments externes. En effet, comme évoqué plus haut, Alpes Topo a pour objectif à long terme de développer sa propre solution en intégrant ses propres éléments au logiciel. Ceci permettrait non seulement d'avoir un meilleur contrôle sur les résultats obtenus, mais aussi une nouvelle fois de se distinguer des concurrents lors d'un appel d'offre. Enfin, vient la

comparaison technique, portant à la fois sur la fiabilité des résultats, mais aussi sur la rapidité du logiciel à détecter une anomalie et déclencher une alarme, et enfin sur les différentes options disponibles dans le logiciel.

2. Spécificités de l'auscultation automatique

Premièrement, la principale différence entre les auscultations automatiques et le reste des opérations topographiques est bien évidemment l'absence d'opérateur. La station totale reste donc sans surveillance pendant des semaines (voire plus) sur un chantier plus ou moins difficile d'accès. Il convient donc de prendre des dispositions contre un potentiel vol. Pour cela, les appareils sont souvent placés en hauteur ou dans des lieux difficiles d'accès, par exemple sur un poteau ou le toit d'un bâtiment adjacent. Sur certains chantiers, une cage métallique entoure également l'appareil pour limiter encore le risque de vol. Pour finir, la discrétion reste le meilleur atout des stations totales pour ne pas être dérobées. Pour cela, certaines ont pour option de couper l'éclairage de l'écran, même en fonctionnement, ce qui leur évite d'attirer l'attention sur elles la nuit. Les moteurs des dernières stations robotisées sont également beaucoup moins bruyants que leurs prédécesseurs.

L'absence d'opérateur pose également un souci au niveau de l'export et de la sauvegarde des données. Pour le résoudre, les fabricants ont adopté une structure similaire : l'appareil est relié sur site à un boîtier de communications qui enverra les données ou à un ordinateur, qui doit alors être allumé en permanence, ou encore à une base de données accessible par internet. L'autonomie de la station totale n'est donc plus le seul facteur du bon fonctionnement des opérations : le boîtier nécessite lui aussi une alimentation et une perte de connexion internet est une menace constante.

Vient ensuite la gestion des tolérances. Un prisme posé sur un flan de barrage aura bien évidemment une tolérance très basse puisque des mouvements, même infimes, pourraient signifier que la structure est en train de céder. A l'opposé, si un prisme est posé sur une structure métallique, une tolérance plus importante sera nécessaire pour s'adapter aux déplacements provoqués par les effets des changements de températures sur la structure. Enfin vient le cas d'un prisme posé sur un rail pour une surveillance du réseau ferroviaire. Les tolérances doivent être basses puisqu'un déplacement permanent pourrait provoquer un déraillement. Cependant, il a fallu trouver une méthode pour éliminer les alarmes provoquées par les vibrations dues au passage d'un train, vibrations qui font sortir le prisme des tolérances, bien qu'il y revienne par la suite. Pour résoudre ce problème, lorsqu'un prisme sort des tolérances, la station totale prendra une nouvelle mesure quelques minutes plus tard et n'enverra une alarme que si cette nouvelle mesure est elle aussi hors tolérances.

Puisque tous les traitements de données sont désormais effectués automatiquement, il faut prévoir des logiciels ayant la capacité de combiner des données provenant de stations totales avec celles issues d'autres capteurs. Certains chantiers nécessitent l'utilisation d'extensiomètres, d'inclinomètres ou de mesures GNSS. Des auscultations manuelles sont parfois aussi réalisées en compléments des automatiques. Les fabricants doivent prêter attention à bien pouvoir intégrer toutes ces données dans le rendu.

Enfin, dû au fait que ces auscultations se déroulent en continu, il devient difficile de réaliser des rapports pour chaque opération comme lors des auscultations manuelles. Les logiciels peuvent donc automatiser également ces rapports afin de les envoyer à des intervalles de temps réguliers avec les dernières données. Le géomètre ne pourra pas non plus toujours être disponible pour mettre en place de nouveaux graphiques si le client décide de comparer les évolutions de certains prismes. Pour cette situation, les logiciels sont pourvus d'un accès pour le client, qui pourra voir en direct les dernières mesures et créer des nouveaux rapports ou graphiques s'il en ressent le besoin, mais il ne pourra pas modifier quoi que ce soit au niveau des cycles de mesures, de la gestion des alarmes ou de l'envoi des rapports créés par le géomètre.

3. Comparaison des solutions

La première tâche de ce projet a été de prendre contact avec les fournisseurs afin d'obtenir le matériel nécessaire aux tests et de déterminer lors des entretiens les principales différences auxquelles nous pouvions nous attendre. Nous avons donc pu discuter des avantages et inconvénients de leurs solutions respectives avec Jérémy Pichot, ingénieur de vente Ile de France chez Leica, avec Michel Grenut et Chris Emery, respectivement Responsable Géomatique France et Business Manager Monitoring Solutions Europe chez Topcon, mais aussi avoir un avis extérieur grâce à Olivier Fernoux, Ingénieur d'affaire Itmsol que nous avons rencontré sur l'un de leurs chantiers d'auscultations à La Défense pour observer le système une fois mis en place. Malgré plusieurs tentatives de contact, nous n'avons eu aucune réponse de Trimble.

De ces différents entretiens, deux conclusions s'imposent :

S'étant lancé plus tôt dans le domaine de l'auscultation automatique, Leica a d'avantage d'expérience et cela se ressent dans le logiciel. La liste des capteurs alternatifs (inclinomètres, etc) combinables avec Geomos par exemple est plus exhaustive que son homologue. De même, de nombreuses fonctionnalités ne sont pas encore disponibles dans la solution Delta. Celle-ci reçoit tout de même fréquemment des mises à jour pour rattraper son retard.

Topcon propose cependant une solution bien plus paramétrable. Le meilleur exemple concerne les cycles de mesures : pour chaque groupe de points mesurables, Geomos ne demande comme paramètres qu'une heure de départ et un pas défini entre les cycles. Ce qui est suffisant pour la plupart des chantiers, mais certains nécessiteront un calendrier de mesure plus précis, avec par exemple des mesures continues lors de travaux à proximité et un retour aux cycles plus classiques la nuit. La solution Topcon a également l'avantage d'être plus ouverte à des éléments internes à Alpes Topo, là où Leica se montre plus réticente.

Pour nous faire une meilleure idée, nous avons eu l'occasion de tester ces deux appareils et logiciels en parallèle (cf. Figure 1). Leica nous a donné une version test de Geomos disponible de la mi-juin à la mi-juillet, pendant que Topcon nous prêtait l'ensemble de sa solution pour deux semaines en début juillet. Nous avons donc installé huit prismes sur le toit de l'immeuble d'Alpes Topo, que nous avons mesuré en continu pendant deux semaines dans des conditions météorologiques variées. Au moment d'écrire ce résumé, le test vient de commencer, je ne peux donc pas encore donner les résultats définitifs.



Figure 1 : début du test simultané le 5 Juillet 2017

4. Application à un chantier réel

Ce projet avait comme objectif principal de permettre à Alpes Topo de se positionner sur les appels d'offre d'auscultation automatique. Un premier chantier se dessine déjà, avec la surveillance des voies de la ligne du RER B lors du creusement d'un tunnel sous la gare d'Orsay-Ville fin septembre.

Ce chantier reste de taille modérée, il ne devrait durer que trois jours, bien que l'appareil soit immobilisé un mois dû aux exigences de la RATP qui veut que le système d'auscultation soit en place deux semaines avant les travaux et ne soit retiré que deux semaines après. Seules des mesures tachéométriques seront nécessaires. La question des capteurs compatibles ne se posera donc pas cette fois ci. En revanche, les mesures seront plus précises si elles sont effectuées entre les passages des trains. Le planning détaillé des mesures de Topcon devient donc un argument de poids ici pour éviter ces passages.

5. Conclusion

Malgré le partenariat continu avec Leica depuis la fondation d'Alpes Topo, il semblerait donc que Topcon ait légèrement l'avantage, principalement dû à son ouverture aux solutions internes aux entreprises. Cet argument est capital puisque c'est déjà lui qui leur a rapporté la clientèle d'Itmsol et Soldata qui, bien qu'ayant développé leur propre logiciel sur le long terme, continuent d'utiliser leurs stations totales. Cependant, la solution Delta présente de nombreux inconvénients dus aux options encore non développées, mais le test effectué début juillet nous dira si ces difficultés sont surmontables.

Mise en place d'un procédé de relevé photogrammétrique par drone au sein du cabinet SEGC Topo et étude de la trajectographie du drone

PFE présenté par : **Mlle Inès PORTES**
Société d'accueil : **SEGC TOPO**
Directeur de PFE : **M. Julien MACCAGNAN**
Correcteurs : **M. Mathieu KOEHL**



1. Contexte et objectif de l'étude

Le domaine du drone est de plus en plus exploité dans le monde des géomètres. Il permet, à partir de photographies aériennes, de réaliser des modélisations en 3D, des orthophotos, de cartographier de vastes étendues et de surveiller de grands réseaux. L'utilisation d'un drone permet un gain de temps non négligeable, une réduction des coûts, une facilitation des démarches, ainsi qu'un rendu visuel intéressant. Par conséquent, de nombreuses techniques permettant de simplifier le déroulement de missions par drone ont vu le jour. Le cabinet de géomètre-expert SEGC TOPO a fait l'acquisition d'un drone pour développer un nouveau pôle au sein de leur structure ayant pour but de réaliser des projets photogrammétriques. Ce drone a été construit sur mesure par la société Aerovision06 pour répondre à des demandes précises dont le respect du poids, l'autonomisation du drone et la qualité des photographies. Le vol est automatisé par le logiciel de planification de vol UGcS en utilisant le signal GPS. Malheureusement, en l'absence du signal, il n'est pas possible d'automatiser le vol et c'est pour cela que l'étude de sa trajectographie permettrait de connaître la position et l'orientation exacte de l'APN (Appareil Photo Numérique D5200) lors de l'acquisition des photographies. Cette détermination peut se faire en synchronisant les différentes données produites par le suivi du drone en utilisant une station totale Leica Nova MS50 et en récupérant les données de la centrale inertielle.

2. Matériel utilisé

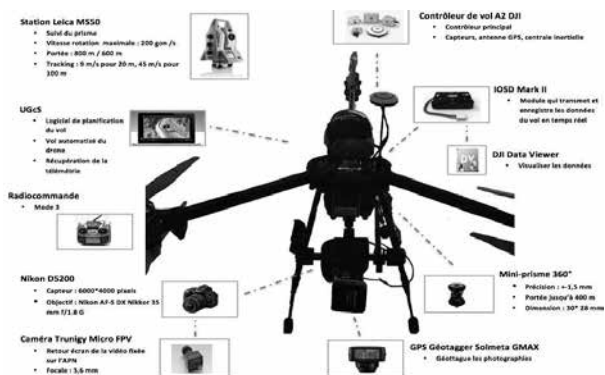


Figure 1 : Ensemble du matériel utilisé lors de l'étude

3. Pré-étude de la trajectographie

L'étude de la trajectographie se réalise en combinant plusieurs types de données dont l'information de positionnement fourni par le GPS, la station Leica MS50 et les accéléromètres ainsi que l'information d'orientation obtenue à partir des mesures du gyroscope intégré à la centrale inertielle. Les données de la centrale inertielle sont fournies après double intégration par le filtre de Kalman.

a- Etude de la fréquence d'acquisition du MS50

Afin de diminuer le plus possible la latence influencée par les différents capteurs asynchrones de la station totale (distance, angles, etc.), les mesures sont effectuées en mode Continue +. Différents tests en statique et cinématique, que l'on retrouve dans le tableau 1, ont été réalisés pour étudier la fréquence d'acquisition du MS50. On retient alors la fréquence de mesure de 0,2 secondes, fréquence pour laquelle l'écart moyen quadratique (emq) apparaît le plus faible.

Fréquence des mesures (s)	Résultats de l'étude sur la fréquence mesure MS50				
	0.1	0.2	0.5	1	2
Nb de mesures	100	100	100	100	100
Moyenne (s)	0.185	0.22	0.552	1.044	2.049
Emq (s)	0.092	0.038	0.065	0.056	0.062
Ecart-type (s)	0.037	0.033	0.039	0.034	0.038

Tableau 1 : Etude sur la fréquence d'acquisition de la MS50

b- Etude sur l'optimisation de la distance, de l'altitude et de la vitesse entre le prisme et la station Leica MS50

L'utilisation du drone est soumise à différentes contraintes techniques et réglementaires pour assurer la sécurité des personnes. Le scénario 3 est le plus utilisé dans un cabinet de géomètre. Ce scénario est caractérisé par un vol en agglomération en vue directe du télépilote, à une distance horizontale maximale de 100 mètres et une hauteur de 150 mètres. Des tests ont été réalisés en prenant en compte ces règles. On observe qu'à partir d'une hauteur de 60 mètres, l'appareil a du mal à suivre le drone sauf si on s'éloigne au maximum des limites autorisées, le drone peut alors monter jusqu'à 70 mètres. Cette solution peut alors être retenue lors d'acquisition dans un tunnel où la hauteur est de seulement quelques mètres. Par contre, pour le suivi du drone le long d'une falaise, la hauteur est un élément important, il faudrait placer le prisme perpendiculairement à sa position initiale pour que l'appareil ne vise pas la partie non réfléchissante du mini-prisme

Après avoir effectué quelques tests sur le suivi du drone suivant sa vitesse, nous avons pu remarquer que la station totale n'a pas de problème à suivre le drone pour les vitesses utilisées lors des missions photogrammétriques. En général, pour ces missions, la vitesse du drone varie entre 1m/s et 4m/s. Il est évident que moins le drone est rapide, plus l'appareil est en capacité de suivre le drone mais le vol sera plus long et consommera donc plus de batterie. Il faut trouver un compromis entre les deux : une vitesse de 2m/s paraît convenable.

c- Récupération et organisation des données

L'étude des données du tableau 2 provient d'une mission réalisée à Villefranche-sur-Mer pour la réalisation d'une orthophoto de la digue, ainsi que la réalisation d'un nuage de points qui a été par la suite combiné à un levé bathymétrique.

Pour récupérer les données en fonction du temps à partir de la station totale Leica MS50, il est important que l'appareil soit doté du module *.temps permettant d'exporter la date et l'heure locale de l'appareil à laquelle les mesures ont été prises. Ensuite, il est possible de récupérer les données du drone à partir du logiciel de planification de plan de vol UGCS. Celui-ci permet d'enregistrer les télémetries de chaque vol en fichier *.tlm qui peuvent être converties en fichier *.csv en exécutant un fichier de commande

sous Windows. Nous avons accès à une fréquence moyenne des mesures de 0,373 secondes dans le temps local de l'ordinateur. La récupération automatique des données de l'appareil photo Nikon D5200 se fait en utilisant le logiciel DNRGPS permettant l'accès à l'heure de déclenchement des photographies à la seconde près et à la position en WGS84 de l'APN lors de l'acquisition. Le positionnement et l'orientation des photos sont aussi enregistrés par le Géotagger Solmotera 2.3 dans les trames NMEA « National Marine Electronics Association » en pack de 4 trames. On remarque alors, pour une même heure, une différence de l'ordre de la seconde entre les données de positionnement du géotagger et celles enregistrées par l'APN. Pour la suite des comparaisons, on retient les données de positionnement issues du géotagger.

Il est important de convertir les différentes données issues des différents capteurs pour pouvoir les comparer (tableau 2) :

	Leica		UGcS		Géotagger	
	Données	Unité	Données	Unité	Données	Unité
Heure	Heure locale de l'appareil	Milliseconde	Heure locale de l'ordinateur	Milliseconde	Heure UTC	Seconde
Position	E.N.Z (RGF93)	Mètre	Longitude, Latitude, Hauteur ellipsoïdale (WGS84)	Degrés et Mètre	Longitude, Latitude, Hauteur ellipsoïdale (WGS84)	Degrés et Mètre
Orientation	Non fournie		Roulis, Tangage, Route, Cap vrai	Degrés	Roulis, Tangage, Cap vrai, Cap Compas	Degrés

Tableau 2 : Données issues des différents appareils

Pour pouvoir comparer le lacet, de faire une différence entre la route et le cap vrai pour les données télémétriques.

d- Synchronisation des temps

La synchronisation des temps entre le temps de l'appareil photo et le temps local de l'ordinateur peut se faire directement sur le logiciel UGcS. Ce temps se calcule en prenant avec l'APN une photo de l'écran lorsque l'horaire de l'ordinateur est affiché à la milliseconde. Ensuite, en exportant la photo sur l'ordinateur, nous avons accès à l'heure de début de l'acquisition de la photo. On obtient alors la différence de temps entre l'heure sur la photo et l'heure de l'ordinateur.

La synchronisation entre les mesures de la station totale MS50 avec l'ordinateur, soit la télémétrie du vol se fait en changeant la direction horizontale du prisme en mouvement de manière radicale. Il est ainsi possible de faire correspondre les changements de directions enregistrés par l'appareil et la télémétrie afin d'observer le décalage horaire.

e- Précision des données

A partir du traitement sous Photoscan des images acquises lors de la mission effectuée à Villefranche-sur-Mer, nous avons pu comparer les différentes données de positionnement et d'orientation issues des divers appareils (Géotagger et UGcS) en prenant comme références les résultats issus du logiciel photogrammétrique. On remarque que les données de positionnement sont relativement cohérentes entre elles. La comparaison des angles d'Euler montre une meilleure précision pour la centrale inertielle que pour le géotagger, avec tout de même des écarts allant jusqu'à 5° pour le roulis et le tangage et jusqu'à 8° pour le lacet.

Ainsi, pour déterminer l'orientation de la caméra à chaque acquisition, les angles d'Euler issus de la centrale inertielle du drone seront utilisés.

4. Préparation de la mission

L'objectif de l'étude étant d'effectuer un vol sans signal GPS, le vol se fait en manuel. Pour cela, nous utilisons un logiciel de bathymétrie, Hypack, permettant de suivre en temps réel la position du drone. L'engin suit un profil préalablement défini à partir des coordonnées WGS84 des Waypoints issus d'UGcS puis transformées en RGF93. Les données de la station totale MS50 sont transmises via le carnet de terrain CS15 connecté à l'ordinateur. Lors de la réalisation du plan de vol sous UGcS, il est important de cibler la zone à photographier et de définir l'ensemble des paramètres photogrammétriques : hauteur de vol, focale, vitesse du drone, recouvrement, résolution au sol, nombre de bandes, nombre de photos. Le nombre et la position des points d'appui doit aussi être préalablement étudiés car cela aura une influence sur la précision des résultats.

5. Résultats

Les tests effectués à l'aéroclub de la Gaude ont montré différents problèmes. Le suivi du profil en mode manuel préalablement défini sur Hypack nécessite une grande maîtrise de pilotage, des conditions météorologiques optimales, ainsi qu'un choix stratégique de l'emplacement de la station totale MS50. Ces conditions n'étant pas réunies lors des tests, nous avons réalisé l'étude de la trajectographie du drone à partir d'un vol automatique. Après nettoyage du fichier de points, on obtient la trajectographie du drone. Mais le positionnement de la caméra et du prisme n'étant pas confondu et dans le même système, il est important de calculer, à partir d'une matrice rotation, le positionnement exact de l'APN. Il est alors possible de comparer les résultats que l'on retrouve dans le tableau 3 entre le positionnement des caméras donné par PhotoScan avec ceux obtenus par le géotagger et par l'étude de la trajectographie :

	Ecart entre les données EXIF et les données PhotoScan	Ecart entre les données MS50 et les données PhotoScan
Ecart en X (m)	1,163	0,117
Ecart en Y (m)	2,983	0,279
Ecart en Z (m)	4,869	0,331

Tableau 3 : Résultats du positionnement de l'APN après l'étude de la trajectographie

5. Conclusion

Les drones ont un réel potentiel pour les levés photogrammétriques. En effet, ils permettent rapidité et facilité du levé dû aux différentes technologies d'automatisation du vol à partir des signaux GPS. Cependant, on remarque qu'en absence de signal GPS, le processus peut apparaître plus complexe. Dans un premier temps, suivant les composants du drone, l'accès aux données est réduite car certains contrôleurs de vol fonctionnant comme des boîtes noires. De plus, la mise en place du processus est beaucoup plus longue et la sensibilité du drone en mode manuel oblige une certaine expérience du pilote pour pouvoir suivre un profil particulier. En effet, dans ce mode de pilotage, le drone est très sensible aux éléments extérieurs et subit une dérive permanente.

La synchronisation apparaît aussi comme un élément essentiel de l'étude, aspect qu'il faudrait améliorer. Le déclenchement et l'enregistrement des photos à partir du drone permettrait de récupérer l'heure exacte de la prise d'acquisition.

Des solutions en train d'être développées par Leica vont permettre d'automatiser le vol du drone sans signal GPS en se basant sur la méthode SLAM ou en envoyant les données de l'appareil au drone par Bluetooth.

Test et évaluation de l'influence de paramètres d'acquisition UAV sur la précision des données et détermination de la solution optimale pour l'entreprise LE34

PFE présenté par : **Gaëlle Le Bigot**
Société d'accueil : **LE34**
Directeur de PFE : **Søren Aage Nørnølle**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**

LE34

1. Contexte de l'étude

Ce projet de fin d'études est réalisé dans l'entreprise danoise LE34, au sein du bureau de Copenhague. Elle constitue la plus importante entreprise scandinave dans le domaine de la topographie, avec 23 bureaux et 350 salariés répartis dans l'ensemble du pays.

Le drone est devenu, depuis plusieurs années, un outil très utilisé dans le domaine de la topographie. Il constitue une alternative technologique financièrement abordable, de mise en œuvre facile et permettant l'acquisition de données dans des zones difficiles d'accès et ce en un temps limité. Le marché du drone a également explosé pour les particuliers, avec la multiplication des plateformes UAV et des logiciels de traitement des données photogrammétriques. Ainsi, il est aisé pour quiconque de créer son propre modèle 3D, ou orthophoto. Il apparaît donc important pour les géomètres de se démarquer en garantissant la précision des données qu'ils produisent, et utiliser leurs connaissances techniques et théoriques pour optimiser l'utilisation de cet outil.

2. Objectifs de l'étude

Le département responsable de l'acquisition UAV de l'entreprise LE34 s'est développé au cours des dernières années, et réalise de plus en plus d'acquisitions pour différents clients. Elle dispose de plusieurs drones : un octocoptère, un quadricoptère DJI 4 pro, et un drone fixed wing développé pour l'entreprise, appelé LE34 ScanWing, sur lequel porte l'étude (illustré en figure 1).



Figure 1 : Drone LE34 ScanWing

L'entreprise a donc une expérience importante dans le domaine. Néanmoins, elle souhaite optimiser les paramètres de vol qu'elle utilise. Il ne s'agit pas de changer la procédure d'acquisition mais d'ajuster les paramètres qui peuvent être modifiés afin d'améliorer l'efficacité de l'acquisition, et la qualité des résultats. Le but est de déterminer dans quelle mesure la variation de chacun de ces paramètres influe sur la précision des données traitées, et en même temps quel est son impact sur la durée et la complexité de l'acquisition et du traitement. Par la suite, en comparant ces résultats, et les attentes de l'entreprise, la ou les solution(s) optimale(s) seront déterminées. Les paramètres qui ont été testés et pour lesquels nous avons fait varier la valeur sont les suivants : la focale de l'appareil photo, l'altitude de vol, l'organisation des points de contrôle et le recouvrement entre les photos. Un seul paramètre varie à chaque fois, les autres sont conservés avec une valeur standard fixée au préalable.

a. Organisation des points de contrôle

Lors du calcul des données avec le logiciel, des points connus en coordonnées et matérialisés sur le terrain sont ensuite marqués sur un certain nombre de photos et servent à localiser le modèle et à le fixer en planimétrie et en altimétrie. Les projets

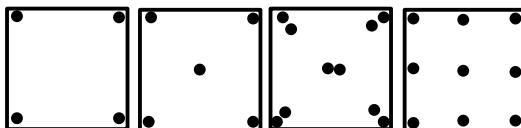


Figure 2 : Organisations des points de contrôle

ont été calculés avec quatre organisations de GCPs différentes : quatre points, cinq points, dix points et neuf points, comme illustré sur la figure 2. Le but est de valider qu'un point au centre de la zone soit important pour l'obtention de données de précision supérieure, ainsi que de déterminer si les schémas à neuf et dix points améliorent cette précision et ce dans quelle mesure.

b. Focale de l'appareil photo

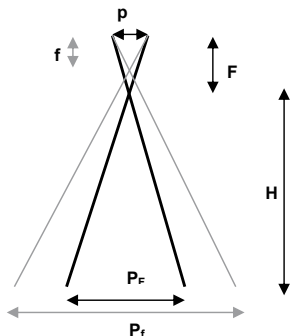
Deux lentilles de focale différente ont été testées : 16mm, qui est celle usuellement utilisée par l'entreprise, et 20mm. Ce sont des lentilles à focale fixes, utilisées avec le même appareil photo, le Sony ILCE-QX1 (20,1Mp, capteur 23,2*15,4mm). Comme illustré dans la figure 3, plus la focale est grande et plus le pixel objet est petit, et donc plus les photos seront nettes, mais aussi étroites. L'étude doit permettre de montrer quelle influence cela a sur l'exactitude des données une fois traitées.

c. Altitude de vol

Trois altitudes ont été testées : 60m, 75m et 120m. 75m constitue une altitude standard de vol. 120m est l'altitude maximale légale de vol UAV au Danemark, alors que 60m est par expérience l'altitude minimale permettant un calcul efficace sous Pix4D.

d. Recouvrement entre les photos

Pour chaque vol, les photos ont été prises à la fréquence d'un cliché par seconde. Connaissant la vitesse du drone, son altitude et la taille du capteur, nous avons donc pu calculer le recouvrement entre les photos. Par la suite, nous avons considéré seulement une photo sur deux, trois ou moins pour faire varier ce recouvrement.



p : pixel image
f, F : focales avec $f < F$
 P_F : pixel objet avec focale F
 P_f : pixel objet avec focale f
H : altitude de vol

Figure 3 : Explication de la relation entre focale et pixel

3. Acquisition des données et traitement

La zone d'étude est un carré de 200m de côté. Afin de pouvoir réaliser l'évaluation de la qualité des données, quarante-huit points, matérialisés par des cibles métalliques à damier, ont été mesurés avec une station totale Trimble S8 DR Plus dans les deux sens de la lunette. Les coordonnées ainsi obtenues sont d'une précision supérieure aux données issues de l'acquisition photogrammétrique, et peuvent être considérées comme valeurs vraies pour ces points. Quatre de ces points sont situés en dehors du schéma de points de contrôle permettant d'évaluer le comportement du modèle dans cette zone. Les points de contrôle ont été mesurés de la même manière. Partant du principe que les erreurs des données traitées ont une répartition symétrique sur la zone d'étude, il a été décidé d'organiser les points d'évaluation en trois lignes comme représentées sur la figure 4. Cela permet d'avoir une densité de points importante sur ces lignes afin d'obtenir une représentation explicite de la répartition des erreurs sur la zone, et ce en limitant le nombre de points à mesurer.

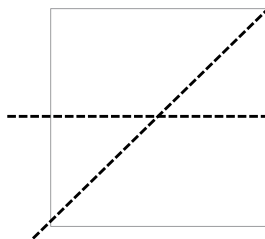


Figure 4 : Positionnement des points d'évaluation

Table 1 : Récapitulatif des vols

	Focale	Altitude
Vol 1	20mm	60m
Vol 2	20mm	75m
Vol 3	20mm	120m
Vol 4	16mm	60m
Vol 5	16mm	75m
Vol 6	16mm	120m

L'acquisition a été réalisée avec le drone LE34 ScanWing. L'ensemble des six vols a été effectué le même jour dans l'objectif de maintenir les mêmes conditions pour toutes les acquisitions et de pouvoir comparer ces données par la suite. De plus, à chaque vol les conditions atmosphériques ont été relevées pour contrôler leur évolution.

Les vols ont été planifiés au préalable de l'acquisition avec le logiciel Mission Planner. Le vol en lui-même s'effectue donc en mode automatique, seuls le décollage et l'atterrissage sont en mode manuel. Le traitement des données est réalisé avec le logiciel Pix4D. Il s'agit du logiciel habituellement utilisé par l'entreprise. Les points mesurés avec la station totale sont

importés dans le projet. Les points de contrôle permettant de fixer le projet sont enregistrés en tant que GCPs (Ground Control Points) tandis que les points d'évaluation sont enregistrés en tant que Checkpoints. Les Checkpoints n'interviennent pas dans le calcul du projet. Dans son Quality report, le logiciel délivre les écarts entre les coordonnées des points mesurés et celles de ces mêmes points dans le modèle. C'est à partir de ces écarts que nous analysons la précision des données traitées. Les écarts en X et Y permettent de valider la position des points marqués, mais seuls les écarts en Z font l'objet de l'étude de précision. L'analyse est réalisée en comparant les écarts directement, mais aussi les erreurs moyennes quadratiques afin d'évaluer la précision pour chaque cas. Une trentaine de cas a été calculée sous Pix4D.

4. Résultats

Nous considérons les données sans systématisme. L'emq et l'écart-type sont donc égaux, et l'emq permet de caractériser la précision. La précision de chaque cas a donc été calculée. Pour chaque paramètre testé, nous avons réalisé des comparaisons pour plusieurs cas afin de confirmer les résultats.

a. Organisation des points de contrôle

	4 GCPs	5 GCPs	10 GCPs	9 GCPs
60m	23	14	13	10
75m	14	13	13	17
120m	77	20	17	14

Table 2 : Précision (en mm) pour les quatre organisations de GCPs

Pour chacun des vols réalisés avec la lentille de focale 20mm, c'est-à-dire aux trois différentes altitudes, nous avons calculé les cas avec les quatre organisations de GCPs que nous souhaitons tester. Nous pouvons donc comparer trois fois les schémas de GCPs. Comme le montre le tableau 2, pour les vols à 60m et 120m, le schéma permettant d'obtenir les résultats les plus précis est celui à neuf points, avec des emqs de 10mm et 14mm respectivement, vient ensuite le schéma dix points, 13 et 17mm, celui à cinq points, 14 et 20mm. Enfin, le schéma le moins précis est celui à quatre points avec des emqs sensiblement supérieures, 23 et 77mm. Le vol à 75m propose des résultats différents, avec des précisions optimales pour les schémas à cinq et dix points (13), un peu plus élevées pour le schéma à quatre (14), et pour celui à neuf points (17mm). Les résultats issus des vols à 60m et 120m concordant, nous nous basons sur ces vols pour conclure. Ainsi, répartir les points homogènement sur l'ensemble de la zone permet d'obtenir les données les plus précises. Doubler les points, entre un schéma à cinq et à dix points permet d'augmenter la précision. Néanmoins, avec ces trois organisations, l'emq des données post-traitement reste inférieure à 20mm, soit des données précises pour ce type d'acquisition. En revanche il apparaît que l'absence de point au centre entraîne une augmentation sensible de l'emq (+65% et +285% pour les vols à 60m et 120m respectivement, entre les schémas à cinq points et quatre points). Disposer d'un ou de points au centre de la zone d'acquisition est donc essentiel pour garantir la qualité des données.

b. Focale de l'appareil photo

		20mm	16mm
5 GCPs	60m	17	20
	120m	21	26
4 GCPs	60m	25	229
	120m	87	129

Table 3 : Précision (en mm) pour les deux focales

Quatre comparaisons sont possibles pour la focale de l'appareil, comme visible dans le tableau 3. Et pour chaque cas, les données issues de l'acquisition avec la lentille de focale 20mm sont plus précises qu'avec la lentille de focale 16mm. La lentille de focale 20mm plutôt que celle de focale 16mm semble ainsi être une solution pour améliorer la précision des résultats.

c. Altitude de vol

	60m	75m	120m
5 GCPs	17	13	21
4 GCPs	25	15	87

Table 4 : Précision (en mm) pour les trois altitudes

Les altitudes ont été comparées dans deux cas différents, avec 5 GCPs et 4GCPs. Comme le montre le tableau 4, dans les deux cas, l'altitude optimale est 75m. Il n'est donc pas nécessaire, et et serait même déconseillé de voler à une altitude trop basse si l'on veut obtenir les meilleurs résultats.

d. Recouvrement entre les photos

Nous avons comparé l'influence du recouvrement entre les photos pour trois les altitudes (60, 75 et 120m) pour les acquisitions avec la lentille de focale 20mm. Il est intéressant de remarquer que, dans les trois cas, jusqu'à une certaine valeur, la précision augmente avec le recouvrement, mais elle diminue ensuite. Ces valeurs sont 61% pour le vol à 60m, 77% pour celui à 75m et 79 et 85% pour 120m, comme exposé dans le tableau 5. Pour obtenir une précision optimale, il n'est donc pas souhaitable d'avoir un recouvrement entre les photos trop important.

75m	Recouvrement (%)	Emq (mm)
	88	14
	77	11
	68	13
	60	26
	52	25
60m	Recouvrement (%)	Emq (mm)
	85	17
	72	17
	61	14
	52	30
	44	26
120m	Recouvrement (%)	Emq (mm)
	92	25
	85	14
	79	14
	73	15
	67	21
	58	17
	49	18

Table 5 : Précision (en mm) pour les différents recouvrements

5. Conclusions et perspectives

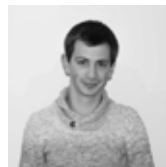
L'étude a permis de confirmer certaines hypothèses qui étaient prévisibles comme l'organisation optimale de GCPs, et le fait que la précision soit meilleure avec une focale de 20mm. Mais plus encore, elle a également permis de découvrir que l'altitude permettant de produire les données les plus précises n'est pas l'altitude minimale mais une altitude intermédiaire (75m dans notre cas), de même pour le recouvrement. L'étude a également permis de quantifier l'influence de la variation de ces paramètres sur la précision des données, et de déterminer la solution la plus précise et/ou bien la plus adéquate. Il est aussi à remarquer que l'on atteint une précision de l'ordre du centimètre pour les cas optimaux, et ce pour chacune des altitudes, si tant est que l'on adapte les paramètres.

Pour confirmer (ou infirmer) ces résultats, il faudrait répéter à plusieurs reprises les acquisitions et les tests et réaliser une étude statistique. Il serait également intéressant de réaliser les tests sur des zones d'études variées, avec du relief ou des bâtiments, ou une nature de sol différente, pour connaître les réglages à réaliser.

Développement et mise en œuvre de procédures d'acquisitions par photogrammétrie au sein de l'entreprise ALTEA.

Applications à l'acquisition de données en milieu urbain.

PFE présenté par : **Yoann COURTOIS**
Société d'accueil : **ALTEA**
Directeur de PFE : **M. Benoît WAECKERLE**
Correcteur : **M. Emmanuel ALBY**



1. Etat des lieux et contexte de l'étude

Créée en 1989, ALTEA Experts s'est historiquement développée autour du récolement de réseaux et de l'établissement de plans topographiques pour la Communauté Urbaine de Lyon. Regroupant aujourd'hui près de 35 salariés autour de 4 géomètres experts, l'activité s'est diversifiée, allant des travaux fonciers aux travaux d'auscultations, de l'acquisition topographique ou architecturale à l'implantation dans les domaines variés de la construction. L'entreprise est donc aujourd'hui capable de répondre à tout type de demandes dans le domaine de la mesure, chose rendue possible grâce à un ensemble de collaborateurs aux techniques variées capables d'adapter chaque jour leurs outils et leurs méthodes de travail.

La **tachéométrie** et la **lasergrammétrie** sont les deux grands types d'acquisition largement maîtrisés au sein de l'entreprise.

Alors que la tachéométrie permet une acquisition dite *point à point*, dans laquelle chaque point acquis est bien défini et qualifié d'une précision, la lasergrammétrie permet quant à elle une acquisition dite *complète* de la scène, fournissant un nombre important de points réunis dans un ensemble appelé **nuage de points**. Chacune de ses méthodes présente des avantages et des inconvénients, les rendant plus ou moins pertinentes en fonction de l'acquisition attendue.

Une troisième méthode d'acquisition existe cependant, la **photogrammétrie**. Cette technique a récemment connu un regain d'intérêt et de compétitivité vis-à-vis des méthodes présentées ci-dessus grâce au développement de logiciels d'autocorrélation d'images, à l'évolution de la puissance des ordinateurs (Lois de Moore) mais également avec le développement de capteurs présentant un très bon rapport qualité/prix. Depuis un an déjà, ALTEA s'ouvre à cette méthode notamment pour la **géolocalisation de marquages au sol** issus de la détection de réseaux enterrés.

Ce Projet de Fin d'Etude a donc eu pour but le développement et la mise en place de procédures structurées d'acquisitions par photogrammétrie au sein de l'entreprise, et en particulier pour l'acquisition de données en milieu urbain dans lequel l'entreprise travaille majoritairement.

Ce projet a débuté par un état des lieux des méthodes d'acquisition maîtrisées par l'entreprise, afin d'en cibler les points forts et les limites. Un état de l'art de la photogrammétrie moderne a également été effectué pour en dégager des méthodes, des outils ainsi qu'un logiciel autour duquel le développement s'est fait. Le choix s'est rapidement tourné vers **Agisoft PhotoScan** pour son interface, sa polyvalence et son prix. La présence du logiciel dans l'entreprise dès le début du stage a permis l'étude complète de la chronologie du traitement afin d'adapter des procédures d'acquisitions terrains qui ont pu être comparées aux méthodes connues de l'entreprise. Le déploiement de ces techniques a enfin permis de prouver les avantages de cette technique d'acquisition, que l'on peut également qualifier de *complète*, ainsi que les opportunités liées à son arrivée au sein d'ALTEA.

2. Etude et développements techniques autour du traitement sous PhotoScan

Une grande partie du projet a donc été constituée de l'**étude approfondie du fonctionnement et des fonctionnalités** du logiciel d'Agisoft. C'est en effet le pilier central qui relie le jeu d'images acquises sur le terrain aux produits photogrammétriques utilisés pour l'établissement d'un plan. L'ensemble des paramètres ajustables a donc été étudié mais également les différents outils permettant la génération d'un rendu le plus fidèle à ce qui a été acquis sur le terrain.

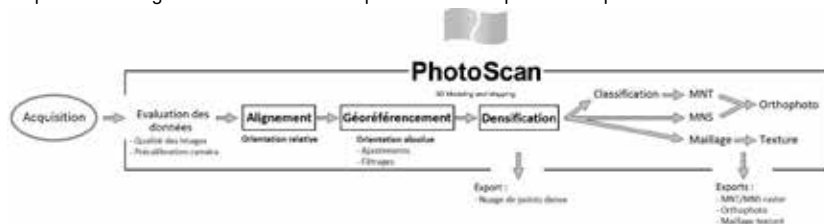


Figure 1 : Schéma de la chaîne de traitement photogrammétrique sous PhotoScan

L'étude de la chaîne de traitement (Figure 1) a également permis de mettre en avant différents niveaux d'**automatisation**, du simple **batch** constitué d'une succession de commandes de base, à l'exécution de scripts en langage Python permettant l'accès à l'ensemble des outils via une **interface de programmation applicative** (API) intégrée, mais aussi à une programmation complexe qui permettra les développements les plus poussés.

3. Des procédures d'acquisition terrain adaptées

Le déroulement de ce projet n'a pu suivre de manière stricte la chronologie d'une acquisition, de la prise des photos à l'obtention du nuage de points dense. En effet, après un état des lieux des besoins de chaque type de dossier comme de leurs contraintes, l'étude approfondie du logiciel a permis de mettre en avant des méthodes permettant de **réduire le temps entre l'import des photos et l'export du produit photogrammétrique fini**. Car si dans ce domaine le temps d'acquisition est court, c'est bien le **temps de traitement qui est majoritaire**.

Une étude de faisabilité liée à l'environnement, aux capteurs utilisés ainsi qu'au logiciel a donc pu être détaillée :

- ✓ Côté **environnement**, diverses limites ont pu être mises en avant. Cette méthode non-invasive ne permet pas d'obtenir par exemple de l'information sur un objet masqué ou non éclairé, un **éclairage** qui est primordial et nécessite d'être le plus homogène possible. La **texture** est également un facteur essentiel à la reconstruction tridimensionnelle de la scène. A cela, il faut ajouter que la photogrammétrie est difficilement applicable en **milieu végétal** alors qu'elle sera très efficace en **milieu minéral**.

- ✓ Côté **capteurs**, le choix a été fait de travailler au maximum avec des capteurs à **faible coût**. Les nombreuses études ainsi que les tests réalisés durant ce projet ont en effet montré la très grande précision atteinte sur des modèles réalisés à l'aide de **caméras d'action** type **GoPro**, de **drones grand public** type **DJI Phantom**, voire même, à courte portée, à l'aide de **smartphones**. Le développement technologique de ces micro-capteurs a permis d'accroître leur qualité. De plus, leur **focale courte** permet d'acquérir avec un angle de champ important et de bénéficier d'une grande profondeur de champ. Ces micro-capteurs nécessitent cependant une quantité de lumière importante et des **flous de mouvement** sont rapidement observables lorsque la scène s'assombrit.

- ✓ Quant au **logiciel**, les contraintes sont celles de toute acquisition photogrammétrique à savoir le **recouvrement** et la **multiplicité des images** sur chaque objet pour garantir la qualité de la reconstruction, la précision et l'homogénéité du modèle.

Une fois toutes ces contraintes assimilées, des méthodes d'acquisitions ont pu être établies. L'étude détaillée des capteurs utilisés a permis de définir les **paramètres à fixer** ainsi que **ceux adaptables**. L'utilisation de **cibles** détectables de manière automatique par le logiciel d'autocorrélation a pu également être mise en place. En effet, cette étape de géoréférencement s'insère chronologiquement entre deux étapes de calcul informatique qui ne pouvaient être auparavant conduites successivement car la présence d'un opérateur était nécessaire. La création de

plusieurs types de cibles adaptées à différents usages permet aujourd'hui aux équipes de l'entreprise de valoriser le temps sur le terrain en permettant l'automatisation du géoréférencement, représentant un gain de temps important.

La forte demande de l'entreprise vis-à-vis de ces méthodes a permis leur mise en place et leur amélioration en continu, au fur et à mesure de leur développement. De nombreux projets ont alors vu le jour sur la base de ces développements et leurs potentiels.

4. Comparaison avec les méthodes actuelles de l'entreprise et opportunités de ces techniques en milieu urbain

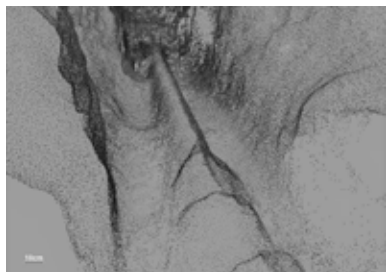
De manière simultanée à l'étude théorique des apports de l'acquisition par photogrammétrie, les méthodes ont donc pu être appliquées sur divers projets afin de les comparer aux méthodes actuelles de l'entreprise.

✓ Récolement de réseaux enterrés :

Activité historique de l'entreprise, le récolement de réseaux représente toujours une part importante des dossiers.

En **situation de fin de travaux**, lors d'un levé consécutif au chantier ou après détection, l'acquisition classique par tachéométrie a rapidement laissé place à l'acquisition photogrammétrique. En effet, seule la **planimétrie** est nécessaire sur ce type de levé. La génération d'une **orthophoto géoréférencée** permet donc d'obtenir rapidement un plan qui sera si besoin vectorisé. L'orthophoto générée permet également d'établir le plan du corps de rue environnant où les **constructions verticales** (murets, maisons) peuvent être précisément **extraites du nuage de points**. Si la topographie du site est déjà connue, elle peut même être utilisée comme géoréférencement.

En **tranchée ouverte** en revanche (réseaux humides), l'**altimétrie est nécessaire**. Elle est généralement acquise sur la génératrice supérieure ainsi que sur les pièces (vannes, coudes). En photogrammétrie, cette altimétrie est principalement obtenue directement sur le **modèle numérique de surface** généré à partir du nuage de point dense (Figure 2). Pour les pièces ponctuelles (têtes de vannes), les points désirés doivent par contre être rapidement triangulés sur les photos pour en



garantir l'altimétrie avec une **précision de classe A** (réforme DT-DICT). La difficulté supplémentaire en tranchée ouverte est la nécessité de **suivre jour après jour** la pose du réseau qui est rapidement remblayé, notamment en ville. La photogrammétrie se montre également compétitive car la durée de l'acquisition terrain est courte. Une acquisition finale géoréférencée après chantier (récolement des bouches-à-clé) permet d'assembler l'ensemble des acquisitions réalisées au cours du chantier pour obtenir un modèle global du site avec la fouille en sous-sol.

Figure 2 : Nuage de points dense d'une fouille lors de la pose d'une conduite d'A.E.P.

✓ Réalisation de plans topographiques :

Comme elle est utilisée pour l'établissement du plan de corps de rue environnant à un récolement de réseaux, l'**orthophoto** peut être largement utilisée dans l'établissement de plans topographiques divers. L'utilisation du **drone** peut s'avérer intéressante lorsque le site présente une envergure importante et lorsque le survol est possible.

Le facteur limitant la précision étant la qualité des **points de calages acquis par GNSS**, l'acquisition reste aussi précise que par méthode tachéométrique mais sa durée est considérablement réduite. Un site découvert d'une quinzaine d'hectares nécessite alors moins de 3h d'acquisition (dont 1h de vol) et 1500 clichés environ pour obtenir une orthophoto d'une résolution de 1 cm (Figure 3), avec une précision centimétrique et une exactitude directement liée à celle des points de calage GNSS (2 à 3 cm).



Figure 3 : Orthophoto d'une résolution de 1 cm pour la mise à jour du plan topographique

✓ Réalisation de plans de façade :

Il est également possible de générer des **orthophotos verticales**. Le drone devient alors un concurrent des acquisitions tachéométriques (chronophages) et lasergrammétiques terrestre (acquisition lourde) qui ne jouissent pas d'un point de vue idéale sur des hautes façades, rendant l'acquisition laborieuse voire extrêmement demandeuse en espace mémoire lorsque la résolution nécessaire au sommet de la façade est acquise à 360° (Scanner Faro).



Figure 4 : Mise en perspective d'un projet d'urbanisme sur la base d'une acquisition photogrammétrique (SketchUp, Mensura)

✓ Avant-projet d'urbanisme :

L'objectif de ce type de projet est d'effectuer un levé topographique sommaire comme support de **présentation d'un projet de construction** (Figure 4) par exemple. La photogrammétrie par drone associée si besoin à un levé sous les surplombs grâce à une *GoPro*, peut permettre une acquisition d'ensemble rapide, exhaustive et de grande qualité, permettant ensuite la mise en perspective et la valorisation d'un projet de construction en trois dimensions qui peut s'avérer visuellement bien plus parlante pour les autorités appréciatrices.

✓ Foncier :

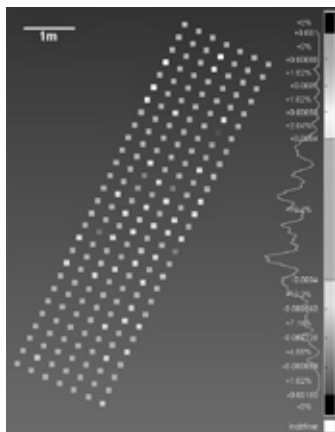
Une évaluation du potentiel de la photogrammétrie a également été réalisée dans le domaine foncier. Malgré le fait que ce type de dossier nécessite souvent un semi de points réduits et donc une acquisition *point à point* (dans un environnement souvent végétal), nous avons pu montrer l'apport de la photogrammétrie dans l'acquisition des **éléments imposants** comme le bâti, les murs et murets en limite, mais aussi des éléments constituant l'**habillage** de plans de délimitation dont l'acquisition est rapidement chronophage par méthode classique. Nous avons ainsi obtenu un **gain de temps moyen de 25 à 30%** de l'acquisition à la livraison du plan en garantissant une **classe de précision de 3 cm**.

✓ Auscultations :

Un projet de haute précision était nécessaire afin de quantifier les limites de ces méthodes photogrammétriques utilisant des capteurs à coût réduit. Il fallait pour cela un chantier nécessitant une acquisition **dense**. En effet, l'acquisition de haute précision d'un semi de points réduit et bien défini n'aura de méthode plus efficace que la tachéométrie d'auscultation. Cependant, une acquisition dense comme le **nivellement d'une dalle** peut rendre la photogrammétrie compétitive.

Nous avons donc pu réaliser la modélisation d'une dalle en béton avec différentes caméras. Comparée à une acquisition de référence d'une **précision altimétrique** de 0.3 mm, nous avons mesuré un écart moyen quadratique de **0.4 mm** pour l'acquisition par drone (Figure 5), de **0.8 mm** pour la *GoPro* et de **1.5 mm** pour une acquisition réalisée à l'aide d'un smartphone.

Figure 5 : Comparaison du levé photogrammétrique par drone au semi de point de référence (3DReshaper)



6. Conclusion et Perspectives

Durant ce projet, de nombreux et divers travaux ont pu être réalisés. Une étude complète du logiciel Agisoft PhotoScan a permis de tirer tous les avantages que propose ce logiciel très polyvalent. Des tests réalisés sur différents types de dossiers, effectués de manière simultanée à des acquisitions classiques ont montré les nombreux avantages de la photogrammétrie mais également ses limites. Cette nouvelle technique d'acquisition vient aujourd'hui renforcer les nombreuses techniques connues et maîtrisées au sein d'ALTEA. L'entreprise peut alors aujourd'hui répondre de manière plus efficace à certaines demandes mais s'ouvre également à d'autres opportunités.

LiDAR aéroporté : de l'acquisition aux livrables.

Etude méthodologique et critique en vue de la rédaction d'un « GUIDE et MANUEL » applicable à l'Exploration & Production.

PFE présenté par : **Coline THOURY**
Société d'accueil : **TOTAL E&P**
Directeur de PFE : **Frédéric AUGER**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Introduction

1.1 Objectifs du projet

Dans le cadre de sa stratégie numérique industrielle, TOTAL a identifié le LiDAR aérien comme une technologie à exploiter pour obtenir un environnement 3D dense et représentatif de la situation réelle. A l'heure actuelle, de telles opérations ont été menées quasiment exclusivement pour les avant-projets ou projets de construction terrestre. La compagnie est, pour le moment, trop peu impliquée dans la phase de levé terrain et de traitement de données. Le flux de travail se résume actuellement à la définition du cahier des charges et à la réception et au stockage des données finales. Le sous-traitant se charge de l'acquisition et des traitements avant de remettre les livrables demandés. Un tel volume de données pourrait être mieux valorisé dans le cadre du projet « Quantum » de l'Exploration & Production. Ce programme vise à développer un jumeau virtuel des actifs permettant à l'utilisateur d'accéder à l'ensemble de la documentation technique et opérationnelle (représentations 3D et 2D, documents divers, historiques de maintenance et d'inspection).

Le but de ce projet de fin d'études est d'examiner les axes d'amélioration en termes d'implication de la compagnie dans toutes les étapes de l'opération de LiDAR aéroporté, de l'acquisition à la livraison des produits finaux. Le projet s'articulera autour de la rédaction d'un Guide & Manuel utilisateur interne à l'entreprise. Ce guide sera utilisé par la personne en charge d'une telle opération au sein de TOTAL afin d'accroître sa connaissance du sujet et son savoir-faire. Ce document interne orientera notamment le lecteur quant au choix de solutions techniques à privilégier en fonction des environnements et des contraintes d'acquisition, et des livrables attendus. Des contrôles de qualité (QC) y seront aussi proposés suite à l'étude de plusieurs logiciels de traitement de données. Enfin, le projet mènera à la révision de la Spécification Générale « GS EP POS 007 : Airborne Laser Scanning Survey » envoyée aux entrepreneurs consultés lors des procédures d'appels d'offres. Ce document contractuel dresse les attentes de TOTAL vis-à-vis de ses sous-traitants afin de s'assurer de la qualité et du bon déroulement des opérations. La dernière révision technique de ce document datant de 2013, il m'a été demandé d'identifier les moyens techniques à intégrer et les éléments à réviser.

1.2 L'Exploration & Production

L'industrie pétrolière traite de la chaîne industrielle du pétrole et du gaz, depuis le gisement jusqu'au consommateur. Ainsi, le cycle de vie d'un champ pétrolier (Figure 1), de l'exploration jusqu'à son démantèlement, peut s'étendre sur une période de quarante ans.



Figure 1: Processus E&P

Les équipes de topographie sont impliquées tout au long du processus pour les études géodésiques, de positionnement, ou encore de surveillance. Le LiDAR aéroporté est utilisé chez TOTAL à des fins topographiques, il est donc mis-en-œuvre dans le cadre de missions terrestres telles que celles présentées dans la partie suivante (1.3). L'emploi du LiDAR aéroporté, comparé aux méthodes de levé traditionnelles, offre un gain de temps et d'informations acquises. En effet, le levé d'une zone de

quarante kilomètres carrés nécessite deux à trois jours d'acquisition contre seize semaines avec un GPS. Le gain économique est alors conséquent.

1.3 Les cas concrets

TOTAL utilise la technologie LiDAR aéroporté notamment avant la mise en place d'installations et de pipelines à terre. Ainsi, lors de ce PFE, je m'appuierai sur les trois projets suivants :

- Azerbaïdjan : zone de 364 km²
- Ouganda-Tanzanie : corridor de 1445 km de long
- Papouasie-Nouvelle-Guinée : surface de plus de 510 km² en milieu équatorial

La première mission a été lancée pour un futur développement à terre. La seconde opération présente le cas d'un relevé pour l'emprise d'un pipeline d'export terrestre. Enfin, les travaux en Papouasie-Nouvelle-Guinée mêlent les deux cas précédents avec le développement d'une future plateforme à terre et la mise en place d'un système d'exportation par pipelines.

L'objectif qui m'a été fixé est de collecter les retours d'expériences des responsables sur ces opérations LiDAR et de considérer leurs remarques afin d'identifier les axes d'amélioration en vue de la révision des Spécifications Générales ainsi que l'orientation à donner au Guide & Manuel que je devrai rédiger.

2. Acquisition des données LiDAR aéroporté

2.1 Le LiDAR aéroporté

Les systèmes LiDAR aéroportés sont composés de :

- Une unité de mesure laser incluant l'émetteur et le récepteur
- Un système de déflexion permettant le balayage au sol
- Un système de positionnement et d'orientation comprenant un récepteur GNSS différentiel (DGNSS) et une plateforme inertielle (INS) embarqués
- Un système imageur

Plusieurs types de miroir existent et offrent différentes traces de balayage au sol. Je conseillerai dans le guide l'emploi de miroirs oscillants ou rotatifs qui, en dépit de leur diminution de précision en bordure de fauchée (engendrée par leur trace sinusoïdale), offrent un échantillonnage plus important que les autres solutions.

L'INS mesure les accélérations et les changements d'attitude de l'avion tandis que les récepteurs GNSS fournissent sa position. Le couplage de ces systèmes affine la position du capteur grâce au calcul de trajectoire de l'avion. On ajoute à ces informations la mesure de la distance entre le capteur et la cible pour déterminer les coordonnées 3D des points laser.

Aujourd'hui, le LiDAR est capable d'enregistrer plusieurs rétrodiffusions pour une seule impulsion émise, on parle de système à retour d'onde complet. Plusieurs informations relatives au trajet de l'onde sont alors disponibles ; ainsi il est possible d'évaluer la structure d'une zone forestière et d'avoir des observations du sol sous ce couvert végétal. Cela représente un grand intérêt dans le cadre d'opérations telles que celle menée en Papouasie-Nouvelle-Guinée où la totalité de la zone de projet est couverte par une forêt équatoriale dense. Le LiDAR remédie alors à cette barrière naturelle pour l'étude du terrain naturel.

2.2 Calibration du système

La calibration du système se déroule en plusieurs étapes. La première phase est faite en laboratoire par le concepteur de l'instrument. La deuxième phase de calibration est réalisée in situ. Elle permet la correction des erreurs de décalage angulaire entre le scanner et l'INS selon les trois axes: roulis, tangage et lacet, comme l'illustre la Figure 2. Afin de quantifier ces écarts, une procédure de vol de calibration doit être établie et respectée. Pour relever le défaut des angles de roulis et tangage, il faut établir une ligne de vol acquise à 2 reprises en sens opposés. Concernant le défaut de lacet, l'erreur

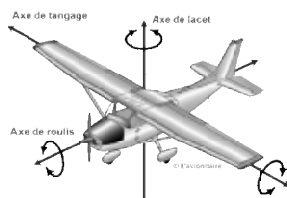


Figure 2 : Angles de rotation de l'INS

est plus difficile à observer mais il est nécessaire d'effectuer deux lignes de vol parallèles de même cap (avec un certain recouvrement) de préférence au dessus de bâtiments. J'ajouterai ce type d'instructions à la Spécification Générale. Cela permettra au prestataire d'avoir des nuages de points déjà ajustés et de gagner du temps sur le traitement de ceux-ci. Enfin, un vol à haute altitude permettra d'ajuster au mieux les décalages de roulis, tangage et lacet.

2.3 Levé topographique

Un certain nombre d'instruments sont à prendre en compte durant le levé topographique. Le marché actuel nous présente une large gamme de centrales inertielles, de capteurs laser et de caméras. Une connaissance minimale des systèmes LiDAR est indispensable afin de choisir l'entrepreneur le plus qualifié pour la mission. Le guide que je rédige apporte ce type d'informations mais ne dissocie pas l'unité inertielle du capteur laser puisque le système LiDAR est composé de sa propre unité inertielle, caméra et logiciel embarqué proposés directement par le concepteur. Il faut cependant s'assurer que la précision sur l'angle de tangage est au centième de degrés. Une plus grande précision est recherchée en élévation puisque la précision planimétrique peut être améliorée en effectuant un ajustement avec les photos prises lors de l'acquisition et les points connus au sol. Le choix de l'instrument dépend de la nature du terrain à observer et des conditions dans lesquelles le vol est effectué. Le guide présente donc les éléments à prendre en compte pour le choix d'un appareil selon les applications. De plus, il introduit l'utilisation de nouvelles technologies comme la caméra multi spectrale, les systèmes à photons (permettant de scanner le terrain même en présence de nuages légers) ou encore l'intérêt de travailler en infrarouge.

Le levé aéroporté suit un plan de vol précis établi en amont et se fait dans de bonnes conditions de vol. Des logiciels embarqués donnent des informations en temps réel du levé LiDAR. Ces logiciels sont proposés par les concepteurs tels que Riegl, Optech, Trimble ou encore Leica. Ils permettent le paramétrage du LiDAR et le contrôle du vol.

Une fois le vol accompli, l'opérateur doit valider les données brutes en contrôlant la densité de points dans les lignes de vol et l'exposition des photos. Un rapport journalier doit être fourni au représentant de TOTAL sur place. Si les données ne respectent pas les attentes fixées par les spécifications techniques particulières (ou Scope Of Work), un nouveau vol au dessus de la zone en question est planifié. Des erreurs d'attention liées à la fatigue de l'opérateur ont déjà été notées dans certaines missions, c'est pourquoi la nouvelle révision de la Spécification Générale imposera la présence de deux opérateurs si la journée de vol excède 6 heures, l'un sera en charge de l'acquisition et l'autre du contrôle des données.

3. Etude de logiciels de traitements

3.1 Traitement des nuages de points

Le traitement des données LiDAR commence par la combinaison des données recueillies par le laser, la station inertielle et les récepteurs GNSS afin de transformer les données géométriques en coordonnées cartésiennes. Certains logiciels analysent le retour d'onde complet en post-traitement, c'est le cas de RiAnalyze proposé par Riegl. Il extrait les échos du signal pour finalement avoir un nuage de point dans le système de coordonnées du scanner avec des informations supplémentaires pour chaque point. Depuis quelques années, cette opération est réalisable en temps réel au cours de l'acquisition, cela évite d'avoir à stocker un volume trop important de données brutes pour le post-traitement.

S'en suit le traitement du nuage de points obtenu, quatre logiciels sont alors étudiés :

- Les modules *TerraMatch*, *TerraScan* et *TerraModeler* proposés par TerraSolid
- Le module *LiDAR processing* de *GlobalMapper*
- *ArcGIS*
- *LASTools*

Le Guide & Manuel, rédigé par mes soins, permet de comprendre le procédé de traitement des nuages de points tel qu'il est réalisé dans les sociétés contractées pour la mission de LiDAR aéroporté. Ce processus débute notamment par l'ajustement des bandes de vols. *TerraMatch* calcule les corrections à appliquer pour les erreurs de roulis, tangage et lacet. Le nuage de points doit ensuite être nettoyé, filtré et classifié. Le filtrage consiste à séparer les points du sol et hors-sol. Ces points hors sol sont ensuite classifiés en diverses classes (végétation basse, moyenne et haute ; bâtiments ;

lignes électriques...). Dans tous les logiciels, cette classification se fait automatiquement mais par le biais d'algorithmes différents. *TerraScan* a l'avantage de travailler avec plusieurs macros dans lesquelles l'utilisateur peut imposer ses propres paramètres de classification. De son côté, *ArcGIS* fournit une toolbox qui permet de reclasser les nuages de points et d'améliorer le processus de contrôle de qualité. Une fois le sol extrait du nuage de points, ces logiciels sont capables de générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Il est à noter que les algorithmes basés sur des TIN (Triangulated Irregular Network) offrent de meilleurs résultats.

Les autres logiciels sont en cours d'analyse à l'écriture de ce résumé. Cette étude de logiciel se fait de manière théorique dans un premier temps, les données des missions citées plus haut serviront à la pratique pour évaluer les différences notoires entre les logiciels et proposer l'emploi de certains outils de contrôle à la compagnie.

3.2 Mise en place d'une procédure QC

L'étude des logiciels apporte des solutions en termes de contrôle de données dans le Guide & Manuel. La compagnie se doit d'offrir à ses clients des livrables de qualité, il faut par conséquent accroître les contrôles internes et demander d'avantages de preuves de contrôle auprès du sous-traitant. Ces preuves seront fournies sous forme de rapports comme pour le contrôle de densité de points ou d'exposition des photos lors du levé LiDAR aéroporté. Je propose d'ailleurs d'exposer une liste détaillée des rapports à fournir dans la Spécification Générale.

TOTAL manque de contrôle pendant le traitement des données. C'est pourquoi il est impératif de s'engager dans la vérification de l'ajustement des bandes dans un premier temps. L'erreur de roulis et de tangage sont quantifiables en observant un écart horizontal sur un profil perpendiculaire et parallèle (respectivement) à la direction de vol. L'erreur de lacet est observable sur des sections de toits pentus. Les écarts sont alors mesurables pour valider ou non l'ajustement selon les précisions fixées dans les spécifications particulières. Certains logiciels fournissent des rapports de correction avec l'erreur moyenne quadratique.

Dans un second temps, il est indispensable de vérifier le filtrage et la classification du nuage de points pour assurer la qualité des produits dérivés (MNT, MNE, ...). Cela peut être fait par une simple inspection visuelle en navigant dans le nuage de points, colorés par classe, ou en examinant des profils. Si des fichiers de points de contrôle au sol (GCP) sont à disposition, il faut les importer dans le nuage de points et mesurer les différences d'altitudes par rapport aux points classés comme sol. Les données d'intensité, fournies par le retour d'onde complet, facilitent aussi le filtrage des données. Enfin, les orthophotos peuvent être superposées au nuage afin de pointer des points stéréoscopiques au sol et de vérifier leur élévation. Ces données supplémentaires seront alors introduites dans la demande de livrables des Spécifications Générales.

4. Conclusion

Un grand travail bibliographique a été mené afin de comprendre le processus précis d'une mission LiDAR aéroporté et des éléments intervenants. Le Guide & Manuel présente les informations utiles à TOTAL avant tout commencement de mission. Ce document, rédigé en anglais, constitue la finalité de mon projet. Le guide introduit aussi des QC qui seront à appliquer lors des prochaines missions afin que TOTAL soit d'avantage impliqué et assure la qualité des données transmises au client.

L'étude de logiciel mène à penser, à l'heure actuelle, que la suite TerraSolid est la plus complète dans le traitement de données LiDAR. Elle nécessite une bonne prise en main du logiciel MicroStation (par le biais duquel les applications sont installées) mais possède une interface graphique intéressante avec des visualisations 2D, 3D et des profils. Il est cependant difficile de gérer des fichiers trop lourds, nous devons travailler avec des tuiles découpées dans le nuage de points initial.

Les Spécifications Générales envoyées aux entrepreneurs sont en cours de révisions suite à mes remarques et autres recherches de formats de livrables. Un atelier est prévu au mois d'août afin d'échanger à ce sujet.

Une autre problématique se pose, celle de l'archivage. Quelles données doit-on garder une fois que les fichiers ont été délivrés au client ? Comment stocker ces données ? Cette question relève aussi bien des opérations LiDAR que des campagnes photogrammétriques. Une solution Cloud est à développer afin d'optimiser le stockage des données et de lier les projets entre les différentes entités de l'Exploration & Production.

Structuration technique et qualité du partenariat

TPLM-3D / SODERA EXPERTISE appliqué à la photogrammétrie par drone

PFE présenté par : **Théodore Lhéritier**
Société d'accueil : **TPLM-3D**
Directeur de PFE : **David Desbuisson**
Correcteurs : **Tania Landes et Mathieu Koehl**



1. Introduction

Depuis quelques années, la société TPLM-3D souhaite élargir son champ de compétence dans le domaine de la Photogrammétrie. En effet, elle possède déjà une expérience certaine en matière de photogrammétrie terrestre, qu'elle soit architecturale ou appliquée à de petits objets. Cependant, avec le développement exponentiel des drones des dernières années, elle souhaite saisir l'opportunité de compléter cette offre, tout en restant dans son cœur de métier : la mesure tridimensionnelle au sens large.

Les drones ouvrent de nouvelles perspectives. En effet, ils permettent de réaliser des chantiers à une échelle intermédiaire entre le levé par photogrammétrie terrestre et le levé aéroporté par avion ou hélicoptère. La photogrammétrie aérienne devient ainsi plus accessible et moins onéreuse, permettant de couvrir de plus grandes zones que la photogrammétrie terrestre. La fiabilité et l'autonomie grandissante de ces aéronefs permettent de repousser toujours plus loin les limites dans les domaines d'applications possibles.

Consciente que ce secteur est encore en pleine effervescence et qu'il nécessite un engagement de tous les instants, en matière d'équipement et de compétence de pilotage, TPLM-3D s'est mise en quête d'un partenaire. Après un temps de recherche, des premiers contacts ont été tissés avec Guy Houin, actuel directeur technique de SODERA EXPERTISE. Sa société est aujourd'hui spécialisée dans la prestation de vol de drones. Des premiers tests et chantiers ont été réalisés au cours de l'année 2014. Les deux entreprises ont alors pu constater l'immense potentiel que cette technologie apportait dans le domaine de la topographie grâce au projet de fin d'étude (PFE) de Thibaut Dudka en 2015. Cette relation s'est concrétisée en avril 2016 par la signature d'un partenariat vertueux visant à répondre conjointement à des consultations. SODERA EXPERTISE est responsable de la captation des données et TPLM-3D se charge du géoréférencement et du traitement de celles-ci.

Dès 2016, quelques chantiers ont été réalisés, cependant, certains dysfonctionnements, dus à un manque d'efficacité et de coordination, ont été constatés. C'est pourquoi les deux sociétés ont décidé de proposer un projet de fin de d'étude afin de répondre à leur problématique d'organisation pour cette nouvelle activité commune, tant sur le plan technique que sur le plan qualitatif.

2. Objectifs

L'objet de ce PFE est de structurer dans son intégralité la chaîne d'acquisition ainsi que le traitement des données de l'activité de photogrammétrie par drone. Ce travail consiste à améliorer la coordination entre les deux entreprises afin que les chantiers puissent se dérouler dans de bonnes conditions. Plusieurs objectifs ont été définis dans le cadre de ce projet :

- ❖ Réaliser une veille réglementaire et technologique sur le marché du drone
- ❖ Rédiger des procédures adéquates pour structurer la chaîne d'acquisition et de traitements des données
- ❖ Effectuer trois chantiers thématiques de référence appliqués à un levé de terrain, de bâtiments et d'ouvrage circulaire

3. État de l'art

L'état de l'art se partage en trois grandes parties. Il appréhende d'abord, les législations française et suisse encadrant l'utilisation professionnelle des drones. Dans un deuxième temps, il fait office de veille technologique en matière d'aéronef, de récepteur GNSS cinématique temps réel (RTK¹) et de LiDARs² pour drone. Enfin, la dernière partie concerne les travaux connexes dédiés à la photogrammétrie par drone.

La France, et dans une moindre mesure la Suisse, sont les deux marchés dans lesquels les entreprises partenaires évoluent. La France a été une pionnière en matière de réglementation avec deux arrêtés, publiés le 11 avril 2012, concernant : l'insertion des drones dans l'espace aérien, l'encadrement de la conception et les conditions d'utilisations de ces derniers. Le 17 décembre 2015, deux nouveaux arrêtés ont permis une mise à jour de la réglementation. Le développement effréné du marché a favorisé l'éclosion d'une nouvelle loi sur la sécurité de l'usage des drones le 24 octobre 2016. Le tableau 1 permet de synthétiser les quatre scénarios de vols prévus par la loi en France.

S-1	S-2	S-3	S-4
Hors zone peuplée	Hors zone peuplée	En zone peuplée	Hors zone peuplée
A vue D ≤ 200 m	D ≤ 1000 m (hors vue)	A vue D ≤ 100 m	Pas de limite (hors vue)
H ≤ 150 m	H ≤ 150 m ou H ≤ 50 m (si M ≥ +2Kg)	H ≤ 150 m (si M ≤ 8Kg*)	H ≤ 150 m (si M ≤ -2Kg)
Certification ULM	Certification ULM	Certification ULM	Licence pilote (avion, planeur, ou hélicoptère)

Tableau 1 : Scénarios de vols possibles en France (arrêté de 2015)

En Suisse, c'est l'ordonnance 748.941 du Département fédéral de l'Environnement, des Transports, de l'Énergie et de la Communication (DETEC) qui fixe la réglementation depuis le 20 mai 2015. Elle stipule que le télépilote doit garder un contact visuel permanent avec son drone et voler à une hauteur maximale de 150m, le vol hors vue est donc proscrit. Par ailleurs, une distance de 100 mètres avec un rassemblement de personne ou de 5 km avec un aérodrome doit être respectée sous peine de sanctions.

La seconde partie de l'état de l'art concerne la veille technologique. En effet, le marché est en perpétuelle évolution et le matériel acquis quelques années auparavant devient presque obsolète aujourd'hui. Un état des lieux non exhaustif a donc été réalisé sur les deux grandes familles de drones : les multicopters et les drones à voilure fixe.

Par ailleurs, une étude présente les différents récepteurs GNSS cinématique temps réel (RTK) pouvant équiper les drones. L'arrivée de cette technologie permettrait un géoréférencement direct plus précis qu'auparavant, utilisant moins de points au sol. Ainsi, l'orientation du bloc d'images sous les logiciels de photogrammétrie serait facilitée grâce à de meilleures valeurs initiales.

Enfin, une étude non exhaustive des différents LiDARs arrivant sur le marché des drones a été réalisée. Ces dispositifs restent onéreux à l'achat mais permettent de capter des données inaccessibles par photogrammétrie (sous le couvert végétal).

Cette veille technologique vient étayer le projet d'achat à moyen terme d'un drone équipé d'un récepteur GNSS RTK, et, à plus long terme, d'un LiDAR chez SODERA EXPERTISE.

La troisième partie concerne les travaux connexes de photogrammétrie par drone. Des études ont été menées sur le recouvrement, sur l'influence des vols croisés ou encore sur les types de géoréférencement. Ces recherches ont permis de mettre en évidence des moyens et techniques afin de réaliser nos trois chantiers thématiques, appliqués à un levé de terrain, de bâtiment et d'ouvrage circulaire.

* avec dispositifs spécifiques

¹ Technique de positionnement GNSS basée sur une correction des ondes porteuses grâce à une observation des mêmes signaux depuis une ou plusieurs bases connues en coordonnées

² Système laser avec récepteur permettant de mesurer une distance par la mesure d'une impulsion laser

4. Structuration de la chaîne d'acquisition et de traitement des données

Afin de garantir un niveau de prestation satisfaisant auprès des clients, il a été décidé de structurer la chaîne d'acquisition et de traitement des données par la création de plusieurs protocoles. Ceux-ci permettront aux deux entreprises d'intervenir sur leurs futurs chantiers dans de bonnes conditions techniques et qualitatives. La figure 1 permet de résumer les différentes étapes de cette chaîne ainsi que les procédures associées.

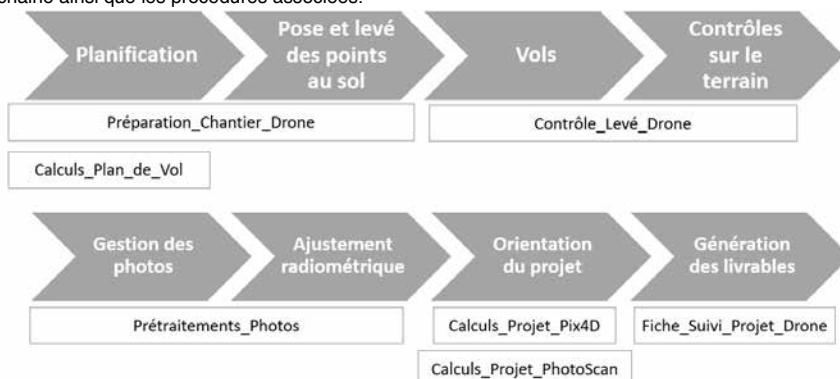


Figure 1 : Procédures associées à la chaîne d'acquisition et de traitement des données

Nous pouvons résumer brièvement le contenu de chacune de ces procédures :

- ❖ Préparation_Chantier_Drone : Ce document retrace les différentes étapes à satisfaire pour préparer un chantier de photogrammétrie par drone. Par ailleurs, elle donne des méthodes et préconisations pour réaliser différents types de levé. Elle permet ainsi d'établir le plan de vol d'un chantier à l'aide de la fiche de Calculs_Plan_de_Vol.
- ❖ Calculs_Plan_de_Vol : Il s'agit d'une fiche de calculs permettant d'estimer le nombre de photos en fonction du type de levé à réaliser (terrain, bâtiments, ouvrage circulaire, façade). Plusieurs simulations peuvent être effectuées en fonction de la caméra utilisée, du pixel au sol, des taux de recouvrement longitudinal ou latéral et de l'intervalle de temps entre deux photos.
- ❖ Contrôle_Levé_Drone : Cette feuille de contrôle synthétise les points clés à vérifier sur le terrain en termes de réglages de la caméra, de plan de vol, de contrôle et d'archivage des données.
- ❖ Prétraitements_Photos : Elle traite de l'organisation de l'archivage et du renommage des photos afin de faciliter leur traçabilité. Les étapes concernant la retouche des photos est aussi présentée afin d'unifier l'exposition et de faire ressortir les informations cachées.
- ❖ Calculs_Projet_Pix4D : Cette procédure explique les différentes étapes et paramètres de calculs sous Pix4D. La génération de plusieurs livrables est aussi présentée.
- ❖ Calculs_Projet_PhotoScan : Cette procédure explique les différentes étapes et paramètres de calculs sous PhotoScan. La génération de plusieurs livrables est aussi présentée.
- ❖ Fiche_Suivi_Projet_Drone : Ce protocole permet de vérifier quelques points importants tout au long d'un projet de photogrammétrie par drone.

Ce travail de structuration permettra d'établir le plan qualité appliqué à l'activité de photogrammétrie par drone au sein du partenariat TPLM-3D / SODERA EXPERTISE. Celui-ci prendra la forme d'une fiche récapitulant les étapes clés et le suivi qualité associé à travers les procédures existantes. Il sera gage de sérieux des partenaires pour répondre aux diverses demandes des clients.

5. Les chantiers thématiques

Trois chantiers thématiques ont été réalisés au cours de ce PFE. Il s'agit du levé de terrain du parc du Mollard situé à Châteauneuf (42), du levé de bâtiments sur le site industriel de Stäubli à Faverges (74) et du levé d'ouvrage circulaire de la cheminée de la verrerie à Givors (69). L'enjeu était d'optimiser les procédures grâce à des chantiers concrets et complets depuis la planification jusqu'à la génération des livrables.

L'objectif du projet du Parc du Mollard était de générer un MNT et de dessiner un plan topographique du site avec une précision de l'ordre de 3 cm sur les points de contrôle. Le levé a été réalisé avec des vols croisés à prises de vues nadirales sur l'ensemble des 23 ha du parc. Par ailleurs, des vols à prises de vues obliques dans les quatre directions ont été effectués, mais uniquement sur la partie bâtie du site. Le plan de vol en grille a permis de rigidifier le bloc de photos, notamment sur sa composante altimétrique. Au total, près de 42 points au sol ont été levés en double sessions à l'aide d'un récepteur GNSS RTK Leica GS08 connecté au réseau Orphéon. Une hauteur de vol d'environ 73m a permis d'obtenir un pixel objet de 2,2cm.

L'objectif du projet Stäubli était de générer un nuage de points sur l'ensemble du site de 13ha, avec une précision sur les points de contrôle inférieure à 5 cm, permettant la modélisation future des bâtiments. Un pixel au sol de 1,5cm a donc été planifié pour effectuer des vols à prises de vues nadirales et obliques avec le drone DJI Phantom 4 Pro. Près de 44 points au sol ont été prévus afin de disposer de suffisamment de points de calage et de contrôle. Ils ont également été relevés en double sessions à l'aide d'un récepteur GNSS RTK Leica GS08 avec le réseau Orphéon. Les traitements des 3400 photos ont ainsi été effectués grâce au logiciel Pix4D. Un nuage de points (figure 2) d'environ 200 millions de points a été généré avec un écart type 3D de 3.4cm sur les 24 points de contrôle du projet. Enfin, il a été possible de générer une orthophoto d'une résolution de 1.5cm sur l'ensemble du site.



Figure 2 : Nuage de points du projet Stäubli

L'objectif du projet de la cheminée de la Verrerie était d'obtenir des images orientées avec une résolution et une précision de l'ordre du millimètre pour pouvoir satisfaire à terme des besoins en inspection. Plusieurs configurations de vols ont été testées lors de la journée de chantier sur cet ouvrage de 60 m de haut. Finalement, la combinaison qui a été retenue est la suivante : vols avec prises de vues nadirales par bandes linéaires, horizontales par bandes circulaires et obliques par bandes linéaires ascendantes. Un total de 38 points au sol et sur l'ouvrage ont été relevés par double retournement avec la station totale Leica TS60, dont 20 ont servi de points de calage et 18 de points de contrôle. L'écart type 3D sur les points de contrôle est de 5 mm.

Des développements internes doivent encore être réalisés afin de créer notamment un logiciel permettant de digitaliser les défauts affectant la structure des ouvrages sur les photos orientées issues du calcul d'aérotriangulation.

Conclusion et perspectives

La photogrammétrie par drone sera un atout indéniable pour TPLM-3D dans les années à venir. Il est désormais possible à travers ce partenariat structuré avec SODERA EXPERTISE de réaliser des projets de grande ampleur alliant levé terrestre et levé aérien.

En prolongement de la veille technologique réalisée, SODERA EXPERTISE effectue actuellement des études techniques quant à l'insertion d'une carte « RTKite » de North sur un drone DJI Phantom 4 Pro. Cette puce GNSS RTK, découverte lors de l'état de l'art, a l'avantage d'être multicanal et multi-constellation (GPS, GLONASS, Beidou, Galiléo). Il restera alors à faire des tests pour quantifier l'amélioration de la précision de positionnement du drone et de sa répercussion sur le résultat final.

Les procédures élaborées lors de ce projet, permettront aux partenaires de mieux préparer leurs chantiers et d'être plus efficaces lors des relevés et des traitements de ces derniers.

Par ailleurs, les trois chantiers prévus ont tous abouti grâce à une bonne planification en amont de chaque projet. Ils serviront ainsi de référence dans la prospection de nouveaux projets.

Modélisation tridimensionnelle du monument antique du Meisenbachschloessel de Sparsbach (Bas-Rhin)

PFE présenté par :

Julien Diethrich

Société d'accueil :

Archéologie Alsace

Projet réalisé au sein de :

Laboratoire ICube UMR 7357

Equipe TRIO

Directeur de PFE :

Matthieu Fuchs

Correcteurs :

Mathieu Koehl et Emmanuel Alby



1. Introduction et contexte de l'étude

Le monument antique du Meisenbachschloessel, sur lequel porte l'étude, est situé à 50km au Nord-Ouest de Strasbourg, dans la commune de Sparsbach, dans le Bas-Rhin. Bien que l'Alsace présente de nombreux éléments à caractéristiques romains, seuls quelques rares bâtiments sont correctement conservés. Usuellement appelé « le petit château du Meisenbach », ce monument, à l'heure actuelle en état de ruine, a su attirer l'intérêt des spécialistes du fait de sa localisation, de son isolement mais également de son architecture.

Aujourd'hui égaré en pleine forêt vosgienne, aux alentours de carrières de grès, ce petit édifice romain de dimensions 13.4 x 7.7 m a pour particularité d'être bâti suivant une technique de construction murale utilisant des blocs de pierre parallélépipédiques en assise horizontale, technique également connue sous le nom de opus quadratum. Cet édifice a déjà fait l'objet d'une première fouille archéologique en 2002, suivie de deux autres fouilles en 2005 et 2006. Ces deux dernières fouilles avaient pour objectifs la poursuite de la fouille de 2002 afin de parachever le plan de l'édifice, mais également de procéder à la datation des différentes phases de construction, d'occupation ainsi que de destruction du monument. Par ailleurs, un autre objectif consistait en la poursuite de l'étude architecturale des vestiges. En effet les différents sondages ayant eu lieu ont été enregistrés et pointés topographiquement. Toutes les opérations menées avaient pour objectif la mise en valeur du site archéologique. A l'heure actuelle, ce site archéologique est composé de quelques deux cents blocs en grès des Vosges soigneusement répartis dans un parc à blocs ainsi que d'une emprise au sol de l'édifice encore presque entièrement conservée (Figure 1).



Figure 1 : a) Restes de l'emprise au sol ; b) Vue des vestiges dans le parc à blocs

L'étude architecturale menée permet de proposer une interprétation concernant la nature de l'édifice. De plus, la présence d'un deuxième niveau d'élévation est de plus en plus plausible, ce qui amène les archéologues ainsi que les architectes à penser que ce monument a une architecture à caractère funéraire, et qu'il pourrait correspondre à une tombe, un temple ou un mausolée.

C'est à travers cette incertitude que repose tous les enjeux et objectifs de ce projet de fin d'études. La première étape majeure consiste donc à procéder à la modélisation tridimensionnelle de l'ensemble des éléments architecturaux entreposés dans le parc à blocs afin de pouvoir les analyser au bureau. Cette modélisation s'avère également très utile dans la mesure où les vestiges reposent à l'air libre, et par conséquent sont sujets à une potentielle dégradation. À l'aide des modélisations tridimensionnelles de chacun des blocs de grès, une étude sera menée dans le cadre d'un tutorat afin d'identifier les caractéristiques des blocs types appartenant aux différentes catégories architecturales. Une fois les caractéristiques des blocs types acquises, il s'agira de procéder à la mise en place du développement de modèles paramétriques fondés sur les vestiges conservés in situ. L'objectif ultime de ce projet étant de parvenir à aboutir à une ou plusieurs hypothèses de modélisation tridimensionnelle de l'édifice dans son environnement.

2. Acquisitions

L'acquisition des vestiges par photogrammétrie terrestre a eu lieu en deux temps. Une première phase d'acquisition a été réalisée lors du PRT (Projet de Recherche Technologique) précédant ce PFE. Lors de cette phase d'acquisition, chacune des faces visibles (face a) des blocs entreposés dans le parc à blocs a été photographiée. Les vestiges étant trop volumineux, il était impossible de les retourner manuellement afin d'acquérir la deuxième face des blocs (face b). Ainsi, lors de ce PFE, les faces b de chacun des blocs ont été photographiées afin de finaliser l'acquisition des vestiges. Les photographies ont été prises, lors du PRT avec un Canon EOS 5D, et lors du PFE avec un Canon EOS 6D, un Canon EOS 5D SR et un Canon EOS 5D Mark II. Trois appareils photo ont été utilisés lors du PFE. En effet, les sorties sur le terrain se faisaient systématiquement par équipe de deux ou trois afin de finaliser la phase d'acquisition des données et de pouvoir commencer les traitements le plus rapidement possible.

Par ailleurs, une acquisition lasergrammétrique a été réalisée lors du PRT afin d'obtenir un nuage de points tridimensionnel de la zone environnante du monument. Des points GPS ont été levés afin de connaître les coordonnées des sphères utilisées pour le recalage des différents nuages acquis par lasergrammétrie. Ces données nous serviront donc à replacer ultérieurement, de manière géoréférencée, les hypothèses de restitution tridimensionnelle du monument antique dans son contexte environnant.

3. Traitements

Une fois les données photogrammétriques acquises, il s'agissait ensuite d'en tirer un modèle 3D sous forme de maillage. Dans un premier temps, le logiciel PhotoScan a permis de générer un nuage de points dense mis à l'échelle pour chacune des deux faces des vestiges (faces a et b), à partir des photographies prises. Ces nuages ont ensuite été segmentés afin de s'affranchir des parties inutiles mais également de nettoyer les points indésirables correspondant à du bruit ou encore à des éléments tels que des branches ou du feuillage. Une fois les nuages correspondant aux faces a et b nettoyés, ils ont été recalés entre eux à l'aide du logiciel 3DReshaper. L'outil employé utilise un algorithme de type ICP (*Iterative Closest Point*). Le second outil *Best Fit* a permis d'optimiser le recalage en utilisant non pas les points pointés manuellement, mais l'ensemble des nuages de points. La fonction *Best Fit* va analyser les zones de recouvrement dans le but de trouver la position idéale de chacun des objets en vue de minimiser les erreurs de recalage. Une fois le nuage de points du vestige obtenu dans son intégralité, il a ensuite été question de calculer ses normales afin de pouvoir passer à l'étape du maillage. La solution de maillage retenue est un maillage de type Poisson (*Poisson Surface Reconstruction*, développé par Michael Kazhdan).

Suite à la grande quantité de données à traiter, des scripts ont été mis en place afin de s'affranchir de certaines tâches répétitives et chronophages. En effet l'automatisation et le traitement autonome de certaines étapes du processus de modélisation a permis de gagner une quantité de temps conséquente.

La figure 2 récapitule, en synthétisant, les différentes étapes nécessaires afin d'obtenir des modèles tridimensionnels maillés à partir de données photogrammétriques.

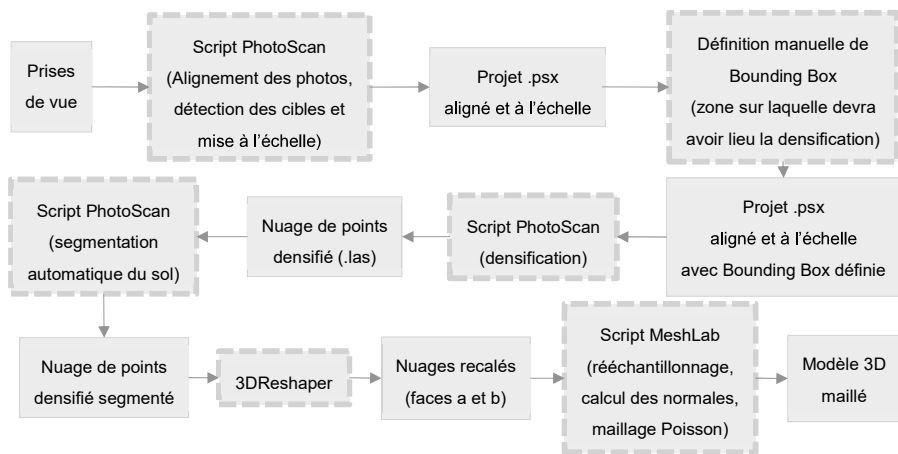


Figure 2 : Chaîne de traitement des données photogrammétriques

Un des grands enjeux, du point de vue archéologique, est le passage de modèles 3D obtenus à partir du vestige vers un modèle hypothétique tel qu'il aurait pu être initialement. L'objectif étant de parvenir à associer à chacune des familles archéologiques (architrave, abside, corniche etc.) un modèle générique. Afin de répondre à cette problématique tout en exploitant les données acquises par photogrammétrie, un processus d'extraction de coupes a été mis en place. Un visuel des coupes obtenues est disponible sur la figure 3 ci-contre.

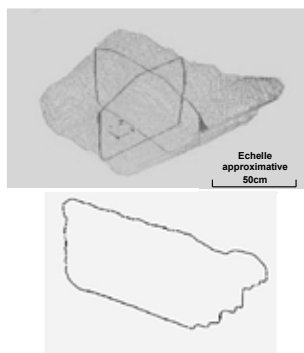


Figure 3 : Exemple de coupes extraites

Pour chacun des blocs, les coupes obtenues ont ensuite été projetées en 2D afin d'en tirer une coupe caractéristique correspondant à l'empreinte 2D maximum des projections de ces coupes. Ainsi chacun des blocs aura une polygône correspondant à une coupe caractéristique. Ce procédé est à nouveau appliqué pour chacun des blocs appartenant à une même famille archéologique. On en déduit finalement une coupe caractéristique pour les différentes catégories archéologiques. Ces coupes vont fournir des informations telles que la forme exacte des différentes moulures ou encore les dimensions initiales de certains vestiges abîmés voire partiellement détruits.

Les données lasergrammétriques ont quant à elles été fusionnées et rééchantillonnées et un maillage de la zone centrale a été réalisé.

En complément, des données Lidar obtenues en 2007 étaient également disponibles et ont par conséquent été traitées. Un MNT (*Modèle Numérique de Terrain*) a pu être généré permettant de visualiser les évolutions altimétriques ainsi que le contexte environnemental plus global et la position stratégique dans laquelle se trouvait le monument.

4. Modélisation paramétrique

La modélisation paramétrique, ou conception paramétrique, est un type de conception utilisé par des logiciels des CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*). L'idée est de concevoir une entité en ayant recours à des paramètres pouvant être facilement édités afin de pouvoir aisément modifier la définition de la pièce. Ne connaissant pas les dimensions et formes exactes de façon certaine, le choix de la modélisation paramétrique semblait judicieux et justifié afin d'avoir la possibilité à tout moment de revoir certains paramètres. Différents logiciels permettaient de construire des modèles paramétriques à

savoir CATIA, Pro/Engineer, Revit, SolidWorks, Inventor etc. La modélisation paramétrique étant une compétence nouvelle, il a fallu opter pour une solution logicielle suivant des critères simplistes. Le logiciel retenu est Inventor, développé par Autodesk. D'une part la prise en main s'est avérée être tout de suite très intuitive et d'autre part il offre théoriquement l'assurance de la pérennité quant à l'utilisation des données ainsi que leur compatibilité dans d'autres logiciels de la suite Autodesk. De plus, Inventor rend possible l'importation aussi bien des nuages de points que des polygones (à savoir les coupes caractéristiques extraites précédemment). Ces éléments, visibles sur la figure 4, ont permis de recréer les blocs génériques correspondant aux vestiges tels qu'ils étaient initialement conçus.

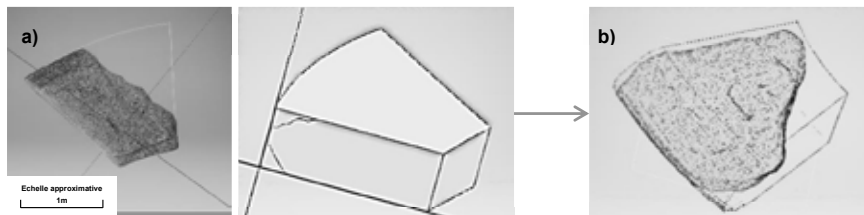


Figure 4 : a) Intégration du nuage de points et d'une coupe ; b) Modèle filaire superposé au nuage de points

5. Résultats

La figure 5 illustre un premier résultat obtenu. Il s'agit de la restitution tridimensionnelle du monument intégrée à son contexte environnant.

Une autre version est, à l'heure de rédaction de ce document, en cours de conception. Cette nouvelle version comportera d'une part certaines corrections concernant des incohérences architecturales présentes sur la première version, et d'autre part fera intervenir de nouvelles hypothèses quant à certains aspects du monument.



Figure 5 : Proposition de restitution 3D du monument dans son environnement

6. Conclusion et perspectives

Ce PFE fut l'occasion de mettre en pratique une grande quantité de connaissances acquises à l'INSA. Les vestiges ayant pour destinée d'être enfouis sous terre afin d'être préservés, la modélisation 3D de ces derniers intervient dans le cadre d'une préservation du patrimoine culturel et les modèles obtenus correspondent à présent d'une certaine manière aux modèles « réels ».

De plus, un des grands enjeux du point de vue archéologique était de parvenir à faire la transition entre ces modèles 3D vers des modèles hypothétiques correspondant aux vestiges tels qu'ils étaient initialement, tout en conservant et en utilisant les informations 3D acquises. Ce défi fut relevé et mené à bien grâce à l'extraction de coupes et l'intégration de celles-ci dans le logiciel de modélisation paramétrique.

Enfin, l'autre objectif majeur était de parvenir à proposer une restitution tridimensionnelle du monument antique. Une première hypothèse a été obtenue dans laquelle le monument a été replacé dans son contexte et une seconde hypothèse sera présentée à la fin de ce PFE.

Ce projet peut néanmoins être approfondi. Différentes perspectives sont envisageables. En effet, connaissant la position dans laquelle les vestiges ont été retrouvés, il serait intéressant de mener une étude modélisant la destruction du monument et la chute des vestiges. De plus, les découvertes archéologiques étant permanentes, de futures découvertes pourraient amener les archéologues à revoir leurs hypothèses concernant l'architecture de ce monument et par conséquent, d'autres modélisations pourraient être proposées.

Etude conceptuelle de constitution et d'exploitation de données parcellaires historiques

PFE présenté par :

Nicolas PERTSINIDIS

Société d'accueil :

Eurométropole de Strasbourg

Directeur de PFE :

Olivier BANASZAK

Correcteurs :

Mathieu KOEHL et Emmanuel ALBY



1. Introduction

L'objectif de cette étude est de construire une méthodologie pour réaliser un SIG (Système d'Information Géographique) historique, permettant de regrouper toutes les informations graphiques et techniques des parcelles de l'Eurométropole de Strasbourg depuis la création du cadastre. Ce travail doit retracer de façon exhaustive et rapide toutes les modifications des parcelles du cadastre de l'Eurométropole depuis le cadastre napoléonien.

Le SIG doit prévoir un accès à l'intégralité de la donnée facilement à l'aide d'une ligne temporelle sur laquelle pourra se déplacer un curseur. Ce dernier permettra d'accéder à l'état du parcellaire à une date choisie. Le SIG doit comprendre les outils d'entretien nécessaire afin de pouvoir mettre à jour les évolutions du parcellaire et d'assurer la pérennité du SIG dans le temps.

2. Etat de l'art

Le cadastre parcellaire a été mis en place en France à partir de 1807 en application du code napoléonien. Depuis cette époque, il a beaucoup évolué et tout particulièrement en Alsace - Moselle. En effet, ce territoire ayant été géré par l'Empire Allemand de 1870 à 1918, les plans cadastraux de celui-ci ont suivi des évolutions plus importantes que dans le reste de la France.

La révolution numérique introduite au milieu du XXe siècle a conduit au développement des outils informatiques. Dès lors, la DGFIP (Direction Générale des Finances Publiques) a œuvré avec le soutien technique et financier des collectivités territoriales afin que l'ensemble du parcellaire cadastral français couvrant soit accessible et consultable en ligne. Il est accessible depuis 2007.

Cette numérisation du cadastre conduit actuellement certaines collectivités à informatiser l'intégralité de l'histoire de leur parcellaire. Cela a non seulement un intérêt historique et un intérêt pour la conservation du patrimoine papier mais aussi une utilité réelle. Par exemple, les urbanistes utilisent régulièrement les archives papiers pour étudier le développement urbain et rural.

Les données parcellaires historiques d'une commune sont généralement constituées de plans papiers, de registres des propriétés historiques et de données informatiques alphanumériques et vectorielles. Ainsi, l'informatisation du parcellaire cadastral historique consiste dans un premier temps à numériser tous les documents. Ensuite, il est indispensable de structurer et indexer les données numérisées et les données informatiques de la même manière afin de préparer leur intégration dans un outil informatique.

Plusieurs communes se sont déjà attelées à cette tâche et ont produit un outil informatique permettant d'exploiter leurs données parcellaires historiques. Selon les traitements des données effectués, on rencontre différents types d'outils. La ville de Toulouse par exemple, donne accès au public via internet à un outil SIG munit d'un curseur temporel. Nous pouvons donc accéder à plusieurs états du parcellaire historique de la ville selon la date que pointe le curseur : 1680, 1810 ou 2010 (Cf. figure 1). Pour concevoir ce type d'outil, il est nécessaire d'effectuer trois traitements : numériser les planches papiers, joindre informatiquement les planches afin d'obtenir un plan continu et vectoriser le plan (la vectorisation d'un plan consiste à redessiner informatiquement tous les tracés qui le composent).



Figure 1 : SIG historique du parcellaire de Toulouse.

3. Imagerie et histoire parcellaire

Cette partie du projet permet le traitement des données les plus anciennes de l'Eurométropole : les plans papiers. L'objectif est donc de constituer, à l'image de la ville de Toulouse, deux états plus ou moins figés du parcellaire cadastral : l'état du parcellaire à l'époque de la création du cadastre, avec les planches dites « napoléoniennes » (1830-1840), ainsi que celui de 1890-1900 qui correspond à l'époque où l'Alsace Moselle était annexée à l'Allemagne, avec les planches dites « allemandes ».

L'objectif du projet était de créer un plan continu pour chacune de ces deux époques puis de vectoriser les deux plans afin de nous approcher de la structure des données actuelles. Pour qu'un ensemble de planches forme un plan continu, il faut d'abord découper chaque planche afin de ne conserver que les dessins des parcelles, pour enfin les géoréférencer. Les planches napoléoniennes et allemandes sont particulièrement différentes et ont, de ce fait, subi des traitements différents.

Les planches napoléoniennes sont habillées d'une flèche nord et sont généralement à l'échelle 1/1250. Un travail préparatoire avait permis de calculer les paramètres de géoréférencement de ces planches et de dessiner le contour des plans. Ma mission sur ces 115 planches était de créer un algorithme permettant d'utiliser les paramètres de géoréférencement pour géoréférencer les planches puis de les découper à l'aide des contours déjà dessinés (Cf. figure 2).

D'après une étude de comparaison entre les bâtiments actuels et les bâtiments dessinés sur les planches napoléoniennes, le plan continu a une emq égale à 4 mètres. Lors de l'assemblage, nous avons constaté que certaines planches contenaient deux plans : le plan principal et un morceau du plan principal dessiné dans un coin par manque de place sur la planche. Un travail complémentaire de 4 jours est nécessaire pour combler les 11 trous encore présents à cause de ces planches.

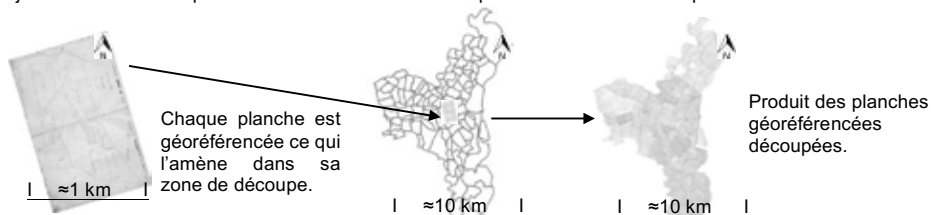


Figure 2 : Etapes de la création d'un plan continu.

Les planches allemandes sont, quant à elles, habillées d'une flèche nord, de croix de carroyage facilitant leur géoréférencement et sont généralement à l'échelle 1/500. Sur celles-ci, un travail préalable avait permis d'effectuer une rotation afin qu'elles soient orientées plein nord. Il est important de noter que des parcelles sont regroupées par sections puis par communes. Les planches allemandes correspondent chacune à une section géométriquement proche aux sections d'aujourd'hui. Nous avons donc à notre disposition les contours des plans nécessaires au découpage de chaque planche. Ma mission sur les planches allemandes était donc d'automatiser le calcul des paramètres de géoréférencement de chaque planche afin de les géoréférencer puis de les découper avec les contours connus.

Pour automatiser le géoréférencement des planches, j'ai créé un algorithme qui effectue les actions faites lors d'un géoréférencement manuel : détection et pointage des croix de carroyage, recherche de l'emplacement des coordonnées terrain écrite, lecture des coordonnées, calcul des paramètres de géoréférencement, calcul des résidus et suppression des points hors tolérance. Seule l'étape de la lecture des coordonnées n'a pu être automatisée. En effet, il est nécessaire de lire une coordonnée sur l'axe X et une coordonnée sur l'axe Y. Pour une planche, une fois la lecture X et Y réalisée, un fichier JGW est créé à son nom avec ses paramètres de géoréférencement. L'Eurométropole dispose donc d'un moyen pour géoréférencer les planches, les découper et former un plan continu.

En utilisant, sur un échantillon de planches allemandes, la même méthode de comparaison que pour les planches napoléoniennes, nous pouvons dire que le plan continu allemand aura un emq moyen de 0,4 m. Afin d'appliquer la méthodologie et obtenir un plan continu, sept mois de travail à temps complet seront nécessaires, dont cinq pour la correction des contours des sections.

Une fois les plans continus de l'époque napoléonienne et allemande créés, une étape de vectorisation permettant aux parcelles d'être vectorisées (c'est à dire obtenir une géométrie) est nécessaire pour que ces données historiques aient la même structure que les données parcellaires actuelles. Cependant, l'Eurométropole ne prévoit pas d'effectuer une vectorisation car c'est un travail très long et donc onéreux. La vectorisation des planches allemandes et napoléonienne demanderait plus de deux ans de travail pour un agent travaillant 35h par semaine sur ce projet.

4. Etude du parcellaire

Différentes spécificités d'Alsace-Moselle ont conduit à ajouter dans notre étude une étape supplémentaire par rapport aux études déjà menées dans le reste de la France : l'étude du parcellaire. En effet, en Alsace Moselle, la filiation des parcelles peut être remontée grâce aux documents d'arpentage (DA) qui sont engendrés à chaque modification du parcellaire. A chaque DA est associé au minimum une parcelle mère et au moins une parcelle fille (Cf. figure 3). De plus, une des réglementations en Alsace Moselle est que toute parcelle doit être bornée. Ainsi, dans les DA, nous pouvons retrouver pour toutes les parcelles la situation précédente et la situation nouvelle grâce à des croquis cotés en fonction de l'emplacement des bornes.

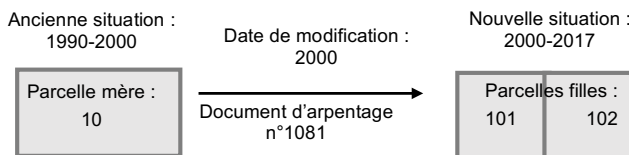


Figure 3 : Exemple schématique d'une modification parcellaire : la division.

D'après ces concepts, notre étude pourra se poursuivre avec la structuration des données alphanumériques et vectorielles et l'établissement de la filiation entre les parcelles. Cette dernière aura quatre intérêts : vérifier qu'il ne manque pas de modification parcellaire intermédiaire, contrôler que les filiations établies sont justes, créer de nouvelles géométries pour les parcelles connues uniquement dans les fichiers alphanumériques (Avec l'exemple figure 3, on peut créer la parcelle 10 par fusion des parcelles 101 et 102) et augmenter le nombre d'états connus du parcellaire. L'étape de l'établissement des filiations offrira donc la possibilité de diminuer le pas entre deux dates (le pas étant l'écart entre deux dates consécutives sur lesquelles pourra se rendre notre curseur temporel).

La structuration des données alphanumériques et vectorielles consiste à joindre différentes sources de données dans une même structure. Dans notre étude, nous avons 6 tables de données comprenant 1,4 million de lignes alphanumériques dont 0,9 million qui étaient associées à une donnée vectorielle (= une géométrie de parcelle). Ainsi, c'est en partant des données les plus récentes (seules données comprenant des informations vectorielles) que nous sommes remontés aux états antérieurs du parcellaire. Avec l'exemple figure 3, nous pouvons remonter à l'état antérieur des parcelles en fusionnant les parcelles 101 et 102. Cependant, en cas de réunion de parcelles mères (peu de cas car la tendance est au morcellement), il n'est pas possible de savoir où placer la limite pour effectuer la division et ainsi retrouver les parcelles mères à partir de la parcelle fille. Dans ce dernier cas, nous gardons la géométrie de la parcelle fille en modifiant ses attributs pour indiquer que cette parcelle correspond à deux parcelles. Nous ajoutons aussi le DA correspondant à la réunion afin que la géométrie des deux parcelles mères puisse être rétablie manuellement.

A la date du 6 juillet 2017, 74% des filiations ont été établies avec les données alphanumériques et 30% sont certifiées juste par contrôle de redondance. Ce nombre peut évoluer lors de la prise en compte des données vectorielles : si deux parcelles d'une même filiation, l'une mère et l'autre fille, ne sont pas localisées au même endroit, il est peu probable qu'elles appartiennent à la même filiation.

Après avoir créé les différentes géométries, toutes les parcelles dont la filiation sera établie auront un enregistrement dans la table structurée associée à une donnée vectorielle (= une parcelle). Ainsi, pour toutes ces parcelles, nous pourrons indiquer une date de création et une date de suppression afin de mettre en place la ligne temporelle. Pour une date X pointée par le curseur temporel, la fenêtre d'affichage du plan permettra de visualiser toutes les parcelles pour lesquelles X sera compris entre leur date de création et leur date de suppression (Cf. figures 4 et 5 : la parcelle 1 est affichée si le curseur est entre 1830 et 1975 et les parcelles 101 à 103 sont affichées si le curseur est entre 1975 et 2017).

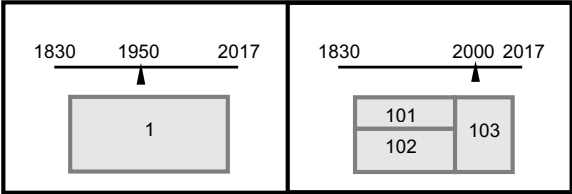


Figure 4 : Exemple de deux fenêtres présentant l'état du parcellaire du même lieu à deux dates différentes.

Parcelle	Parcelle(s) mère(s)	Parcelle(s) fille(s)	Date création	Date suppr.
1		101,102, 103	1900	1975
101	1		1975	2017
102	1		1975	2017
103	1		1975	2017

Figure 5 : Table alphanumérique associée aux données vectorielles.

5. Mise à jour

La partie mise à jour se réfère à deux types de modifications : les modifications futures du parcellaire et les modifications d'une filiation mal établie automatiquement.

Pour modifier une filiation historique et ajouter une parcelle intermédiaire, il sera nécessaire d'ajouter un enregistrement pour la parcelle, de le compléter rigoureusement et de lui associer une géométrie de parcelle. A l'aide d'un algorithme, la date de suppression de la parcelle mère prendra pour valeur la date de création de la nouvelle parcelle et la date de création de la parcelle fille prendra pour valeur la date de suppression de la nouvelle parcelle (Cf. figure 6 : La parcelle 1 sera affichée si le curseur est entre 1830 et 1967, les parcelles 50 et 103 seront affichées si le curseur est entre 1967 et 1983, les parcelles 101 à 103 si le curseur est entre 1983 et 2017.). De la même manière, les champs « parcelle(s) fille(s) » et « parcelle(s) mère(s) » seront corrigés. Ainsi, si l'enregistrement créé est correctement complété, l'algorithme permettra de corriger entièrement la filiation.

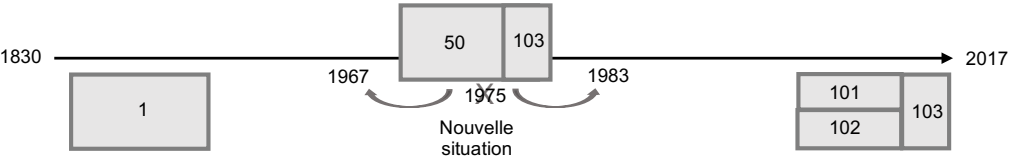


Figure 6 : Exemple d'une modification du parcellaire historique (exemple lié aux figures 4 et 5).

Aujourd'hui, pour actualiser son parcellaire cadastral, l'Eurométropole conserve les parcelles qui viennent d'être supprimées dans une couche « archive » puis crée les nouvelles parcelles dans une couche « cadastre ». Afin d'actualiser les données, un algorithme permet de joindre les structures de ces deux couches aux données initiales. Ainsi, l'outil à jour des données de 2017 pourra être mis à jour en 2018 avec cet algorithme de traitement qui ajoute les nouvelles modifications parcellaires aux anciennes données. Les données peuvent aussi être actualisées en ajoutant pour chaque nouvelle parcelle, un nouvel enregistrement comme vu précédemment pour modifier une filiation historique.

6. Conclusion

Pour conclure, nous avons vu qu'un SIG historique peut-être produit sur l'ensemble du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg. Le curseur temporel pourra être positionné aux périodes napoléoniennes (1830-1840) et allemandes (1890-1900) afin d'afficher les plans rasters continus respectifs. Il pourra ensuite être déplacé avec un pas de 10 ans pour se rapprocher des modifications les plus récentes et être déplacé, au fur et à mesure, sur un plus petit pas.

Comme le montrent les résultats actuels, au minimum 26% des parcelles (≈ 100 000 parcelles) devront être reprises manuellement pour être introduites dans le SIG. Si les données vectorielles confirment les résultats obtenus avec les données alphanumériques, 30% des parcelles devraient être intégrées avec un indice de confiance supérieur à 0 (l'indice de confiance indique le degré de certitude avec lequel nous certifions qu'une filiation est juste, il varie de 0, pour une parcelle dont on ne peut pas, par redondance, contrôler la filiation, à l'infini). Les parcelles restantes pourront être intégrées dans le SIG si les données vectorielles confirment leur filiation.

Développement d'une procédure d'amélioration du calcul de trajectographie d'un système de cartographie dynamique.

PFE présenté par : **Katia MIRANDE**
Société d'accueil : **GEOFIT**
Directeur de PFE : **Valentin POITEVIN**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**



1. Introduction

1.1 Contexte

L'entreprise GEOFIT, anciennement FIT ESIC, propose, depuis maintenant plus de 5 ans, la réalisation de relevés à haut rendement par cartographie dynamique. Cette technologie présente la possibilité d'acquérir une quantité très importante de données et constitue donc un réel atout lorsqu'il s'agit de répondre aux besoins des clients.

Néanmoins, le traitement d'une telle quantité de données n'est pas aisé car il peut devenir particulièrement chronophage. Il est donc nécessaire de disposer d'une chaîne de traitements qui soit optimale en terme de temps passé et menant à des données exploitables, c'est-à-dire un nuage de points géoréférencé le plus précisément possible. La chaîne de traitement mise en place chez GEOFIT permet d'ores et déjà d'obtenir un résultat répondant aux demandes des clients. Malheureusement, il peut arriver que certains dossiers présentent des difficultés supplémentaires et que le nuage de points obtenu présente des décalages par rapport à la réalité ou ne soit pas cohérent entre plusieurs passages. Ces dossiers nécessitent alors plus de temps humain et de temps sur le terrain (acquisition de données complémentaires) pour l'obtention de données satisfaisantes.

Le bon déroulement d'une mission de cartographie dynamique dépend d'un nombre important d'étapes présentées en figure 1. L'acquisition et le traitement des données sont entièrement réalisés par GEOFIT.

Ce projet se focalise uniquement sur les éléments permettant d'améliorer le calcul de la trajectoire du système d'acquisition lors d'une mission. En effet, le géoréférencement du nuage de points obtenu lors de l'acquisition dépend du bon calcul de la trajectoire adoptée pendant la mission. Il serait ainsi possible de diminuer le traitement effectué à même le nuage de points dans la suite.

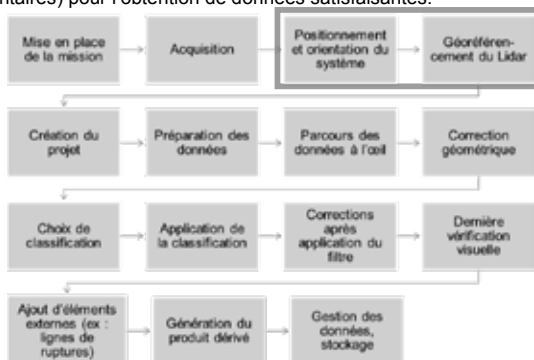


Figure 1 : Étapes classiques d'une mission de cartographie dynamique. (Source : traduit de Graham (2010)). Les deux étapes d'intérêt de ce projet sont encadrées.

Le calcul de la trajectoire lui-même est composé de deux étapes principales :

- Le calcul d'une solution GNSS grâce à l'antenne embarquée.
- Le couplage de cette solution GNSS avec les informations issues de la centrale inertielle.

1.2 Objectifs

Les objectifs de ce projet sont donc multiples :

- Améliorer la compréhension de la chaîne de traitement et notamment de processus issus de logiciels que l'on peut qualifier de « boîtes noires ».
- Améliorer la chaîne de traitement de façon à diminuer la présence d'erreurs dans le nuage de points et diminuer le temps de traitement.

2. Préliminaires : une méthode d'évaluation des trajectoires

Avant d'effectuer tout test ou toute tentative d'amélioration du calcul de trajectoire, la question de l'évaluation de cette dernière se pose.

En effet, les décalages ou erreurs dus à la trajectoire sont très simplement visibles dans le nuage de points généré. Malheureusement, la génération du nuage de points est une étape chronophage et limiterait le nombre de tests possibles. De plus, la détection des erreurs dans le nuage de points doit par la suite se faire de façon manuelle, en mesurant les écarts constatés entre plusieurs passages du système d'acquisition dans la même rue ou zone. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer une trajectoire sans générer le nuage de points Lidar associé.

Certes, il est possible de juger d'une trajectoire de façon relative par rapport à plusieurs passages du système d'acquisition sur la même zone. Néanmoins, une évaluation par rapport à une référence extérieure est préférable et ne serait pas corrélée, or certains projets de cartographie dynamique se trouvent complétés par méthode traditionnelle. Ces points servent alors de points de contrôles ou de compléments. Dans le cadre de ce projet, ces points sont des points de référence. Cependant, une question se pose : comment exploiter ces points directement après la génération de la trajectoire ?

Un procédé a été développé pour permettre d'utiliser ces points de contrôle directement après le couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle. Ce procédé démarre par l'utilisation des mêmes étapes que la chaîne de traitement et utilise les logiciels présents dans la chaîne de traitement. On parvient ainsi à obtenir un fichier contenant des points épars correspondants à chaque point de contrôle identifié sur le nuage de points.

Un script Matlab permet, par la suite, d'exploiter cette trajectoire. La trajectoire créée est une suite de positions dont la fréquence dépend entièrement de la quantité de points GNSS disponibles pour la session de mesure associée. Cette trajectoire de référence doit être comparée à la trajectoire obtenue après couplage avec la centrale inertielle. Dans le cas présent, la trajectoire est donnée avec une fréquence très élevée. L'acquisition GNSS est effectuée avec une fréquence de 2 Hz mais est couplée avec la centrale inertielle qui effectue son acquisition à une fréquence de 500 Hz, soit 0.002 seconde entre deux positions adoptées lors de l'acquisition. Une interpolation a donc été effectuée mais cette dernière n'impacte pas les résultats puisqu'elle est minime. Cette interpolation étant systématiquement effectuée sur un intervalle de temps inférieur à 0.002 seconde (temps entre deux mesures de la centrale inertielle), l'erreur due à cette interpolation ne peut excéder, à 100 km/h, 5 cm. De plus, nous sommes plus souvent amenés à travailler sur des missions en milieu urbain (plus susceptibles de contenir des erreurs), entre 30 et 50 km/h de vitesse de déplacement du système d'acquisition.

Une chaîne de test a donc été mise en place de façon à pouvoir évaluer une trajectoire par rapport à une référence indépendante. Néanmoins, il est impossible avec cette méthode d'évaluer la solution GNSS avant couplage par rapport à la trajectoire de référence. En effet, l'interpolation devrait alors être effectuée sur une période de temps trop importante, l'erreur due à celle-ci serait bien trop conséquente.

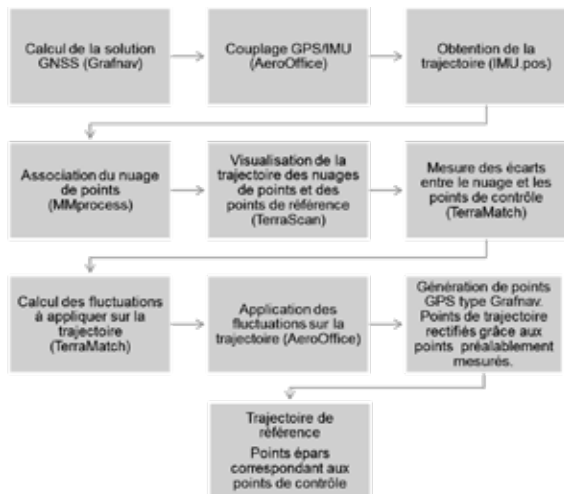


Figure 2 : Étapes nécessaires à la réalisation d'une trajectoire de référence constituée de positions éparses.

3. Amélioration et compréhension de la chaîne de traitement

Malgré la nécessité du couplage avec la centrale inertielle, les deux grandes étapes du calcul ont été considérées séparément lorsqu'il s'agissait d'améliorer le calcul de trajectoire.

3.1 Amélioration du calcul de la solution GNSS

Une première partie des tests s'est portée sur les paramètres de calcul de fixation de phase, plus particulièrement sur les conditions de conservation de ces solutions. Le logiciel GrafNav, ici utilisé uniquement pour le calcul de la solution GNSS, effectue un calcul nommé « ARTK » (Advanced RTK). Il s'agit d'une méthode de détermination d'ambiguïtés propre au logiciel. L'objectif était ici d'améliorer l'utilisation des méthodes de filtrage pour limiter au maximum la prise en compte de mauvaises solutions pour la fixation d'ambiguïtés. Afin de représenter l'évolution des écarts de la trajectoire calculée à la trajectoire de référence à l'échelle de toute une session de mesure, ces décalages sont présentés sous forme d'histogrammes.

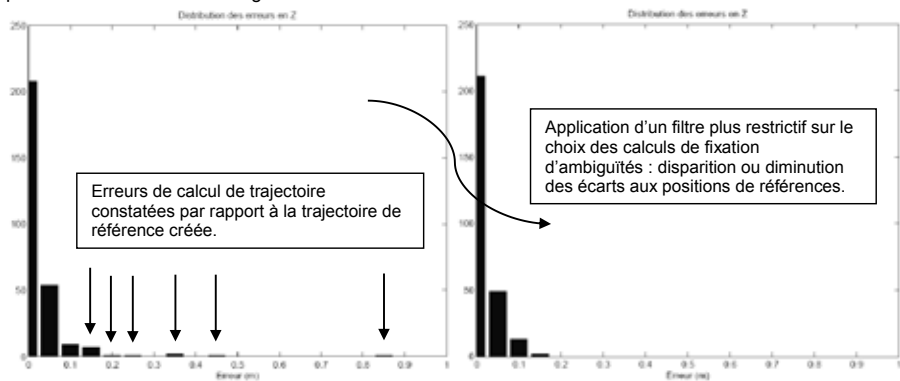


Figure 3 : Histogrammes représentant les écarts aux positions de référence par rapport aux trajectoires testées. À gauche, la trajectoire est calculée selon la méthode originelle de traitement. À droite, la trajectoire a été calculée en filtrant un certain nombre de fixations d'ambiguïtés erronées.

La figure 3 présente la diminution des écarts de plus de 10 centimètres grâce à l'application d'un filtre plus restrictif. Les histogrammes sont similaires. Cela n'est pas étonnant, la chaîne de traitement a déjà fait ses preuves. Néanmoins, il est bon de rappeler que la trajectoire évaluée est comparée à une trajectoire de référence plus éparsée. Par conséquent, un seul écart sur cet histogramme peut représenter des écarts sur plusieurs mètres d'acquisition. Le bénéfice obtenu n'est pas négligeable.

3.2 Automatisation d'une partie de la chaîne de traitement

Lors du couplage de la solution GNSS avec la centrale inertielle sous le logiciel AeroOffice, l'utilisateur est amené à préciser certains éléments. L'utilisateur précise notamment quelles sont les zones de non-déplacement du système d'acquisition, les « ZUPT » (Zero Velocity Updates) et également les zones disposant d'un signal GNSS qu'il vaut mieux ne pas prendre en compte dans le couplage, les zones « No GNSS ». Dans ce cas, seules les informations de position fournies par la centrale inertielle sont utilisées pour déterminer la trajectoire. Les « ZUPT » sont déterminées à partir d'un graphique donnant la vitesse en fonction du temps d'acquisition. Ce graphique est obtenu à partir de la solution GNSS précédemment calculée. Les zones « No GNSS » sont déterminées grâce à un graphique représentant les écarts entre une estimation de la solution proposée par la centrale inertielle et la solution proposée grâce aux observations GNSS en fonction du temps. Si ces écarts dépassent un certain seuil, la solution GNSS n'est pas prise en compte. La détermination de ces zones est particulièrement chronophage. En effet, il est nécessaire de faire défiler en longueur chacun des deux graphiques de contrôle et d'ajuster sa fenêtre de vue à la zone que l'on veut signaler. Cela demande d'agrandir et de diminuer sans cesse les échelles du graphique.

Après avoir découvert qu'il était possible d'exporter ces graphiques d'analyse sous la forme d'un fichier texte, il a été possible de créer un script Matlab permettant la détermination de ces zones et de les réimporter directement dans le logiciel en modifiant directement le fichier de travail d'AeroOffice qui est un fichier texte. Une interface graphique, présentée en figure 4, a été réalisée pour plus de confort pour l'utilisateur. Les paramètres de sélection des zones peuvent être modifiés. Des sécurités ont été mises en place. L'utilisateur est obligé de déterminer les zones dans le bon ordre de traitement (sinon les boutons restent grisés). Si le fichier de travail AeroOffice contient déjà des zones, l'utilisateur ne peut pas poursuivre et reçoit un message l'invitant à les supprimer ou à les conserver.

Le gain de temps est important puisque la détermination de ces zones, dans le cas où elles ne demandent pas d'analyse particulière, varie selon les sessions de mesures de 20 à 40 minutes, voire même une heure pour des sessions très longues. Ce programme permet de limiter l'opération à 5 minutes. Il est ensuite possible de se consacrer à l'analyse et à l'amélioration des zones sans GNSS qui demandent un traitement plus approfondi.



Figure 4 : Interface graphique du programme réalisé sous Matlab. L'objectif est de sélectionner le fichier de travail du logiciel de couplage puis d'indiquer les différents graphiques à analyser. Le programme génère alors les zones et les introduit directement dans le fichier de travail. Les zones seront alors considérées à la guise de l'utilisateur dans le calcul de couplage.

3.3 Compréhension du couplage de la solution GNSS aux données de la centrale inertielle

Différentes expériences ont été menées pour comprendre au mieux le processus de couplage avec la centrale inertielle dans AeroOffice. Même si certains principes théoriques qui régissent ce calcul auront été abordés dans l'état de l'art, il est intéressant de visualiser l'impact de certains éléments sur ce processus. Ainsi, il a été possible d'approfondir différents éléments :

- La solution GNSS fournit une position toutes les 0.5 secondes, mais nous avons étudié le cas où la solution GNSS serait absente sur une durée plus importante pour observer les écarts induits par la centrale inertielle.
- Chaque position présentée par la solution GNSS est accompagnée de précisions déterminées par GrafNav. Ces précisions ont un impact sur le couplage.
- Lors du couplage, il est possible de définir un seuil (voir 3.2) pour lequel les positions de la solution GNSS ne seront pas prises en compte. Des tests ont été réalisés pour constater de l'amélioration ou de la détérioration de la trajectoire selon la sévérité du seuil.

4. Conclusion

À l'issue de ce projet, certaines erreurs pourront être évitées et les trajectoires permettront de géoréférencer les nuages de points acquis avec un peu plus de justesse. Cette amélioration aura un impact sur le temps de traitement des nuages et sur les recalages de ces derniers par l'intermédiaire des opérations de « matching ». Le traitement a également été en partie automatisé ce qui a entraîné un gain de temps non négligeable.

Ce projet permettra aux futurs utilisateurs de la chaîne de traitement une meilleure compréhension et utilisation de certains outils. Les observations et remarques émises lors de ce projet pourront être affinées avec le temps et la pratique.

Référence : Graham, L. (2010). *Mobile mapping systems overview. Photogrammetric engineering and remote sensing*, 76(3):222/228.

Développement d'un algorithme de détection et de mesure d'un fil tendu sur des photos de l'accélérateur LHC au CERN

PFE présenté par : **Lucie Scandella**
Société d'accueil : **CERN**
Directeur de PFE : **Dirk Mergelkuhl**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



1. Contexte de l'étude

Le CERN est le plus grand laboratoire de physique des particules au monde. Il possède plusieurs accélérateurs de particules, dont le LHC (*Large Hadron Collider*, Grand collisionneur de hadrons), qui permettent aux scientifiques d'étudier les constituants de la matière. Deux faisceaux de particules circulent à l'intérieur du LHC à une vitesse proche de celle de la lumière avant d'entrer en collision au cœur de détecteurs. Un puissant champ magnétique, généré par des aimants supraconducteurs, guide les faisceaux le long de leur parcours. Le LHC comporte des lignes droites appelées LSS (*Long Straight Sections*), des arcs et des collimateurs.

L'alignement des aimants du LHC est indispensable pour assurer la stabilité des faisceaux sur leur orbite. Actuellement, la mesure de la position radiale des aimants est réalisée manuellement grâce à l'écartométrie, ce qui est coûteux en temps. Cette méthode consiste à mesurer une distance par rapport à une ligne droite servant de référence, ici un fil tendu. Elle permet d'atteindre une précision de 20 μm pour la mesure de distances. Cependant, la présence humaine dans le tunnel devra être progressivement limitée à cause de l'augmentation de la radioactivité de certains composants exposés aux faisceaux. L'étude s'inscrit ainsi dans le cadre du développement d'une procédure d'automatisation de la mesure d'écarts par rapport à un fil tendu. Une étude de faisabilité de la mesure de fils par photogrammétrie a déjà été menée (Vendeuvre, 2016). Mais cette solution est dépendante d'un logiciel commercial de photogrammétrie et elle requiert toujours l'intervention manuelle de l'utilisateur pour donner la position des points homologues. Dans le but d'une automatisation, le développement d'une nouvelle méthode de détection de fil totalement automatique est nécessaire.

L'objectif du sujet est le développement d'un module informatique réalisant la détection approximative sur une photo d'un fil tendu, puis la mesure précise de celui-ci en 2D dans le repère image. Une procédure de test de l'algorithme sera mise en œuvre pour évaluer sa fiabilité et sa précision.

2. Développement de l'algorithme

L'algorithme développé est scindé en deux parties : la détection approximative et la mesure précise du fil. Cela inclut la définition des paramètres d'entrée et de sortie de l'algorithme. L'environnement de développement de l'algorithme utilisé est MATLAB sous la version R2016b.

2.1. Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée de l'algorithme sont :

- les paramètres propres à l'appareil photo : taille du capteur et paramètres d'orientation interne ;
- les caractéristiques du fil : diamètre et couleur ;
- les paramètres des différents traitements d'image.

2.2. Détection approximative du fil

L'extraction approximative du fil se fait au moyen d'algorithmes de traitements d'image (filtres, détection de formes). La nature des traitements et l'ordre dans lequel ils sont appliqués sont essentiels pour la robustesse de l'algorithme. Le fil tendu peut être assimilé à une droite sur la photo car elle couvre seulement 2 m du fil. La connaissance de certaines informations sur la droite recherchée permet de faciliter sa détection et d'éliminer les autres droites de l'image. Les différentes étapes de la détection approximative du fil sont visibles sur la figure 1.

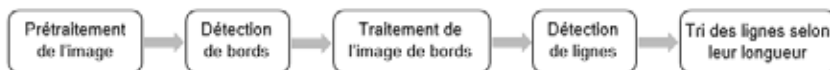


Figure 1. Etapes simplifiées de la détection approximative du fil

La qualité de la détection est étroitement liée à la qualité des bords dans l'image. C'est pourquoi, des prétraitements ont été appliqués sur la photo initiale. Tout d'abord, les photos étant prises avec un flash, la photo est claire au centre et plus sombre dans les coins. Un filtre d'égalisation d'histogramme adaptative, permettant de rehausser le contraste dans l'image, est utilisé. Puis, afin de réduire le nombre de points de bords, l'image est lissée avec un filtre de lissage. Un filtrage guidé (He et al., 2013) est bien adapté car il lisse les zones homogènes en conservant les bords premiers de l'image. L'étape suivante est la détection des contours dans l'image avec le détecteur Canny. L'image en sortie est une image binaire, qui est traitée avec des opérateurs morphologiques permettant de mettre en évidence le fil. Les lignes dans l'image sont détectées avec la transformée de Hough. Parmi les droites trouvées, c'est la plus longue qui est retenue comme première candidate car le fil traverse l'image. La droite approximative est définie par son coefficient directeur a' et son ordonnée à l'origine b' .

2.3. Mesure sub-pixellaire du fil

Une fois la position approximative du fil déterminée, celui-ci est mesuré plus précisément suivant les étapes décrites sur la figure 2.



Figure 2. Etapes simplifiées de la mesure précise du fil

Pour optimiser le temps de traitement, cet algorithme est appliqué sur une zone réduite de l'image. Une bande contenant le fil est donc découpée avant la détection de bords sub-pixellaire. La mesure précise du fil est établie sur la base d'un algorithme de détection de bords sub-pixellaire (Trujillo-Pino et al., 2013). Il donne en sortie tous les points de bords trouvés dans l'image réduite avec leurs coordonnées en pixels, la direction du vecteur normal, la courbure et les valeurs des niveaux de gris de chaque côté du bord. Ces points sont triés selon leur distance à la droite approximative, la direction du vecteur normal et la courbure qui doit être proche de zéro. Les coordonnées des points de bords restants sont corrigées des distorsions avec les paramètres d'orientation interne.

Les paramètres des deux lignes de bord sont ensuite estimés par régression linéaire orthogonale suivant la méthode des moindres carrés. Il est possible de calculer les précisions associées et les résidus. Malgré le tri effectué précédemment, il reste des points de bord qui n'appartiennent pas à la ligne. Ce sont des erreurs à éliminer avant de calculer la ligne. Cette opération s'effectue lors du calcul de moindres carrés, par comparaison des erreurs au σ_0 . À chaque itération, les poids sont modifiés et un poids nul est attribué aux mesures dont l'erreur est plus grande que $2,58 \sigma_0$. Une ligne comporte beaucoup de points de bord détectés (environ 4000 points), ce qui est largement suffisant pour le calcul des moindres carrés, même avec la suppression des erreurs.

Pour améliorer la robustesse de l'algorithme, une vérification des deux droites est réalisée après le calcul des deux bords. Cette vérification s'effectue en considérant les coefficients directeurs des deux lignes de bord, les erreurs moyennes quadratiques de a et de b et la position relative des deux lignes de bord dans l'image. Si l'un de ces critères n'est pas respecté, la droite approximative suivante est prise comme candidate. Finalement, le centre du fil est calculé par la moyenne de ces deux lignes.

2.4. Paramètres de sortie

Les paramètres en sortie de l'algorithme sont le coefficient directeur de la droite a , l'ordonnée à l'origine b et leurs précisions associées, l'erreur moyenne quadratique de l'unité de poids et le pourcentage de points ayant été conservés après l'élimination des erreurs.

3. Procédure de test

3.1. Prise des photos dans le LHC

Le développement de l'algorithme est fait sur la base de photos prises dans le LHC. Deux séries de photos ont été acquises : la première pour servir de base au développement de l'algorithme et l'autre pour sa validation. Les photos ont été réalisées dans différentes zones (LSS, arcs et collimateurs).

L'appareil photo utilisé est l'appareil Nikon D3X. Il est muni d'un capteur CMOS de 24.0 mm x 35.9 mm ayant une résolution de 24.5 Mpx. Il est associé à un objectif de 28 mm et à un flash déporté Nikon Speedlight SB-700 fixé sur l'appareil pendant la prise des photos. La calibration de la caméra est nécessaire pour pouvoir corriger par la suite les distorsions dans les photos. Pour cela, une simple plaque en bois de 80 cm x 80 cm sur laquelle sont collées des cibles codées est utilisée. Pour obtenir une précision suffisante, un minimum de 15 photos avec une bonne convergence et une bonne répartition est nécessaire. Des cibles sont disposées sur l'aimant dans des alésages correspondant à des points de repère fixes (figure 3). Le fil est maintenu en tension le long de l'aimant grâce à des serre-joints fixés sur l'aimant sur une longueur de 30 à 50 mètres. Les photos sont prises à une distance de 80 cm par rapport au fil.

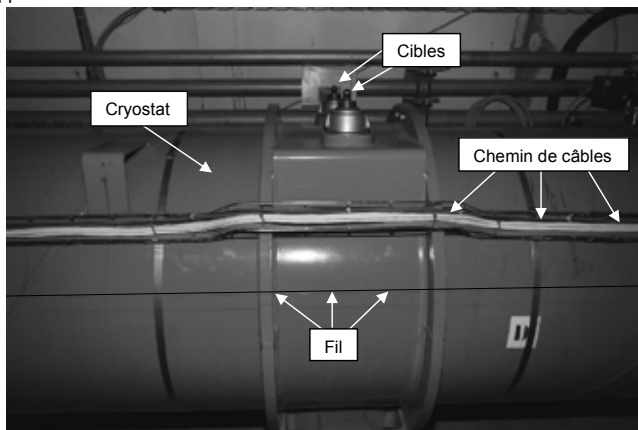


Figure 3. Photo du cryostat et du fil pour un aimant dipolaire du LHC

3.2. Paramètres testés

De nombreux paramètres ont été testés pour déterminer les valeurs optimales. Ils peuvent être séparés en deux catégories :

- les paramètres propres à la prise des photos : angle du fil dans l'image, ISO, type de fil ;
- les paramètres propres aux traitements d'image : degré de lissage, seuil du détecteur de bords Canny, seuil du détecteur de bords sub-pixellaire.

4. Résultats

4.1. Fiabilité de la détection approximative

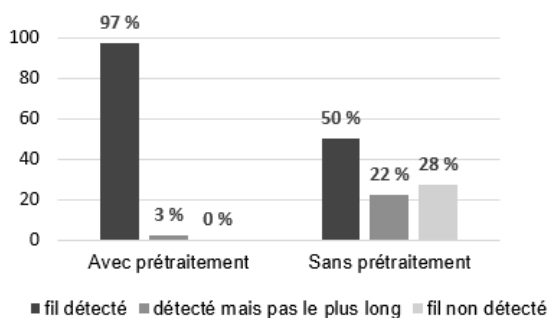


Figure 4. Fiabilité de la détection approximative du fil avec et sans prétraitement de l'image originale

La fiabilité de l'algorithme à détecter la bonne droite dans l'image est essentielle pour l'utilisation future de l'algorithme. Elle a d'abord été évaluée sur 156 photos dans les conditions dites « standard ». Dans ces conditions, le contraste est assez marqué (différence de 30 niveaux de gris) et le fil est approximativement horizontal sur la photo.

La figure 4 décrit les résultats des tests de fiabilité dans les conditions standard, avec et sans prétraitement des photos initiales.

Avec un prétraitement, le fil est détecté dans 100% des photos. Il s'agit de la droite la plus longue dans 97% des cas. Les 3% des

photos où le fil n'est pas la droite la plus longue ont un contraste trop faible (différence d'environ 6 niveaux de gris). Sans ces étapes de prétraitement, le fil est détecté dans seulement 72% des photos et le fil correspond à la droite la plus longue dans 50% des cas. Cela met en évidence l'importance du prétraitement des images avec les filtres et les opérateurs énoncés dans la partie 2.2. La fiabilité a également été évaluée en faisant varier des paramètres tels que le contraste et l'angle du fil dans l'image. La différence de contraste entre le fil et le cryostat doit être supérieure à 10 niveaux de gris pour que le fil soit détecté correctement. L'angle du fil dans l'image n'a pas d'influence sur la détection du fil.

4.2. Précision de mesure

L'analyse des résidus après la régression linéaire permet d'évaluer la précision de la mesure. La figure 5 présente la répartition des résidus sur les distances entre les points et la ligne calculée.

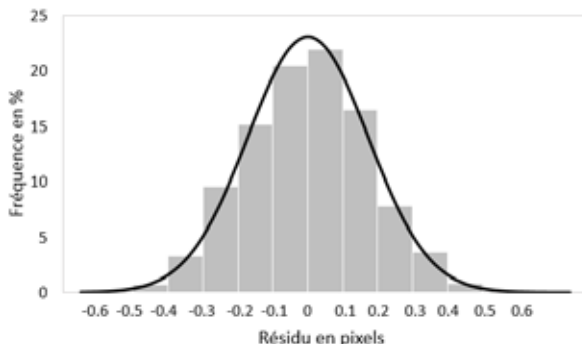


Figure 5. Répartition des résidus sur les distances points-ligne

Dans le cas d'une photo prise dans les conditions standard, après l'élimination des erreurs, l'erreur moyenne quadratique s'élève à 0.17 pixels, soit une précision de 29 μm avec une seule photo. Le fil étant calculé en faisant la moyenne des deux lignes de bord, la précision de mesure de la ligne moyenne s'élève à 0.12 pixels, soit 21 μm . La droite est définie par ses paramètres a et b qui ont respectivement une précision de 10^{-6} et 0.005 pixels.

5. Conclusion et perspectives

L'algorithme développé lors de ce projet de fin d'études permet de déterminer la position approximative d'un fil tendu avec une grande fiabilité. Le bon fil est détecté dans 100% des photos prises dans les conditions standard. Les photos prises dans des conditions défavorables comme un trop faible contraste (inférieur à 10 niveaux de gris) seront à éviter pour l'utilisation future de l'algorithme.

La précision de mesure du fil de l'algorithme développé est sub-pixellaire : la précision du coefficient directeur de la droite moyenne est de l'ordre de 10^{-6} pixels et de 0.005 pixels pour l'ordonnée à l'origine. Le module a été testé sur des photos réelles du LHC, ce qui assure la faisabilité de la procédure. Il sera utilisé dans la suite du projet d'automatisation des mesures de fils tendus. Plus tard, les photos seront prises depuis un train de mesure qui circulerait dans le tunnel du LHC et sur lequel serait fixé un cadre avec des appareils photo. Trois trains seraient nécessaires pour trois zones particulières : un pour les collimateurs et un pour la zone Q1-Q6, où les radiations sont particulièrement élevées, et un pour les arcs. Le projet nécessite encore de nombreuses études avant d'être opérationnel. Bien qu'il reste encore beaucoup de contraintes, notamment liées à la robotique, cette solution permettrait de mesurer les composants de l'accélérateur LHC avec une précision suffisante en diminuant l'exposition du personnel aux radiations.

Références

- He, K., Sun, J. & Tang, X., 2013, Guided Image Filtering, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35(6), pp. 1397-1409.
- Trujillo-Pino, A., Krissian, K., Alemán-Flores, M. & Santana-Cedrès, D., 2013, Accurate subpixel edge location based on partial area effect. *Image and Vision Computing*, vol. 31(1), pp. 72-90.
- Vendeuvre, C., 2016, *Évaluation des mesures de fils tendus par photogrammétrie en vue de l'automatisation des mesures d'écartométrie pour l'accélérateur de particules LHC au CERN*, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, spécialité Topographie, 99p.

Mise en place d'un capteur à faible coût (action camera) pour la photogrammétrie sur un système MLS (Mobile Laser Scanner) pour les contraintes de détection et d'interprétation d'objets ainsi que pour la colorisation de nuages de points

PFE présenté par : **Romain Teodomante**

Société d'accueil : **GEOSAT**

Directeur de PFE : **Cedrik Ferrero**

Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



1. Présentation du projet

La cartographie dynamique est un secteur en plein essor. Ces dernières années, un grand nombre de constructeurs se sont lancés dans la réalisation de systèmes de **cartographie mobile** (MMS : Mobile Mapping System). C'est le cas de l'entreprise italienne SITECO, développeur du système Road-scanner 4, système au cœur de notre étude.

La problématique du projet est simple. Initialement, le système est composé d'un bloc caméra panoramique de résolution 5 Mpx. Pour des contraintes de détection d'objets de petite taille (type bouches à clé, numéros de poteaux caténaires, etc.) ainsi que pour la colorisation de nuages de points, cette résolution n'est pas suffisante. La solution choisie pour résoudre cette problématique est l'utilisation d'une GoPro Hero+ LCD de résolution 8 Mpx.

Cette étude s'est orientée autour de **quatre axes principaux**.

Dans un premier temps, la **calibration interne** de la caméra GoPro, réalisée et vérifiée en deux étapes. D'abord, une calibration interne effectuée à l'aide de différents logiciels afin de comparer les résultats. Ensuite, une vérification de cette calibration avec des cibles géoréférencées pour vérifier l'exactitude de la détermination des paramètres de l'orientation interne.

Dans un deuxième temps, l'objectif a été le **géoréférencement des images**. Cette étape a été réalisée à l'aide d'un mur de calibration et des données de l'INS (Inertial Navigation System). Premièrement, les images de calibration ont été géoréférencées selon un procédé photogrammétrique classique et ont permis de déterminer les six paramètres de l'orientation externe de chaque image. Avec ces paramètres et les paramètres de l'INS à un moment donné, le **bras de levier** entre l'INS et la caméra a pu être calculé. Il se compose de **six paramètres** (trois translations et trois rotations).

Dans un troisième temps, la **synchronisation et l'acquisition** ont été mises en place. C'est une partie qui réside essentiellement sur la programmation. Des interfaces graphiques ont été développées en Python afin de piloter la GoPro à distance et d'obtenir des informations de temps précises. Cela permet de plus de réaliser automatiquement les calculs post-processing.

Pour finir, une étape de **test et d'intégration** des résultats aux process actuels, afin d'observer la précision des résultats en fonction du mode opératoire choisi. Ceci permet d'affiner le process et d'améliorer les résultats.

2. Calibration interne

Cette étape consiste à déterminer les **paramètres de l'orientation interne** (aussi appelés paramètres intrinsèques) d'une caméra par un processus de calibration. Les logiciels **PhotoModeler** et **Agisoft Lens** ont été utilisés. La calibration avec PhotoModeler a été réalisée à l'aide de 65 cibles codées réparties sur un angle de mur. La calibration avec Agisoft Lens ne nécessite qu'un écran d'ordinateur pour être accomplie. Dans les deux cas, 21 clichés ont été pris, répartis judicieusement (angles d'incidence variables, position horizontale et verticale, ...).

Les paramètres de l'orientation interne à déterminer sont la **distance focale** c , les **coordonnées du point principal** : x'_0, y'_0 , les **coefficients de distorsions radiales** : K_1, K_2, K_3 et les coefficients de distorsions tangentielles : P_1, P_2 .

Le modèle mathématique des distorsions est basé sur le modèle de Brown. Le modèle utilise des coefficients polynomiaux pour modéliser les distorsions radiales et tangentielles des lentilles. En voici les formules :

$$\Delta x'_{\text{radiales}} = x' \cdot (A_1 \cdot r'^3 + A_2 \cdot r'^5 + A_3 \cdot r'^7)$$

$$\Delta y'_{\text{radiales}} = y' \cdot (A_1 \cdot r'^3 + A_2 \cdot r'^5 + A_3 \cdot r'^7)$$

$$\Delta x'_{\text{tan}} = B_1 (r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 x' y'$$

$$\Delta y'_{\text{tan}} = B_2 (r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 x' y'$$

Réaliser la calibration avec deux logiciels distincts permet de vérifier la cohérence des résultats obtenus par deux méthodes différentes. Les écarts entre les deux méthodes sont relativement faibles et valident les résultats. Pour la suite des calculs, les résultats obtenus (cf Tableau 1) avec PhotoModeler seront utilisés.

Paramètres		PhotoModeler	Agisoft Lens	Delta
Distance focale (mm)		2.229	2.190	0.039
Taille du capteur (mm)	Largeur	5.100	5.046	0.054
	Hauteur	3.825	3.785	0.040
Point principal (mm)	x'_0	2.530	2.502	0.028
	y'_0	1.894	1.874	0.020
Distorsions radiales	K_1	6.435E-02	5.652E-02	7.826E-03
	K_2	-1.322E-03	1.628E-03	-2.950E-03
	K_3	7.870E-04	4.792E-04	3.078E-04
Distorsions tangentielles	P_1	-7.430E-05	-2.859E-04	2.116E-04
	P_2	8.173E-05	-1.265E-04	2.082E-04

Tableau 1 : Résultats issus de la calibration interne de la caméra GoPro

3. Géoréférencement des images

L'objectif de cette partie est de déterminer par calibration, le **bras de levier** entre les repères de l'INS et de la caméra. Ce bras de levier permettra par la suite de géoréférencer les images à partir des données de l'INS seules. Pour calculer ce bras de levier, des mesures ont été effectuées sur un mur de calibration composé de cibles damier. Un total de **six photos** a été utilisé dans le calcul par les moindres carrés. Ce mur de calibration a permis la détermination des **coordonnées du centre de perspective** de chaque prise de vue ainsi que les **trois angles de rotation** des prises de vue dans le repère général.

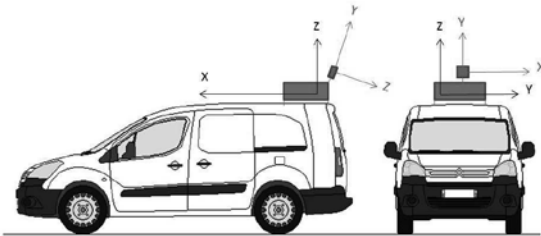


Figure 1 : Représentation des repères sur le MMS

Premièrement, les angles de **roulis (roll)**: ϕ , **tangage (pitch)** : Θ , **lacet (heading)** : ψ issus de l'INS composent la première matrice rotation permettant de passer du repère de la centrale vers le repère terrestre.

$$R_{INS}^t = R_z(\psi) \times R_y(\Theta) \times R_x(\phi)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & 0 & \sin \Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta & 0 & \cos \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \Theta \cos \psi & \sin \phi \sin \Theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \Theta \sin \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \Theta \sin \psi & \sin \phi \sin \Theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \Theta \cos \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \Theta & \sin \phi \cos \Theta & \cos \phi \cos \Theta \end{pmatrix}$$

Ensuite, les données de la caméra sont utilisées. C'est une rotation d'angles **Omega** ω , **Phi** ϕ , **Kappa** κ qui composent la matrice rotation permettant de passer du repère terrestre vers le repère de la caméra.

$$R_t^{cam} = R_x(\kappa) \times R_y(\phi) \times R_z(\omega)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \phi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \phi \cos \kappa + \sin \phi \sin \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \phi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \cos \omega \sin \phi \sin \kappa + \sin \phi \cos \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix}$$

Pour finir, on calcule à l'aide de ces éléments les matrices de translation et de rotation qui permettent d'extraire les six paramètres de notre bras de levier.

$$T_{INS}^{cam} = \begin{pmatrix} X_{cam} - X_{INS} \\ Y_{cam} - Y_{INS} \\ Z_{cam} - Z_{INS} \end{pmatrix}$$

$$T_{INS}^{cam} = R_t^{INS} \times T_{INS}^{cam}$$

$$R_{cam}^{INS} = R_t^{INS} \times R_{cam}^t$$

Paramètres	Résultats	Précisions
ΔX_{INS} (m)	-0.114	0.003
ΔY_{INS} (m)	0.115	0.003
ΔZ_{INS} (m)	0.150	0.007
e_x (°)	70.558	0.020
e_y (°)	0.798	0.024
e_z (°)	89.843	0.024

Tableau 2 : Résultats du calcul du bras de levier entre l'INS et la caméra

4. Synchronisation des données et acquisition

La synchronisation doit permettre d'obtenir les informations de l'INS au moment du déclenchement de la photo avec une très grande précision (de l'ordre de la milliseconde) afin de géoréférencer les images (en position et orientation). Pour ce faire, une interface graphique a été développée en Python qui permet de piloter la GoPro depuis l'ordinateur de bord via le **WiFi**. L'information de temps est obtenue via l'horloge interne de l'ordinateur de bord, et ensuite synchronisée aux informations de l'INS en post-process. Pour les besoins du projet, il est nécessaire d'obtenir des images à une cadence élevée. Pour permettre une répartition suffisamment dense des photos, le fonctionnement en **TimeLapse 0.5s** a donc été préféré.

Un problème difficile à résoudre provient de la nature même de la caméra GoPro, qui est une **caméra commerciale** et non industrielle. Elle n'est physiquement pas fabriquée avec une très grande

précision et ne présente pas d'outil de développement (SDK : System Development Kit). De base, elle ne permet pas d'obtenir un temps d'acquisition d'image précis (de l'ordre de la minute dans les données EXIF). Ce problème est partiellement contourné par l'utilisation du **script python**. Il permet de connaître l'état de la GoPro (Occupé/Libre) et de synchroniser cette information avec l'horloge interne de l'ordinateur de bord dont l'information de temps peut être obtenue en **milliseconde**.

La figure représente les résultats obtenus sur un échantillon test de 150 photos. A partir des coordonnées images et des équations de colinéarité, ainsi que des informations issues de notre calcul, les coordonnées objet sont calculées. Le temps pour chaque photo représente le temps où les erreurs moyennes quadratiques (emq) des coordonnées objet sont minimales par rapport aux coordonnées pointées sur le nuage de point (ce qui représente donc la position la plus juste du système à l'instant t)

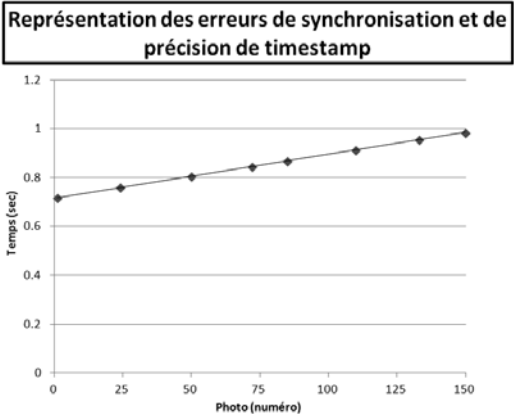


Figure 2 : Représentation des erreurs de synchronisation

On observe donc grâce à l'interpolation d'une courbe de tendance, une fonction de type $y = ax + b$, le coefficient a représente la dérive de l'horloge de la GoPro, et le coefficient b représente le delta de temps entre le temps GPS du MMS et le temps de l'horloge interne de l'ordinateur de bord.

<i>n° photo</i>	<i>Δt (s)</i>	<i>Emq x (m)</i>	<i>Emq y (m)</i>
24	0.759	0.072	0.061
72	0.845	0.117	0.199
133	0.963	0.145	0.197

Tableau 3 : Extrait des précisions obtenues sur la position la plus probable du véhicule

5. Conclusions et perspectives

En conclusion sur ce projet, les « action caméra » de type GoPro offrent des perspectives intéressantes, mais néanmoins limitées. La précision de l'horloge interne et le manque de données temporelles limitent grandement la précision en sortie de process. Pour des contraintes **d'interprétation d'objets**, cette précision est suffisante, mais pour la **colorisation de nuages de points** cette option semble limitée.

Dans l'avenir, il semble intéressant de se pencher sur des « action caméra » équipées de GPS pour une synchronisation de temps plus précise, ou encore des caméras industrielles souvent accompagnées de SDK permettant d'obtenir des informations de temps de déclenchement très précises.

Inventaire et analyse de la situation foncière des usines souterraines des concessions hydroélectriques EDF

PFE présenté par :

Quentin Lanthiez

Société d'accueil :

EDF - DTG, Lyon

Directeur de PFE :

David Bonneville

Correcteur :

Jacques Ledig



EDF est un acteur incontournable du secteur de l'électricité en France et dans le monde. Il est le leader de la production d'électricité en France. Avec la remise en cause de l'hégémonie du nucléaire dans le mix énergétique français (plus de 70 % de la production), les énergies renouvelables ont une importance de plus en plus grande dans la stratégie d'EDF. L'hydroélectricité représente à elle seule la majorité de la production d'énergie renouvelable en France. C'est donc un secteur clé pour EDF.

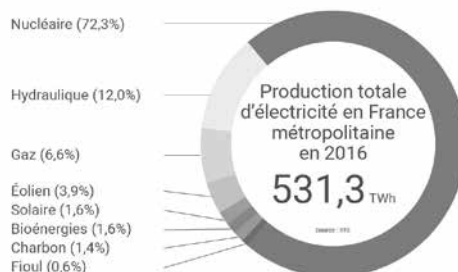


Figure 1 : Répartition des sources de production d'électricité en France en 2016 (www.connaissancesdesenergies.org)

Le secteur de l'électricité en France a connu de profondes transformations au cours de son histoire :

Avant la Seconde Guerre mondiale, le secteur de l'électricité était partagé en une multitude de petits acteurs locaux. Ainsi, deux cents sociétés privées assuraient la production d'électricité, une centaine gérant le transport et plus d'un millier s'occupait de la distribution. Dans un souci de cohérence sur l'ensemble du territoire et d'efficacité, le secteur de l'électricité est nationalisé le 8 avril 1946 et EDF est ainsi créée par regroupement de ces industriels. EDF est alors un EPIC (Établissement Public à caractère Industriel et Commercial) qui a le monopole de la production d'électricité pour les installations d'une puissance supérieure à 8 MW ainsi que du transport et de la distribution d'électricité.

Avant la création d'EDF, la production d'électricité se fait majoritairement par des centrales au charbon. Dans les années 50, EDF, soutenue par le plan Marshall, lance en urgence de grands chantiers afin de faire face à la demande toujours croissante d'électricité. Ainsi, le barrage de Tignes est inauguré en 1953, celui de Serre-Ponçon en 1959 et celui de Roselend en 1960. La centrale nucléaire de Chinon, la première de France, sort de terre en 1963. Dans le même temps, les centrales au charbon sont peu à peu remplacées par des centrales au fioul. En 1973, la crise pétrolière pousse la France à se tourner vers le nucléaire. Dans les années 70, treize nouvelles centrales nucléaires sont mises en chantier. En 1983, EDF inaugure sa première centrale solaire à Targassonne dans les Pyrénées-Orientales. Dans les années 80 et 90, EDF commence à se développer à l'étranger.

À la fin des années 90 et au début des années 2000, des directives européennes libéralisent et ouvrent à la concurrence le secteur de l'électricité afin de laisser la possibilité aux consommateurs de choisir librement leur fournisseur. Ainsi, EDF doit séparer son activité de transporteur d'électricité

du reste de ses activités. RTE, filiale d'EDF, est donc créée en 2000. EDF devient ensuite une SA en 2004 et entre en bourse en 2005. Néanmoins, le capital de l'entreprise est encore contrôlé à plus de 80 % par l'État. Toujours dans le cadre de ce mouvement de libéralisation du secteur de l'électricité, EDF crée en 2008 sa filiale ERDF (renommée Enedis en 2016), chargée de la distribution d'électricité. L'année 2004 représente donc un tournant dans l'histoire d'EDF qui pourrait faire face à une nouvelle concurrence.

Ainsi, on constate que l'évolution du secteur de l'électricité, et d'EDF en particulier, se divise en trois périodes historiques principales : avant 1946, de 1946 à 2004 et après 2004. Les évolutions législatives intervenues durant ces périodes ont également impacté le secteur de l'hydroélectricité. Ainsi, lors de sa création en 1946, EDF a récupéré l'exploitation de la plupart des aménagements hydroélectriques français, construits et exploités à l'origine par de nombreux producteurs indépendants. Cette variété des producteurs a engendré une variété des situations y compris au niveau de la gestion du foncier. Avec sa privatisation en 2004, EDF a perdu son droit de préférence accordé au concessionnaire sortant lors du renouvellement des concessions hydroélectriques. Ainsi, EDF n'est plus assurée de conserver l'exploitation de ses aménagements hydroélectriques concédés. C'est donc à partir de cette date que la gestion du foncier des concessions hydroélectriques est devenue un enjeu encore plus important pour EDF.

L'exploitation des aménagements hydroélectriques peut se faire suivant deux régimes juridiques distincts. Le régime de l'autorisation et le régime de la concession. Les aménagements hydroélectriques de faible puissance (inférieure à 4,5 MW) font l'objet d'une autorisation délivrée par l'État pour une durée maximale de 75 ans. Cette autorisation est renouvelée de gré à gré sans mise en concurrence de l'exploitant qui est propriétaire de son aménagement. Les aménagements de plus forte puissance (supérieure strictement à 4,5 MW) font l'objet d'une concession accordée par l'État pour une durée maximale de 75 ans et sont encadrés par un cahier des charges de concession. Contrairement à l'autorisation, le concessionnaire sortant peut théoriquement être mis en concurrence lors du renouvellement d'une concession (depuis 2004).

Le cahier des charges de concession est un contrat passé entre le concessionnaire et l'État. Il existe trois modèles types de cahier des charges approuvés respectivement en 1920, 1999 et 2016. Afin de conserver l'exploitation de ses concessions, il est important pour EDF de respecter toutes ses obligations inscrites au cahier des charges. Parmi ses obligations, le concessionnaire a une obligation de maîtrise foncière sur les terrains d'emprise de la concession. Concrètement, il doit posséder des droits réels d'occupation sur les parcelles d'emprise des dépendances immobilières de la concession. Ces droits d'occupation peuvent être des titres de propriété ou des servitudes. À la lecture des cahiers des charges de 1920 et de 1999 (qui régissent actuellement l'intégralité des concessions hydroélectriques exploitées par EDF), on constate que cette obligation de maîtrise foncière est plus contraignante au niveau de l'usine de production et de ses accès que pour le reste des ouvrages de l'aménagement. Ainsi, le concessionnaire est tenu d'acquérir la propriété des terrains impactés par l'usine et ses accès. Cela s'applique que l'usine soit souterraine ou non. Le cahier des charges type de 2016 est moins précis sur cette question de la maîtrise foncière. Il stipule simplement que le concessionnaire doit acquérir des droits réels sur des terrains d'emprise de la concession sans plus de précision pour les terrains d'emprise de l'usine. Ainsi, le concessionnaire pourrait être plus libre pour la maîtrise foncière de ses futures concessions. Néanmoins, ses choix devront toujours être validés par la DREAL.

Le tableau 1 ci-dessous précise ce que les différents cahiers des charges indiquent concernant l'obligation de maîtrise foncière au niveau de l'usine :

Cahier des charges 1920	Article 3, § 2 : « Il [le concessionnaire] devra acquérir tous les terrains sur lesquels seront établies l'usine et ses dépendances immobilières »
Cahier des charges 1999	Article 3, titre 1.2 : « le terrain d'assiette de l'usine et sa voie d'accès, dont son emprise, si cette dernière ne constitue pas une voie publique, devront obligatoirement être acquis par le concessionnaire au nom de l'État, s'ils ne font pas déjà partie du domaine public de l'État »
Cahier des charges 2016	Article 7, § 3 : « le concessionnaire procède à l'acquisition des droits réels nécessaires à l'aménagement de [...] et à la production hydraulique »

Tableau 1 : Obligation de maîtrise foncière du concessionnaire au niveau de l'usine

L'usine de production d'électricité est le centre d'un aménagement hydroélectrique. C'est dans l'usine que sont installés les groupes turbines qui transforment la force motrice de l'eau en électricité. C'est également dans l'usine que travaillent majoritairement les agents EDF chargés de l'exploitation de l'aménagement. Ainsi, celle-ci concentre de nombreux enjeux. C'est probablement pour cette raison que le législateur a imposé une obligation de maîtrise foncière plus forte au niveau de l'usine.

Les cahiers des charges de concession indiquent également que le concessionnaire a une obligation de bornage sur les terrains du domaine concédé. Il doit ainsi effectuer un bornage en début et en fin de concession. C'est particulièrement lors de ce bornage de fin de concession que la situation foncière des terrains d'emprise des ouvrages, et de l'usine en particulier, est analysée et au besoin régularisée.

Au sein d'EDF, la procédure de bornage est assurée par plusieurs acteurs. Le pôle Foncier - Patrimoine cartographique du service ingénierie topographie de la DTG (Division Technique Générale) pilote ce qui relève de la compétence du géomètre-expert. Des cabinets de géomètre-expert prestataires, encadrés par la DTG, réalisent la procédure amiable du bornage. Le CCPFA (Centre de Compétences Patrimoine Fiscalité et Assurances) gère les questions juridiques permettant de garantir la maîtrise foncière (acquisition des parcelles, établissement des servitudes et des conventions...). Les UP (Unités de Production) qui exploitent les aménagements, interviennent en temps que maître d'ouvrage et prennent des décisions selon leur politique foncière et suivant les préconisations de la DTG et des pôles PFA.

Lors de l'établissement des plans de projet de bornages d'une concession, le service topographie de la DTG doit en premier lieu positionner les ouvrages de la concession par rapport au parcellaire cadastral. Cette opération est relativement facile pour ceux en surface. En revanche, elle est plus complexe pour les installations en tréfonds qui, par définition, ne sont pas visibles depuis la surface. Ainsi, il y a des enjeux supplémentaires de géoréférencement lorsque l'usine est souterraine par rapport à une usine en surface. Pour ces usines souterraines, les services chargés du bornage se doivent donc d'être particulièrement vigilants lors de la détermination des parcelles impactées.

Ces enjeux supplémentaires de géoréférencement ne sont présents que lorsque les usines sont souterraines au sens génie civil du terme : des usines creusées en caverne dans le terrain naturel. Ainsi, cette étude ne prend pas en compte les usines incluses dans les barrages ou en sous-sol de bâtiments ou d'ouvrages visibles depuis la surface. Une usine souterraine contient d'une à quatre cavernes comportant entre autres les groupes de production, les transformateurs, les vannes amont et les batardeaux aval. La figure 2 ci-dessous présente l'organisation type d'une usine souterraine.

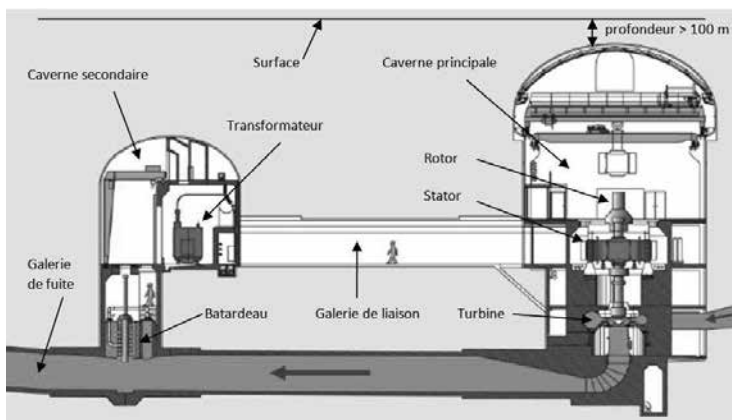


Figure 2 : Usine de Romanche-Gavet (Dossier de presse EDF - 05/2013)

Durant cette étude, nous nous sommes demandé si le fait que l'usine soit souterraine amène des enjeux supplémentaires en termes de sécurité des ouvrages : pourrait-il exister un risque de désordre en surface nécessitant la prise en compte d'une bande de terrain supplémentaire autour de l'usine lors des opérations de bornage ? Après étude de la question et discussion avec un expert géotechnique du CIH (Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF), il s'est avéré que si l'on respecte les normes de construction de tels ouvrages souterrains, il n'y avait pratiquement aucun risque de désordre sur les parcelles voisines de l'usine souterraine. De plus, on peut considérer que cette dernière n'a plus d'influence sur la surface à une distance environ égale à deux fois sa hauteur. Il n'est donc pas nécessaire de prévoir une marge de sécurité autour de l'usine lors de la détermination des parcelles impactées par celle-ci.

EDF possède une base de données (Dorémhy) référencant les 433 aménagements hydroélectriques qu'elle exploite. Cette base de données fournit un certain nombre d'informations sur les aménagements hydroélectriques. En revanche, elle n'indique pas si une usine est souterraine ou non. Ainsi, un des objectifs de cette étude était de référencer les usines souterraines exploitées par EDF sous le régime de concession et donc sur lesquelles les services chargés du bornage devront être particulièrement attentifs. J'ai donc établi et fiabilisé une liste de trente-trois usines souterraines en recherchant des informations et en contactant différentes personnes (CCPFA, exploitants...).

À partir de cette liste de trente-trois usines, j'ai cherché à déterminer dans quelle mesure EDF possède la maîtrise foncière demandée par le cahier des charges sur l'emprise de l'usine souterraine et de ses accès. Pour cela, la première étape a été la détermination des parcelles impactées par chacune des usines souterraines et de ses accès. J'ai ainsi effectué un travail de recherche de plans et de documents d'archives ainsi que d'informations diverses permettant de positionner les usines souterraines par rapport au cadastre. Cela m'a permis d'établir une liste des parcelles impactées par chaque usine.

Une fois ces parcelles déterminées, j'ai recherché quel droit d'occupation possède EDF sur chacune de ces parcelles. Les différents droits d'occupation sont : propriété de l'ensemble de la parcelle, propriété des tréfonds (via une division en volume), servitude ou encore convention de superposition d'affectation. J'ai fait cette analyse détaillée pour une sélection de sept usines. Pour les autres usines souterraines, je me suis contenté de déterminer si les parcelles impactées par l'usine souterraine et ses accès sont bien incluses dans le domaine concédé et donc, si EDF possède bien des titres de propriété sur ces parcelles.

La détermination des parcelles impactées par l'usine souterraine et ses accès a soulevé un certain nombre de problématiques liées à la précision du géoréférencement de ces ouvrages. Je me suis notamment intéressé à la précision des plans d'archives servant à la détermination de l'emprise de l'usine souterraine, à la précision du cadastre ou encore à la précision du calage de ces plans d'archives sur le cadastre. Pour une sélection de sept usines, j'ai cherché à déterminer numériquement la valeur de la précision de ces différents éléments. En fonction de cela, j'ai pu déterminer si les parcelles impactées par l'usine souterraine et ses accès pouvaient être identifiées sans ambiguïté ou s'il fallait effectuer des mesures complémentaires sur le terrain. J'ai ensuite tenté de généraliser ces situations en déterminant les actions à mener pour géoréférencer avec une précision suffisante les usines souterraines et leurs accès en fonction des données disponibles (plans d'archives, plan cadastral...) et de la configuration de la zone d'étude (morcellement du cadastre, distance entre l'usine et les limites cadastrales...).

Le GNSS-RTK pour l'optimisation des relevés photogrammétriques

PFE présenté par : **Simon VAUCLARE**
Société d'accueil : **SITES**
Directeur de PFE : **M. Pierre CARREAUD**
Correcteur : **M. Gilbert FERHAT**



1. Présentation de l'entreprise SITES et des objectifs du projet

La société SITES (Société d'Instrumentation, de Traitements et d'Essais sur Sites), dans le cadre de ses activités d'inspection d'ouvrages tels que des bâtiments, des barrages ou des aéro-réfrigérants, souhaite compléter ses compétences dans le domaine de l'inspection par photogrammétrie en réalisant des couvertures photographiques par drone.

Dans ce contexte, l'avantage du drone est de pouvoir photographier avec une très bonne résolution les zones inaccessibles des parements à inspecter. Suite à ces campagnes de prises de vue, les photos sont traitées pour obtenir une ortho-image. L'inspection sera alors effectuée directement sur celle-ci. Pour obtenir des résultats satisfaisants lors du traitement des images, la présence de points connus en coordonnées sur les ouvrages photographiés est actuellement obligatoire. Ces points ont pour objectifs de pouvoir effectuer une mise à l'échelle et un géo-référencement du modèle en trois dimensions de l'ouvrage. Cela implique l'intervention d'une équipe de géomètres-topographes sur le terrain, ce qui fait augmenter les coûts. Dans la majorité des cas, ces points de référence ne doivent pas être rattachés aux différents systèmes nationaux de coordonnées. Les résultats sont fournis dans un repère local propre à l'ouvrage.

Ce projet a pour but de trouver un moyen de ne plus avoir à utiliser des points de référence sur ce type de chantier et par conséquent de supprimer l'intervention des géomètres sur le terrain. Pour cela, il a été choisi de mettre en place un système de récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System) en mode RTK (Real Time Kinematic) sur le drone. Ce récepteur GNSS RTK, associé à une station de base au sol, doit permettre un positionnement relatif au niveau centimétrique entre le récepteur mobile (sur le drone) et la base (au sol) en temps réel. Cette précision de positionnement du drone a alors des effets sur la manière de piloter l'appareil (le drone est bien plus stable). Cela doit aussi permettre de connaître précisément la position du drone, ainsi que les coordonnées du centre de la caméra à chaque instant. Il est aussi possible de récupérer les angles de rotation (ω , ϕ , κ) du drone et de la caméra à un instant « t ». Les positions et rotations des caméras lors des prises de photos peuvent ensuite être utilisées dans le calcul photogrammétrique. Cela doit permettre le géo-référencement direct du modèle sans avoir à utiliser des points de référence. Cette méthode doit fournir des résultats avec une précision de l'ordre du centimètre. Le géo-référencement direct en opposition au géo-référencement indirect n'utilise pas de points au sol (*Ground Control Points GCP*). Ces GCP sont des points connus en coordonnées et positionnés au sol ou sur l'objet photographié. Leurs coordonnées sont ensuite indiquées dans le logiciel de photogrammétrie pour le géo-référencement des images. Le géo-référencement direct quant à lui n'utilise que la position et l'orientation du centre de la caméra dans les calculs photogrammétriques.



Figure 1 : Drone 850 V2 en vol avec son pivot RTK

L'objectif est alors de corriger les données issues du drone et du récepteur GNSS (coordonnées et orientation) de tous les biais de mesure, afin de connaître le plus précisément possible la position et l'orientation de chaque caméra. Ainsi, un géo-référencement direct des images et une mise à l'échelle sans point de référence peuvent être effectués (sans mesure supplémentaire).

2. Matériel et données à disposition du projet

La société SITES possède trois drones : un DJI Phantom 4, un Flyability ELIOS et un Innovadrone Dronestar 850 V2 (cf. figure 1). C'est sur ce dernier que le système de GPS RTK a été adapté. Il s'agit d'un hexacopteur d'une capacité de charge utile de 3.5 kg. Ce drone dispose d'une nacelle gyro-stabilisée sur deux axes et d'un appareil photo numérique. La nacelle permet à l'appareil photo de conserver une orientation définie préalablement malgré les mouvements du drone. Le drone est aussi équipé de capteurs frontaux et verticaux lui permettant de conserver une distance fixe avec un ouvrage ou avec le sol ainsi que d'un déclencheur altimétrique. Cela permet d'obtenir une distance caméra-objet constante et un recouvrement régulier entre les images.

Le récepteur GNSS-RTK est composé d'un ensemble de deux récepteurs bi-fréquences, une base et un mobile. La base est montée sur un trépied topographique alors que le mobile est monté sur le capot supérieur du drone. Ces récepteurs GNSS-RTK permettent un positionnement en temps réel. Pour cela, une station de base (dont les coordonnées sont fixées) effectue des mesures de phase et de pseudo-distance pour les transmettre par radio UHF au récepteur mobile. Le récepteur mobile utilise alors ces informations pour corriger sa position. Cette méthode permet un positionnement relatif centimétrique en temps réel. La base peut être placée sur un point connu en coordonnées ou bien celle-ci peut calculer automatiquement sa position. Les récepteurs permettent d'enregistrer les données GPS, GLONASS et BEIDOU. Les informations issues de ces récepteurs sont enregistrées sur une carte SD au format NMEA ou RINEX. Le tout étant connecté en Wi-Fi à un ordinateur équipé d'un logiciel de contrôle. Ce dernier donne accès aux différents réglages des récepteurs, ainsi qu'au suivi de leur état lors de leurs utilisations. Les fichiers RINEX fournis par la base doivent ensuite permettre de recalculer par post-traitement la position de la station.

Pour ce projet, divers logiciels ont été nécessaires. En parallèle du logiciel GPS, le logiciel Mission Planner est très utile. Ce dernier permet de connaître la position, l'altitude et d'autres paramètres du drone comme le niveau de batterie en temps réel lors des vols. De plus, il permet d'analyser les « log » de vol du drone afin de récupérer les données les plus utiles et de voir leur évolution au cours du temps. Les fichiers « log » sont des fichiers horodatés contenant des enregistrements permettant d'analyser un processus (ici un vol de drone). Ces fichiers au format texte sont associés à chacun des vols effectués avec un drone. Il s'agit d'une récapitulation de l'ensemble des opérations effectuées par le drone lors du vol : c'est l'équivalent des boîtes noires sur un avion. Les « logs » contiennent un grand nombre de lignes, chacune d'entre elles est relative à une information ou à un capteur particulier du vol. Chaque ligne est horodatée et contient l'ensemble des informations associées (angle, position, vitesse, état...). Elles peuvent correspondre aux données de la centrale inertielle, du GPS ou encore du déclenchement de la caméra. J'ai donc écrit un algorithme qui, à partir d'un fichier « log », crée un second fichier ne contenant que les lignes correspondantes au déclenchement d'une prise de photo. Chaque ligne de ce nouveau fichier contient l'instant de prise de vue en temps GPS, la semaine GPS, la latitude et la longitude du drone, son altitude, la hauteur ellipsoïdale, ainsi que les trois angles de rotation (ω , ϕ , κ) du drone à cet instant. Cette extraction des données relatives aux caméras est effectuée pour chaque vol. Les logiciels comme PhotoScan et Photomodeler ont aussi été utilisés pour le traitement photogrammétrique et le logiciel Python a permis d'écrire des scripts pour l'automatisation du projet.

3. Correction des différents biais de mesure

Une fois les principales données en ma possession, il a fallu déterminer les différentes erreurs et biais qui influençaient les mesures afin de pouvoir augmenter la précision de position et de rotation de chaque prise de vue. Les deux principales difficultés sont la synchronisation des temps entre les différents outils et la détermination du bras de levier entre l'antenne GNSS et la caméra, afin d'effectuer un changement de système.

En ce qui concerne l'erreur de synchronisation des temps, il est apparu qu'un décalage de temps était présent entre le moment où l'ordre de prendre une photo est donné et l'instant exact où la photo est prise. La prise de photos est divisée en trois étapes, comme il est visible dans la figure 2 :

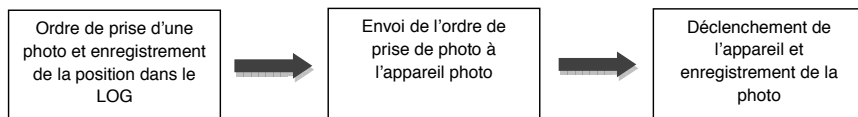


Figure 2 : Schéma de principe de la prise d'une photo

Suite à une série de tests, il apparaît, entre la première et la dernière étape du processus un décalage entre l'ordre de prise d'une photo et son déclenchement de 15 à 300 millisecondes. L'erreur de synchronisation n'est pas constante et varie selon le réglage de l'appareil photo (le passage de mise au point manuelle à l'autofocus augmente fortement l'erreur). De plus, l'erreur en distance induite par l'erreur de synchronisation dépend de la vitesse de vol du drone. À une vitesse de vol de 1 mètre par seconde, cela implique respectivement une erreur de 1.5 cm et 30 cm ce qui est considérable. De plus, il est apparu que le nombre de lignes contenues dans le fichier « log » ne correspondait pas forcément au nombre de photos enregistrées par l'appareil photo lors des vols. Si deux ordres de prise de photo sont donnés dans un court intervalle de temps, le drone crée deux lignes dans le fichier « log » mais l'appareil photo n'enregistre qu'une seule et unique photo. Cela est une source d'erreurs supplémentaire lors de l'attribution d'une ligne (soit une coordonnée) à une photo. La prise en compte des horodatages des lignes et des photos étaient alors indispensables pour ne pas affecter une ligne « fictive » à une photo réelle. Pour résoudre ces deux erreurs, un câble de feedback connecté à l'appareil photo et au contrôleur de vol, renvoi au drone l'information de la prise d'une photo (à l'instant exact du déclenchement). Suite à un changement de configuration du drone, une ligne supplémentaire est enregistrée au moment où cette information est reçue. Cette ligne n'est écrite dans le fichier « log » que lorsqu'une photo est réellement enregistrée. Le nombre total de lignes correspond alors parfaitement au nombre de photos prises par l'appareil lors du vol.

En ce qui concerne le bras de levier, le principe est de calculer la distance entre le centre théorique de l'antenne GNSS-RTK (visible figure 3) du drone et le centre optique de la caméra. Jusqu'à présent, l'appareil photo était fixé sur la nacelle du drone à l'aide d'une simple vis. Entre deux vols, l'appareil photo étant retiré de la nacelle, sa position n'est pas nécessairement la même. En effet, la nacelle étant équipée d'un réglage de positionnement (afin d'adapter différents modèles d'appareil photo et de modifier son l'équilibrage), l'appareil photo peut se retrouver décalé par rapport au vol précédent. Ce problème affecte donc la valeur du bras de levier. Un système d'attache rapide a donc été placé entre la nacelle et l'appareil photo. Il permet un montage- démontage plus facile, mais aussi de maintenir une position stable de l'appareil photo au cours du temps. Le système d'attache rapide devait répondre à certains critères, comme la possibilité d'ouvrir la trappe de changement de la batterie sans devoir dévisser, d'avoir une certaine robustesse mais surtout d'avoir un poids le plus faible possible.



Figure 3 : Récepteur GNSS-RTK mobile (sur le drone) en haut et récepteur GNSS-RTK de base en bas

Pour le calcul du bras de levier, un banc de calibration a été mis en place. Il a permis de déterminer la valeur du bras de levier mais également de calibrer les appareils photo. Des cibles ont été placées sur un mur et mesurées à l'aide d'un tachéomètre. Elles sont donc connues en coordonnées dans un repère local propre au banc de calibration. Pour commencer, une série de photos a été faite afin de calibrer l'appareil photo utilisé sur le drone. Par la suite, avec cet appareil monté sur le drone, une photo des cibles a été effectuée. En parallèle, le centre de l'antenne RTK positionné sur le drone a été mesuré à l'aide d'un tachéomètre. Cette antenne est alors connue dans le système de coordonnées du banc de calibration. Les cibles étant codées, elles sont détectées automatiquement par le logiciel PhotoModeler et leurs coordonnées peuvent alors leur être attribuées facilement. A l'aide de la photo effectuée, du fichier de calibration de la caméra et des coordonnées des cibles, la position du centre de la caméra peut ainsi être déterminée par calcul photogrammétrique. Le bras de levier entre le centre de l'antenne et le centre de la caméra est alors assimilé à une simple différence de coordonnées selon chaque axe du repère défini pour le banc de calibration (Δx , Δy et Δz).

Pour ce qui est de l'orientation angulaire de la caméra, elle est issue des données de la centrale inertielle avec une précision de quelques degrés. L'orientation du drone a un effet direct sur la valeur du bras de levier, il est donc important d'en tenir compte. Ces données d'orientation correspondent au roulis, au tangage et au lacet du drone. Elles doivent, par conséquent, subir une modification afin d'être ramenées à l'orientation du système de coordonnées de la caméra. Il est donc nécessaire d'effectuer des changements de systèmes de coordonnées pour passer successivement de la position et de l'orientation du drone à celles de la caméra. Un premier changement de système aura pour objectif de passer du système du drone à celui de la nacelle et un second effectuera le passage du système de la nacelle au système de coordonnées de la caméra. Le passage d'un système de coordonnées à l'autre est effectué à l'aide d'une matrice de rotation translation appelée quaternions.

Pour déterminer les erreurs de position des centres des caméras, les coordonnées des centres issus des mesures GNSS sont comparées à la position calculée par photogrammétrie avec la méthode du géo-référencement indirect. Avant toute correction des données issues du drone, un comparatif de ces centres a été effectué. Les résultats donnent des écarts entre les deux centres d'une caméra allant de 10 centimètres à plus d'un mètre et avec une moyenne de 50 centimètres. Ces écarts sont compréhensibles du fait que les coordonnées n'avaient pas encore subi de correction, comme le bras de levier. De plus, l'erreur de synchronisation (qui n'avait pas été corrigée à ce stade du projet) implique des erreurs différentes suivant le sens des vols. Les erreurs seront de sens opposé entre les bandes de photos prises en montant et en descendant. Cela peut expliquer les forts écarts obtenus sur certains des centres des caméras (un vol dont l'altitude diminue sera affecté d'une erreur supérieure à un vol dont l'altitude augmente). Au final, les résultats attendus suite à la correction des différents biais de mesure sur la position des centres de caméras sont des erreurs inférieures à dix centimètres en positionnement et de l'ordre de quelques degrés en orientation.

4. Conclusion

La mise en place d'un système de positionnement en temps réel par GNSS-RTK est une amélioration considérable pour les travaux actuellement effectués par drone dans la société SITES. Avec un positionnement relatif centimétrique du drone par rapport à une base au sol et avec la correction des erreurs de synchronisation et de bras de levier, un géo-référencement direct de bonne qualité des images est possible.

Ce projet très enrichissant se déroule jusqu'à présent de façon satisfaisante. Il m'a permis en plus des connaissances acquises, de travailler sur de grands ouvrages tel que le barrage de Maréges, l'usine marémotrice de la Rance ou encore sur un téléphérique au pic de Bure où des campagnes de prise de vues ont été effectuées.

L'installation du GPS-RTK est donc un élément majeur dans le développement du drone dans la société SITES, dont l'objectif est d'ouvrir les portes à de nouveaux chantiers effectués par drone. Suite à ce projet, d'autres outils pourrions encore être mis en place afin d'améliorer la qualité de ces travaux.

Développement d'un processus de traitement de données « Mobile Mapping » pour la production d'un livrable type PCRS (Plan Corps de Rue Simplifié)

PFE présenté par :

Marine FORRLER

Société d'accueil :

FUTURMAP

Directeur de PFE :

M. Romain LEMETTAIS

Correcteurs :

M. Mathieu KOEHL, Mme. Tania LANDES



1. Contexte et objectifs de l'étude

FUTURMAP est une société spécialisée dans le traitement de données géographiques. Elle comporte un département réalisant des plans corps de rue, à partir de données acquises avec des systèmes de cartographie mobile. Avec cette activité, la société se positionne dans le rôle de producteur de données cartographiques au sens de la norme Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS).

L'objet de cette étude est d'appréhender la norme PCRS et son contenu pour s'intéresser ensuite à la production du fond de plan à partir de données « Mobile Mapping ». L'enjeu du Projet de Fin d'Etudes (PFE) est de trouver des solutions afin d'augmenter les capacités de production de la société. En effet, une grande quantité de données est acquise en peu de temps. Cependant la production de plans 2D et 3D ne présentent pas la même évolution. Mon travail s'est donc articulé autour de quatre points : la compréhension de la norme pour définir le livrable, l'analyse des processus de production actuels, la recherche et la mise en place de solutions nouvelles et automatiques pour augmenter les rendements.

2. La norme Plan Corps de Rue Simplifié (PCRS)

Avec l'entrée en application du décret DT-DICT¹ acté en 2012, les collectivités ont une obligation d'assurer une gestion rigoureuse de la cartographie des réseaux implantés sur leur territoire. La norme PCRS vient compléter le volet cartographique de cette réforme de 2012. Elle s'impose comme le format de référence pour l'échange d'informations dans le cadre des procédures DT-DICT, et s'applique sur l'ensemble du territoire français.

Le PCRS est défini comme étant : « le socle commun topographique minimal de base décrivant à très grande échelle les limites apparentes de la voirie. » [Mitanchey, 2015]². Le référentiel PCRS n'aborde pas de logique « métier », qui est du ressort des gestionnaires de réseaux. Ainsi le PCRS est un plan décrivant la voirie de manière simplifiée et précise (classe A du décret de 2003, incertitude maximale fixée à 40 cm). Ce plan est géoréférencé dans les systèmes légaux³. Néanmoins, la composante altimétrique n'est pas exigée par la norme (*mais elle est recommandée*).

Le géo-standard PCRS est décomposé en vingt-huit classes (dans la version 1) qui s'articulent autour de sept thématiques : Topographie, Bâti, Voirie, Ferroviaire, Clôture, Végétal et Ouvrage d'art. Bien que le fond de plan n'ait aucune vocation métier, les affleurements sont reconnus comme des objets échangés dans un PCRS. Ceci permet l'échange de la localisation précise des objets de réseaux visibles à la surface. La norme définit le format GML pour l'échange de données entre les différents acteurs. Ce choix a pour but de faciliter le passage du monde du DAO au monde du SIG.

¹ DT-DICT (Déclaration de projet de Travaux et Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux) : concerne les travaux à proximité des canalisations et réseaux enterrés.

² [Mitanchey, 2015] R. Mitanchey, 2015. Spécifications CNIG du thème Plan du Corps de Rue Simplifié version 1.0. CNIG, Pages 1-67 (Seule version validée au 21 juin 2017)

³ Systèmes de référence géographique rendus obligatoires par le décret 2000-1276 du 26 décembre 2000

Cependant la norme évolue vers une version 2. Cette dernière reconnaît deux types de données : données vectorielles et données raster (orthophotoplans). La norme faisant l'objet de changements réguliers, la société a préféré orienter l'étude sur la procédure de dessin. La suite du projet s'est appuyée sur la norme Enedis – GRDF avec le Fond de Plan InterOpérable (FDPIO), compatible avec la norme PCRS. Néanmoins, une veille sur l'évolution de la norme sera effectuée par la société afin d'adapter ces livrables.

3. Analyse de la procédure de dessin

FUTURMAP travaille à partir de données acquises par des systèmes de cartographie mobile. Pour le type de projets touché par l'étude, nous avons des nuages de points préalablement recalés, des photos et leur position, ainsi que d'autres documents liés au projet (références externes, emprise, charte graphique, ...).

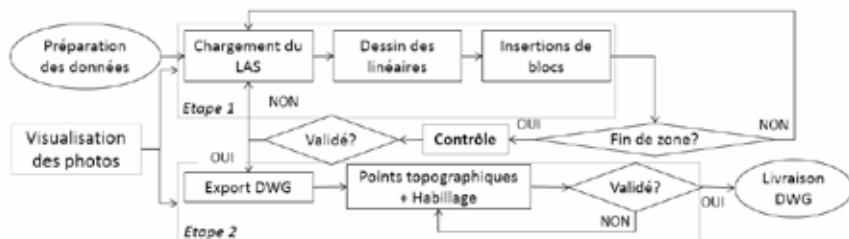


Figure 1 : Procédure de dessin de plans corps de rue

La Figure 1 présente la procédure de production de plans corps de rue de l'entreprise. Le dessin s'effectue en appuis sur le nuage de points. Les photos sont défilées le long de la trajectoire, et servent à interpréter le nuage de points et effectuer un contrôle. Ensuite, les contrôleurs qualité vérifient la cohérence du dessin (oublis, mauvaises interprétations et erreurs). Après correction du dessin, le dessinateur passe à la finalisation du plan.

Plusieurs facteurs viennent néanmoins perturber la production. Ces problèmes sont à la fois liés à la formation des dessinateurs, l'organisation des projets, la qualité des données fournies et à la procédure de dessin en place. Cette étude s'est concentrée sur ces deux derniers facteurs.

4. L'exploitation des orthoimages

Une première solution envisagée a été de travailler sur la correction des décalages entre les nuages de points. Ce choix fait écho au projet de recherche technologique, mené en amont du projet de fin d'études. Le développement d'une routine permettant une consolidation des différents nuages de points devait permettre une détection automatique des éléments sur un nuage de points consolidé. Malheureusement, la consolidation consomme du temps machine non négligeable dans le processus de traitement des données, pour un résultat encore bruité. Les priorités fixées ont orienté la suite de l'étude vers la recherche d'autres solutions.

Problèmes techniques	Solutions
Taille moyenne des nuages de 20 millions de points : 25 m linéaire en moyenne	Chargement de plusieurs orthoimages en même temps : 5 orthoimages pouvant recouvrir 250 m linéaires
Multiplication des coupes et des zooms sur le nuage.	Orthoimages permettant d'anticiper le plan.
Données mal préparées : certaines zones ne sont pas classifiées.	Amélioration de la macro de classification pour la détection du sol.
Allers-retours trop nombreux entre les logiciels. Compatibilité entre les logiciels : détériorations de blocs, pertes d'éléments.	Utiliser le même logiciel pour le dessin et la finalisation du plan.
Certains éléments difficilement visibles dans les nuages préparés.	Optimiser l'affichage et l'utilisation de l'intensité.

Tableau 1 : Problèmes techniques rencontrés en production et solutions proposées

Rapidement, l'étude s'est concentrée sur l'utilisation des orthoimages. Le Tableau 1 présente les problèmes rencontrés dans la procédure de dessin actuelle et les solutions apportées par les orthoimages. Le travail dans le nuage de points est limité par les capacités des logiciels. Les données sont donc découpées en bloc, et chacun couvre en moyenne 25 m linéaire. Ceci engendre de nombreux chargements lors d'une journée de production. Avec les orthoimages, le dessinateur a une vision plus globale de son plan.

Le travail autour des orthoimages s'est focalisé sur l'optimisation de l'information d'intensité. Le passage par une grille d'intensité permet ensuite d'utiliser les outils de traitement de MNT pour mettre en valeur les sauts d'intensité. Le but est de permettre une meilleure visualisation des plaques de réseaux, souvent oubliées lors de la production.

Par la suite, la vectorisation de raster s'envisage pour passer à l'automatisation du dessin. Deux possibilités se dessinent. La première consiste à classifier le nuage et isoler les éléments souhaités. Une orthoimage est ensuite créée à partir de ces éléments isolés. Après l'application de traitement d'image, un outil de vectorisation automatique permet de passer de l'image à des vecteurs. L'autre possibilité consiste à utiliser des outils de traitement d'image et de détection de formes sur les orthoimages obtenues à partir d'une grille d'intensité. Ces aspects feront l'objet d'une prochaine étude.

5. Mise en place d'une nouvelle procédure pour des plans 2D

L'utilisation d'orthoimages pour le dessin a d'abord été testée sur la production de plans 2D, avec des livrables types FDIPO. Le dessin s'effectue avec le logiciel de DAO où la palette d'outils du logiciel gère aussi bien les linéaires que les blocs. Des commandes ont été développées pour faciliter la gestion des orthoimages et des nuages de points. L'utilisation de ce logiciel permet également de lire les photos dans le fichier de dessin (outil développé en interne). Il est ainsi plus rapide de se repérer dans les photos. Ces différents développements internes ont été intégrés à un ruban. Ce dernier rend l'interface de dessin et l'accès aux outils plus ergonomiques.

Les données sont préparées selon trois étapes : classification des nuages de points, création des orthoimages et indexation des nuages de points. Le dessin s'effectue sur les orthoimages et le défilement des photos en parallèle. A la fin de la procédure de dessin, les nuages de points sont utilisés pour placer les éléments verticaux dont les emprises ne peuvent pas être repérées sur les orthoimages : coffrets encastrés, entrées de bâtiments.

Au début de l'étude, le rendement de production de plans 2D est de 400 m/j. Mon rendement est de 450 m/j avec cette méthode de digitalisation dans le nuage. En utilisant les orthoimages, j'ai atteint un rendement de 1000 m/j. Ces résultats sont repris dans le Tableau 2. Le rendement a ainsi été doublé en changeant de support de production.

Zone	Milieu	Méthode de dessin	Longueur (m)	Rendement (m/j)
1	Urbain	Sur nuage de points	981	450
2	Urbain	Sur orthoimages	1914	1000

Tableau 2 : Mes rendements de production selon les deux méthodes de dessin

Des outils ont ensuite été développés pour lancer un test en production. Deux groupes de dessinateurs, avec une expérience différente, ont participé au test. En environnement urbain, les rendements atteints sont de 400 m/j pour les dessinateurs ayant moins de trois mois d'ancienneté dans l'entreprise, et de 930 m/j pour les autres plus expérimentés. Ce test a permis d'améliorer les procédures de préparation des données et de dessin. La différence de rendement entre les deux groupes montre néanmoins l'influence non négligeable de l'expérience. Par conséquent, un rendement de 1 km/j peut être atteint dans les prochains temps.

6. Vers la production de plans 3D

Afin d'appliquer l'utilisation des orthoimages à la production de plans 3D, il est essentiel d'identifier le sol dans les nuages de points. Contrairement à l'ancienne macro, celle-ci fonctionne quel que soit le milieu (urbain ou rural). Plusieurs scénarii peuvent être envisagés pour le plaquage du dessin : pendant ou après, à partir d'un modèle ou d'une grille, plaquage du dessin ou uniquement des points topographiques.

Les livrables sont des plans 2D avec un attribut décrivant l'altitude des points topographiques. Les tests se sont donc portés sur le plaquage de ces points sur un modèle. Le modèle est généré à partir des points du sol. Les données proviennent de trois systèmes différents, tous équipés de scanners laser « Zoller and Frolich ». L'évaluation du plaquage et du modèle s'est faite en comparant l'altitude des points topographiques livrés et ceux plaqués automatiquement sur le modèle. Les points livrés sont considérés plus précis puisqu'ils ont fait l'objet d'un contrôle et d'une correction manuelle. Le Tableau 3 présente des résultats globaux du test (non encore validé).

Projets	Pourcentage de points non plaqués	Pourcentage de points avec écart > 2 cm	Moyenne (cm)
Projet 1	7 %	20 %	-1,0
Projet 2	11 %	13 %	-1,6
Projet 3	12 %	30%	-2,4

Tableau 3 : Analyse du plaquage automatique des points topographiques

A l'issu du plaquage automatique, certains points restent sans altitude, à cause de l'absence de modèle. Le livrable nécessite une précision relative de 2 cm en altitude. Cependant, la troisième colonne de Tableau 3 est à relativiser. Ces tests comparent des sols déterminés de manières différentes. Dans la référence, le sol correspond à une couche de points, épaisse de 2 cm, lissée. La routine développée prend systématiquement les points des plus bas. Le sol testé est donc plus bas que le sol de la référence. Ceci est confirmé par les moyennes des écarts systématiquement négatives.

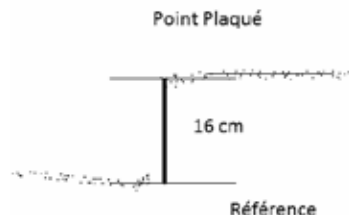


Figure 2 : Plaquage automatique d'un point topographique au niveau d'un fil d'eau de bordure

Cependant, une étude des écarts par type d'objets permet de valider le plaquage automatique pour certains éléments, et d'orienter les contrôles. Une partie de points faux correspondent à des fils d'eau de bordures, des pieds de mur et des marches d'escaliers. Dans ces trois cas, il y a deux couches de points avec des altitudes différentes, comme l'illustre la Figure 2. Cette capture d'écran a été réalisée au niveau d'une bordure. Ainsi, cette méthode permet de plaquer automatiquement certains éléments, d'effectuer un contrôle systématique et des corrections manuelles sur les autres.

7. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis de maîtriser la norme PCRS même si son évolution reste à surveiller. Cette norme est le socle de développement d'un livrable unique.

Concernant la partie traitement de données, les premiers résultats sont encourageants. L'utilisation des orthoimages a permis de doubler le rendement de production pour les plans 2D. Les travaux en cours concernant la détection automatique à partir de ces images ouvrent également des perspectives intéressantes pour l'automatisation de la production.

Enfin, avant de pouvoir transposer la procédure aux plans 3D, la fiabilité de la classification du sol doit être validée. Le plaquage de points topographiques s'effectuera ensuite par un développement interne qui permettra d'utiliser des méthodes de plaquage différentes en fonction des objets.

Mon projet de fin d'études va être suivi d'une seconde étude qui se focalisera sur le traitement des orthoimages. Les objectifs d'automatisation de la transformation du nuage de points issus de « Mobile Mapping » à la norme PCRS sont une réalité qu'il convient de continuer à explorer.

Numérisation et anastylose d'éléments statuaire du projet INRAP « Pont Sainte Maxence »

PFE présenté par :

Laurent Bitard

Société d'accueil :

Laboratoire ICube UMR 7357

Equipe TRIO / INSA Groupe PAGE

Directeur de PFE :

Pierre Grussenmeyer

Correcteurs :

Pierre Grussenmeyer et Emmanuel Alby

INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG



1. Contexte et objectifs de l'étude

Contexte de l'étude

Il y a quelques années, un projet immobilier vit le jour avec pour ambition la construction d'un centre commercial dans la ville de Pont-Sainte-Maxence, au nord de Paris non loin des communes de Compiègne, Beauvais et Creil. Avant de construire ce centre commercial remplaçant un ancien terrain de football, des fouilles archéologiques ont été prescrites en 2014. Ces fouilles se sont avérées très concluantes. En effet, les archéologues [1] ont réussi à trouver des fragments de pierre sculptés et très bien conservés (figure 1).

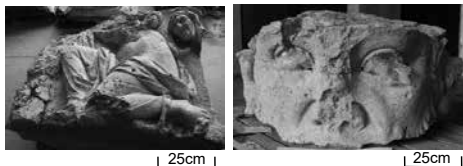


Figure 1 : Photographies des blocs 13 (à gauche) et 275 (à droite)

Selon eux, il s'agirait d'artéfacts datant de la Rome antique, et ces blocs seraient des fragments d'une ancienne façade romaine menant à un sanctuaire. Les archéologues ont émis une hypothèse de reconstruction de cette façade (figure 2).

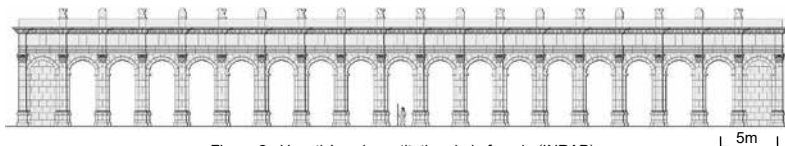


Figure 2 : Hypothèse de restitution de la façade (INRAP)

Cette hypothèse de reconstruction se base sur les blocs de pierres retrouvés au nombre de 500 s'alliant à plus de 6000 fragments. Néanmoins, ce nombre considérable de blocs ne représente qu'à peine 10 % de la supposée façade (figure 3).

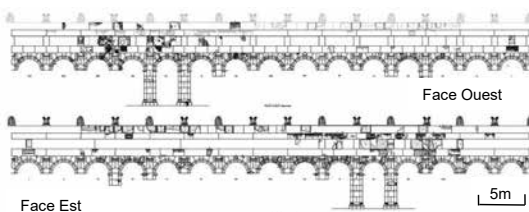


Figure 3 : Hypothèse d'anastylose provisoire de la façade (INRAP)

De ces 10 % retrouvés, une sélection plus fine de 96 artéfacts est faite regroupant 58 blocs et 38 fragments. Cette sélection ne représentant qu'environ 1% de la façade sera le socle de données de ce travail. Ce projet s'inscrit dans le souci de conservation de vestiges antiques, permettant de créer une documentation numérique mais aussi de simuler et de recréer des morceaux non retrouvés en tenant

compte des hypothèses des archéologues. De plus, le développement de méthodes scientifiques permettant la reconstruction de cette façade romaine monumentale est particulièrement attrayant. C'est dans ce cadre que le projet bénéficie du soutien de la Fondation groupe EDF.

Problématique

Parmi cette sélection d'une centaine de blocs et de fragments, il s'agira dans un premier temps de poursuivre le travail commencé en Projet de Recherche Technologique (PRT) concernant

l'acquisition des données relatives aux différents artefacts retrouvés. Suite à cela, il faudra effectuer la modélisation tridimensionnelle de ceux-ci. Puis, il conviendra d'effectuer leurs anastyles suivant plusieurs méthodes dépendant de leurs associations. Ensuite, une reconstitution globale de la façade à partir de ces blocs modélisés et de blocs artificiels issus des postulats des archéologues est envisagée. Enfin, l'étude du possible mécanisme de chute est entrevue.

2. Acquisition des données relatives aux blocs et fragments retrouvés

Le projet se basant sur des blocs de pierre, il faut tout d'abord acquérir les données relatives à ceux-ci pour obtenir une base sur laquelle travailler. Les blocs étant plus ou moins encombrants en raison de leurs tailles, il va de soi qu'ils sont plus ou moins bien transportables. C'est pourquoi ces blocs ont été dès lors catégorisés en deux groupes se différenciant par leurs tailles. Le premier groupe de blocs rassemble les blocs de petite envergure ($\sim 20\text{cm}^3$) tandis que le second regroupe les plus gros blocs ($\sim 1\text{m}^3$). De ce fait, le premier groupe facilement déplaçable a pu être ramené à l'INSA de Strasbourg, tandis que le deuxième groupe est resté dans un entrepôt à Creil non loin de Pont-Sainte-Maxence. La lasergrammétrie a été choisie pour les blocs de petite taille rapportés dans l'enceinte du laboratoire, tandis que la photogrammétrie semblait plus adéquate pour les plus gros blocs.

2.1 Méthode d'acquisition par lasergrammétrie

La lasergrammétrie s'effectue par le biais d'un scanner à bras sur les blocs de petite envergure. Celui-ci est un scanner à bras de type « **Faro ScanArm Edge HD** » (figure 4). Ce bras permet de numériser **560 000 points par seconde**, mais également d'atteindre une **précision de $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$** . L'objet de l'utilisation de ce bras est de scanner des détails de 0.1mm. Avant de commencer la numérisation de la pièce considérée, nous pouvons notifier au logiciel « Géomagic studio 12 » un plan moyen représentant le plan de l'établi. Grâce à cette astuce, le scanner n'acquière pas les points issus de ce plan, ce qui peut être un gain de temps remarquable lors de la segmentation des différents nuages de points. Ensuite, il s'agit de faire le tour de l'artefact avec le bras tout en gardant les deux croix du scanner à bras superposées et en ne se déplaçant pas trop rapidement. Une fois le premier coté acquis, il suffit de retourner l'artefact pour faire de même sur l'autre côté. Parfois, il se peut que des artefacts particulièrement complexes nécessitent plus de deux acquisitions.



Figure 4 : Faro ScanArm Edge HD

2.2 Méthode d'acquisition par photogrammétrie



Figure 5 : Canon EOS 5D Mark II (gauche) et Canon EOS 5DSR (droite)

Pour la numérisation par photogrammétrie, nous avons utilisé des appareils photos Canon EOS 5D Mark II et Canon EOS 5DSR (figure 5). Les appareils photos sont utilisés en mode manuel pour garantir un meilleur réglage lors des acquisitions et permettre de connaître exactement les réglages utilisés afin de les optimiser.

Nous souhaitons dans le cadre de ce projet garder les mêmes paramètres respectivement sur chaque appareil, seul le temps d'exposition variera pour le Canon EOS 5D Mark II qui n'utilise pas de flash annulaire et qui est donc dépendant de la lumière ambiante. Il en résulte que la texture ne sera pas homogène avec les photographies prises sur trépied. Il est également à noter que le flash annulaire entraîne une rapidité de prise de photographies accrue en comparaison à la prise de photographies sur trépied ainsi qu'un éclairage plus homogène. De manière générale, toutes les photos doivent être nettes pour permettre un bon rendu et garantir la meilleure précision lors des calculs.

3. Modélisation tridimensionnelle des artefacts retrouvés

3.1 Modélisation tridimensionnelle des blocs acquis par lasergrammétrie

La modélisation des blocs acquis par lasergrammétrie commence par la consolidation des nuages de points issus du scanner à bras étant donné que la pièce a été retournée pour l'obtenir dans son intégralité. Un algorithme Iterative Closest Point [2] (ICP) est utilisé pour le recalage des nuages. Néanmoins, celui-ci prend en compte l'état initial des deux nuages de points. C'est pourquoi, il faut

donc commencer par pré-positionner les nuages de points de manière à ce que l'algorithme ICP puisse être appliqué dans de bonnes conditions. Pour pré-positionner ces deux nuages de points, il convient prioritairement de s'assurer qu'ils sont à la bonne échelle et qu'il y ait un grand recouvrement entre eux pour permettre, par l'intermédiaire de points homologues de venir associer des points dans chacun des nuages de points issus du recouvrement. L'alignement grossier étant effectué, nous pouvons utiliser l'algorithme ICP. Puis, grâce à l'étude des paramètres de l'ICP nous obtenons finalement une précision de recalage de quelques dixièmes de millimètres. L'algorithme ICP est très important au regard de la consolidation des nuages de points mais, est également le fondement du principe de l'anastylose.

Une fois la consolidation des nuages de points effectuée et une précision suffisante atteinte, nous pouvons passer à l'étape de maillage de ce nuage de points fusionné. Cependant, pour pallier la taille importante des fichiers, le maillage doit subir une simplification [3]. En effet, celle-ci permet de garder des précisions correctes tout en allégeant considérablement le poids des données (~87%).

3.2 Modélisation tridimensionnelle des blocs acquis par photogrammétrie

Le traitement des blocs acquis par photogrammétrie s'effectue au sein du logiciel Photoscan (Agisoft), il passe par l'alignement des photographies, la densification du nuage de points obtenu puis, le maillage du nuage de points dense résultant et enfin l'application d'une texture réaliste sur le maillage créé. Enfin, ces maillages texturés subissent eux aussi une simplification.

4. Automatisation de processus pour la modélisation tridimensionnelle

De manière générale, l'automatisation est toujours recherchée car elle possède de nombreux avantages telle qu'une rapidité d'exécution bien plus importante que celle de l'être humain. De plus, elle n'est pas victime d'éventuelles fautes « d'inattention ». Enfin, elle permet un travail de jour comme de nuit et ceci sans interruption ni intervention humaine.

4.1 Automatisation des traitements photogrammétriques

Dans le cadre des travaux effectués au sein du laboratoire, un script Python a été créé pour fonctionner conjointement avec le logiciel Photoscan. Ce script, permet d'automatiser les phases d'alignement des photos, de mise à l'échelle, et de densification du nuage de points. Cependant, ce programme nécessitait d'avoir préalablement créé les différents projets Photoscan relatifs à chaque bloc puis ajouté les photos respectivement à chaque projet. Ce processus étant long pour un nombre de blocs conséquent, il a donc fallu automatiser cette partie, mais également ajouter au script la phase de maillage et d'application de texture. En définitive, le script résultant ne nécessite que de ranger les photos relatives à chaque bloc dans des dossiers répertoriés selon le nom des blocs. Il va ensuite créer tous les projets Photoscan en reprenant respectivement les noms des dossiers de photos pour le nom des projets Photoscan. Enfin, il va prendre à la suite chaque projet en lui faisant effectuer l'alignement des photos, son optimisation, une mise à l'échelle grâce aux barres d'échelles sur les photos, une densification du nuage de points, un maillage puis une application de texture.

4.2 Automatisation du processus de maillage

Grâce à la bibliothèque « PoissonRecon », il a été possible de créer un script en batch qui effectue un maillage de type Poisson sur les nuages de points au format .ply présents dans un dossier à renseigner au script. Puis, il exporte également les maillages créés dans un dossier à renseigner et enfin renvoie une liste de tous les maillages créés. Evidemment, le maillage Poisson est créé suivant certains paramètres qui sont réglables en intégralité dans le script et expliqués en détails via <http://www.cs.jhu.edu/~misha/Code/PoissonRecon/Version9.0/1/>

4.3 Automatisation de la simplification des maillages obtenus

Ce programme batch fonctionne sous Meshlab server à la suite du script précédent puisqu'il va chercher les maillages Poisson créés dans le répertoire notifié précédemment. Puis le programme va appliquer un script dans Meshlab server (créé préalablement dans Meshlab) pour simplifier le nombre de faces de 87% de tous les blocs présents. En effet, après l'étude de ce paramètre, il s'agit de la valeur permettant le meilleur rapport entre précision et volume de données. Enfin, il enregistre les maillages simplifiés au format .obj dans un nouveau répertoire et liste les maillages simplifiés créés.

5. Reconstruction de la façade par anastylose

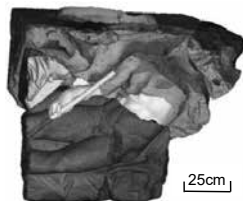


Figure 6 : Anastylose de 13 blocs contigus (ensemble bloc 17)

les réenregistrer dans ce repère afin de permettre aux personnes souhaitant les ouvrir dans un nouveau fichier d'avoir leur position absolue et non relative.

L'anastylose des éléments statutaires (figure 6), s'effectue sous 3DReshaper avec l'outil « Best Fit ». Cette fonction permet le recalage pour l'anastylose de la manière la plus précise par rapport aux autres logiciels comprenant un algorithme ICP. Pour placer les blocs modélisés, il a fallu créer un modèle 3D (figure 7) sur la base des dessins bidimensionnels des archéologues.

Une fois la façade redessinée sous SketchUp, le but est de repositionner les blocs dans celle-ci. Ce processus s'effectue également grâce à l'algorithme ICP. Cela va nous permettre d'obtenir les coordonnées des blocs dans la façade de telle manière à pouvoir

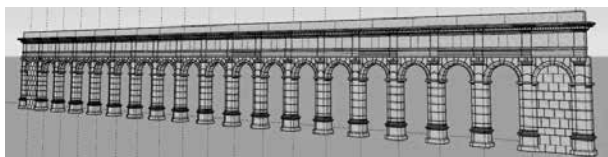


Figure 7 : Dessin 3D de la façade sous Sketchup sur la base de plan 2D

6. Animation et mécanisme de chute



Figure 8 : Rendu de la façade avec les blocs dans un environnement réaliste

L'animation et le mécanisme de chute sont réalisés dans le logiciel open source Blender. L'import des maillages des blocs dans le système de coordonnées de la façade ainsi que le dessin de celle-ci réalisé sur SketchUp permettent de réaliser une vidéo. Néanmoins, pour rendre la vidéo plus réaliste, il s'agit de créer l'environnement autour de cette façade. Ceci passe notamment par l'ajout d'un MNT créé à partir de photographies prises par drone, mais aussi par la modélisation d'un ciel et de personnages romains (figure 8). Le mécanisme de chute est établi selon deux scénarios. Le premier consiste en l'action de la gravité

sur les blocs. Le second part du principe que nous connaissons la position initiale et finale des blocs. Nous pouvons donc établir une hypothèse de trajectoire des blocs. La combinaison des deux scénarios serait le résultat le plus réaliste.

7. Conclusion et perspectives

Pour conclure, un mode opératoire a été trouvé permettant de retracer l'acquisition des blocs, leur modélisation, l'automatisation de celle-ci, mais aussi l'anastylose des artefacts, une reconstruction de la façade et une animation montrant celle-ci, ainsi, que les prémices du mécanisme de chute.

Étant donné qu'une très petite partie des blocs retrouvés a été traitée, il serait intéressant d'intégrer d'autres blocs bien conservés dans la façade. De plus, essayer de se familiariser avec les techniques de réalité virtuelle pour assembler les blocs serait particulièrement captivant. Une autre possibilité serait d'effectuer une automatisation de l'anastylose, fonctionnelle pour tout type de bloc permettant ainsi de réduire considérablement le temps de traitement. Les recherches concernant le mécanisme de chute pourront être poursuivies en relation avec des professionnels du génie civil pour permettre de mieux cerner les trajectoires probables des blocs de pierres.

Références :

- [1] V. Brunet-Gaston and C. Gaston, "Les dieux du stade : une façade monumentale gallo-romaine d'exception Nord-Picardie «Hauts de France», Oise Pont-Sainte-Maxence «Le Champ Lahyre», " 2016.
- [2] Paul J. Besl and N. D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 239–254, 1992.
- [3] M. Garland and P. S. Heckbert, "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics," in *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, 1997, pp. 209–216.

Utilisation de la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles

PFE présenté par : **Maxime Cartier Xatard**
Société d'accueil : **Compagnie Nationale du Rhône**
Directeur de PFE : **Paul-Henri Faure**
Correcteurs : **Pierre Grussenmeyer**
Emmanuel Alby



1. Introduction

Spécialisé dans la réalisation de modèles physiques réduits servant à l'étude des phénomènes hydrauliques, le Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques (CACOH) de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) traite les problèmes complexes en associant la modélisation physique et les modèles numériques dans une totale complémentarité. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce Projet de Fin d'Etude à l'INSA de Strasbourg. La mesure et la modélisation des fonds mobiles est cruciale dans la compréhension et la prévision du processus de déplacement des sédiments. Des systèmes passifs tels que la photogrammétrie aux systèmes actifs tels que le LiDAR, les progrès technologiques actuels en matière d'acquisition 3D permettent une production importante de données 3D dans des temps très réduits, avec un grand degré d'automatisation et sans contact, évitant ainsi de corrompre les scènes d'étude.

La CNR souhaite la mise en place d'une solution faisant intervenir la photogrammétrie numérique pour la modélisation de fonds mobiles de modèles physiques à travers l'eau. Ce projet a donc eu pour aboutissement :

- Le développement d'une méthodologie d'acquisition semi-automatisée de photos en vue d'une étude photogrammétrique
- L'étude de l'influence et des possibles corrections de la réfraction dans le cas de la photogrammétrie multimédia
- La rédaction d'un protocole d'acquisition et de traitement des données récoltées

L'étude et les essais menés au cours de ce PFE ont été réalisés à partir d'un modèle physique de grande envergure représentant une portion du lit de la Loire entre les Ponts-De-Cé et Nantes. La construction et l'exploitation de ce modèle s'inscrivent dans une étude plus globale visant au rééquilibrage du lit de la Loire.

2. L'aménagement de Bellevue, zone d'étude préférentielle

L'étude se focalise sur une portion du lit de la Loire et notamment au niveau du pont de Bellevue. L'opération prévue a pour objectif de réduire la pente de la ligne d'eau afin de favoriser le dépôt d'une partie du sable transporté par le fleuve. Elle constitue la clé de voûte de la stratégie de restauration du lit et sans doute l'action la plus délicate à réaliser car il s'agit d'obtenir le meilleur résultat tout en minimisant les impacts sur les usages, le milieu naturel et les lignes d'eau en crue.

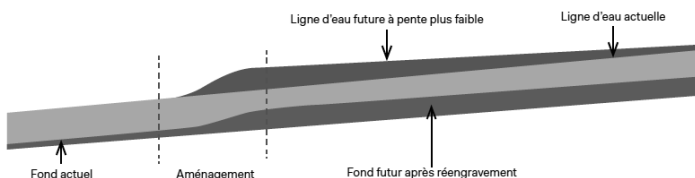


Figure 1 : Finalité du projet d'aménagement du lit de la Loire

3. Du terrain au laboratoire : le modèle physique

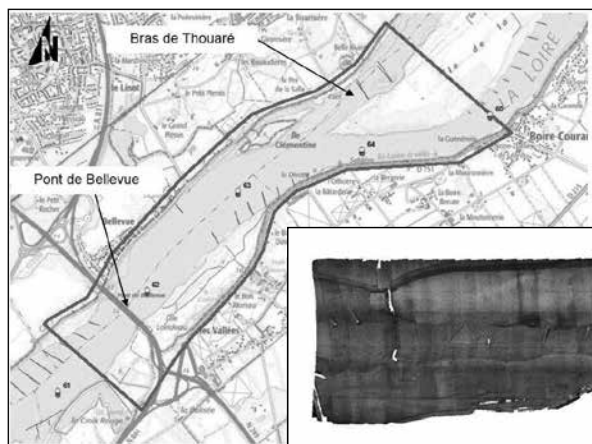
Le modèle physique permet d'étudier les phénomènes hydrauliques encore non accessibles aux modèles numériques et de définir ainsi les meilleurs choix possibles tant du point de vue technique, économique que de la sécurité. Une vulgarisation de la définition du terme de modèle physique serait une maquette dont le but est de reproduire la réalité à une échelle réduite. Dans la conception d'un nouvel aménagement ou dans l'optimisation d'un ouvrage existant, le modèle traite les problèmes complexes hydrauliques en prenant en compte les écoulements tridimensionnels. Les équipes du Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques associent modèles physiques et modèles numériques dans une totale complémentarité.

4. Le modèle physique de la Loire

Le modèle physique doit permettre d'appréhender à l'échelle des aménagements projetés la dynamique sédimentaire de la Loire en situation actuelle et pour différentes configurations d'aménagement. Ce modèle physique permettra d'optimiser les performances recherchées pour les travaux en termes de remous solide, dans le respect des exigences des partenaires du programme en ce qui concerne l'environnement, les usages et la maîtrise des inondations.

Les objectifs principaux sont donc de :

- Vérifier l'impact sédimentaire de l'aménagement de Bellevue sur un horizon de 15 ans en termes de tendance morphologique ;
- Définir la ou les configurations possibles des aménagements permettant de répondre à l'objectif de création d'un remous solide, tout en respectant les contraintes du site (navigation actuelle sur le fleuve, circulation piscicole, maintien des fonctionnalités des bras secondaires de l'île Clémentine et du bras du Thouaré connectés à l'aménagement...),
- Vérifier que l'aménagement proposé ne génère pas de survitesses trop importantes au droit des piles du pont de Bellevue, ce qui pourrait provoquer potentiellement des affouillements.



Les échelles retenues pour le modèle sont les suivantes :

Echelle verticale	1/50
Echelle horizontale	1/100
Distorsion verticale	2
Echelle sur la pente	1/0.5

Figure 2 : Localisation du projet de Bellevue et rendu 3D du modèle physique de la Loire sous Photoscan, sans échelle

5. Le rôle de la photogrammétrie dans l'étude

Lors de ce projet il est question d'étudier la bathymétrie d'une portion du lit de la Loire. Pour ce faire, et comme expliqué précédemment, un modèle physique modélisant les transports sédimentaires a donc été conçu pour en étudier l'évolution.

Pour procéder au relevé en 3D de la morphologie des fonds d'un modèle après essai, il est coutume de drainer le modèle sur une longue durée afin d'éviter les déformations et ainsi observer les fonds hors eau en vue de réaliser un relevé lasergramétrique.

Cependant, cette méthode est chronophage et un drainage, bien que réalisé méticuleusement engendre inévitablement une dégradation de l'état originel des fonds après essai.

Une autre approche évitant le drainage du modèle est la réalisation de profils bathymétriques à l'aide d'un capteur à ultrasons. Cependant, cette technique ne permet de recueillir que des données ponctuelles et souvent entachées d'erreurs difficiles à quantifier. En effet, le principe de l'appareil utilisé (Ultralab) réside dans la mesure du point le plus haut détecté dans le cône de mesure ce qui résulte certes à une précision altimétrique de l'ordre du millimètre mais difficile à estimer au niveau planimétrique.

C'est dans cette optique que le projet de photogrammétrie a été développé afin de pouvoir trouver une alternative au drainage et effectuer une acquisition de données en eau de manière rapide et non destructive vis-à-vis des fonds mobiles du modèle. Le développement d'une méthodologie d'acquisition permettrait ainsi de :

- passer d'une étude en profils des fonds à une étude surfacique
- amener une meilleure vision et compréhension de la dynamique sédimentaire dans le modèle physique.

6. Hypothèses et contraintes de l'étude

Il est important de souligner que cette étude est originale et novatrice de par son utilisation de la photogrammétrie. L'utilisation du modèle physique pour observer des phénomènes à une plus grande échelle se base sur la photogrammétrie et ce à travers l'eau. La mise en place opérationnelle a été jalonnée de contraintes qu'il a fallu respecter et d'hypothèses à vérifier. Dans cette étude, nous pouvons diviser les contraintes suivant plusieurs critères.

Du point de vue du matériel, il est imposé l'utilisation de boîtiers EOS 1000D déjà en possession du laboratoire. Il s'agit là d'un premier frein sachant que les appareils photo datant de 2008, sont équipés de capteurs APS-C de 10,1 Mégapixels pour une résolution 2592 x 3888. Une seconde contrainte a été le respect des normes relatives au chariot instrumenté sur lequel sont placés les appareils. La pose des bras déportés par rapport aux traverses a nécessité le calcul des forces exercées et impliqué de limiter au maximum le poids de charge du chariot. Il est à noter de plus que l'utilisation de la photogrammétrie sur un modèle physique en eau exclut toute possibilité de positionner des luminaires au-dessus du plan d'eau sans quoi des masques peuvent se créer sur les photos. Il a donc été choisi une nouvelle fois d'équiper le chariot à l'aide de lampes tungstène de 600W sur ses extrémités. Cette solution permet ainsi une diffusion homogène de la lumière tout au long de l'acquisition tout en évitant la création d'ombres sur le modèle, phénomène handicapant lors des traitements sous le logiciel Photoscan. Enfin, il a fallu élaborer une stratégie pour le positionnement des points de contrôles servant au géoréférencement et à la reconstruction du modèle. Ces points de contrôles avaient pour contraintes d'être matérialisés de façon durable et être résistants à l'eau mais ne devaient pas perturber l'écoulement du modèle par leur positionnement. La solution retenue est exposée dans le paragraphe 8 du résumé.

Le second aspect contraignant s'est porté sur la sécurité relative à l'installation de la solution. Le câblage des appareils photos et des luminaires doit respecter un cahier des charges et exclut notamment toute présence de prises de 220 Volts sur le portique. Des grips de batterie ont ainsi été ajoutés à chaque appareil pour permettre une plus longue autonomie et un accès rapide aux batteries sans démonter l'installation.



Figure 3 : Chariot instrumenté du modèle physique

Enfin, étant donné que plusieurs acteurs interagissent sur le modèle physique, la coordination et la mise en correspondance des plannings pour permettre l'avancement des différentes opérations s'est révélée être un véritable défi. L'étalonnage des différents capteurs du chariot et les essais de calage du modèle nécessitent plusieurs phases de remplissage et drainage du bassin ainsi qu'un grand nombre de manipulations du chariot, le rendant inaccessible.

Une fois les contraintes respectées, il a été nécessaire d'émettre des hypothèses. Ces dernières permettent par la suite de s'affranchir de certains phénomènes et de simplifier l'étude sur certains aspects.

Parmi ces dernières on peut citer les plus notables selon lesquelles :

- L'éclairage est uniforme sur les modèles photographiés
- Le plan d'eau du modèle est supposé planaire et horizontal
- L'interface air-eau est considérée sans épaisseur et négligeable
- Les instruments sont supposés calibrés et utilisés dans les limites d'utilisation optimales
- La turbidité de l'eau n'influe pas sur l'acquisition de mesures
- Les photos sont capturées aux alentours de la verticale (moins de 10° par rapport au nadir)

Le dernier point à souligner, et surement la plus grande contrainte de ce projet, est la réfraction qui s'opère au niveau de l'interface air-eau du modèle. Le paragraphe suivant s'attache à décrire ce phénomène.

7. La photogrammétrie multimédia et le problème de réfraction

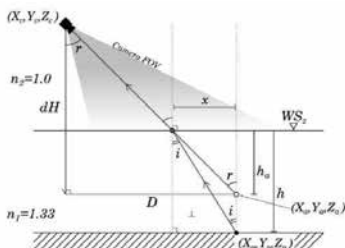


Figure 4 : Figure de réfraction, J. T. Dietrich 2016

La photogrammétrie nécessitant le tracé des rayons optiques à travers plusieurs milieux d'indices de réfraction différents est appelée « photogrammétrie multimédia ». Elle est caractérisée par la réfraction des faisceaux optiques à la transition entre les différents milieux. On peut associer à ce phénomène la notion de point apparent. En effet, celle-ci constitue l'essence même du phénomène de réfraction et provient de l'erreur systématique causée par la réfraction à l'interface air-eau et qui a pour effet de modifier la perception de la profondeur et donc en retourner une valeur faussée ou corrompue.

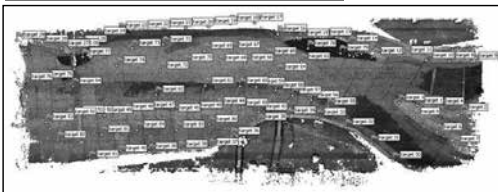
Lors du Projet de Recherche Technologique du même titre, l'algorithme de James T. Dietrich, exposé dans son article *Bathymetric Structure from Motion : Extracting shallow stream bathymetry from multi-view photogrammetry* avait été étudié plus en détail et retenu comme solution de correction de la réfraction pour notre cas d'étude. Des résultats prometteurs avaient déjà été trouvés et ceux obtenus dans ce PFE devraient permettre de confirmer l'efficacité de ce procédé.

8. Solution opérationnelle retenue

Modèle de caméra	EOS 1000D
Nombre de bandes	5
Hauteur de vol	1,95 m
Focale	10 mm
Nombre d'images	310
Recouvrement transversal	~ 55%
Recouvrement longitudinal	~ 80%

Ce PFE a eu pour finalité l'installation d'un système d'acquisition de photographies semi-automatisé. Ce dernier consiste en 5 appareils photos disposés sur un chariot instrumentés et reliés par USB à une tablette tactile permettant le déclenchement simultané des appareils à distance. Les luminaires, fixés en bord de chariot, permettent un éclairage homogène et synchronisé avec le déplacement du chariot.

Un canevas de 84 cibles en PVC fixes détectables automatiquement par le logiciel Agisoft Photoscan a également été mis en place pour permettre la reconstruction du modèle. Enfin, deux lasers de positionnement en forme de croix ont été fixés sur le chariot. Ils permettent de matérialiser de manière virtuelle des points sur les fonds mobiles du modèle et dont les coordonnées planimétriques sont connues.



Leur altitude est ensuite relevée à l'aide de l'Ultralab, un capteur à ultrason. Ces points en eau supplémentaires nécessitent, certes, un traitement manuel dans le logiciel Agisoft Photoscan mais permettent d'obtenir des modèles plus robustes pour l'étude.

Figure 5 : Positions des cibles sur le modèle physique

Caractérisation de précision d'un GNSS mono-fréquence à bas coût et développement d'une chaîne de traitement automatisée pour l'auscultation d'ouvrages d'art ou de mouvements géotechniques.

PFE présenté par : **Thomas Marques**
Société d'accueil : *itmsol SAS*
Directeur de PFE : *M. Allorant Pierrick*
Correcteur : *M. Gilbert Ferhat*

itmsol

1. Introduction

Le groupe itmsol est l'un des leaders mondiaux dans le domaine de l'auscultation de tunnels et d'ouvrages ainsi que l'un des principaux distributeurs mondiaux de capteurs géotechniques. Le groupe itmsol et Soil instruments emploient actuellement près de 100 ingénieurs spécialisés dans la mesure et l'instrumentation, répartis à travers le monde et dans des implantations stables en France, en Angleterre, aux Etats Unis, en Australie et en Allemagne.

La société réunit les compétences d'une équipe pluridisciplinaire de topographes, d'hydrauliciens, de géologues, de géotechniciens, d'ingénieurs en métrologie, d'informaticiens et d'électroniciens.

itmsol a été retenu sur les plus grands sites de mesures au monde pour fournir et installer les instruments, organiser et contrôler l'acquisition des données. Plus de 50 projets majeurs de métros et de tunnels durant ces 15 dernières années.

En général, une auscultation s'effectue avec des stations totales robotisées. Il suffit de configurer les appareils afin qu'ils mesurent ensuite les cibles prédéfinies par l'utilisateur. Dans ce milieu, afin de perdurer, l'avancée technologique est primordiale, c'est pourquoi itmsol doit en permanence s'adapter et s'améliorer afin de répondre à de nouvelles offres.

Une nouvelle mission nous a été demandée. Elle consiste à effectuer le suivi topographique de la boucle de la Seine par blocs GPS. Les réseaux de capteurs permettent une surveillance de zone étendue grâce à la coopération d'un ensemble de cubes déployés sur site qui gère à la fois l'acquisition, le traitement et le transfert des données. Pour répondre aux attentes de nos clients, nous devons mettre en place un réseau de capteurs mesurant différentes grandeurs physiques en plusieurs points. Plusieurs récepteurs autonomes sont reliés entre eux par un système de télécommunication sans fil. Cette technique permet de suivre le positionnement des bâtiments susceptibles de subir des mouvements.

Un total de 10 cubes GNSS est attendu, pivots compris. Or, de nos jours, les solutions GNSS ont un coût non négligeable avec une précision qui laisse parfois à désirer. C'est pourquoi, durant le Projet de Fin d'Etude, il est nécessaire de développer un cube GNSS mono-fréquence à bas coût pour l'auscultation d'ouvrages d'art ou de mouvements géotechniques.

Conformément à cette démarche, les objectifs de l'étude étaient les suivants :

- réalisation de l'état de l'art et du choix des différentes parties du boîtier,
- étude de précision du système,
- automatisation du processus.

2. État de l'art actuel du cube GNSS

Le cube GNSS a une utilisation précise destinée à une utilisation sur des objets géophysiques de taille kilométrique. Le cube GPS a une architecture en modules, trois plus précisément. Chacun de

ces modules a une fonctionnalité précise à laquelle viennent s'ajouter des couches capteurs qui se greffent de façon modulaire au cube GPS. Le module GPS est composé d'une antenne mono-fréquence, captant uniquement le signal de L1. Dans ce module se trouve également le récepteur. C'est le composant qui va permettre de convertir les données analogiques de l'antenne en données numériques.

Ensuite vient le module de gestion qui va gérer toutes les données entrantes et sortantes. Il va également sauvegarder et stocker les données, communiquer avec les capteurs et fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du système.

Vient enfin le module de transmission des données, permettant l'envoi des données à l'utilisateur.

Nous savons donc qu'il faut plusieurs modules pour la réalisation du cube. Nous allons dans notre cas, développer un module GNSS et un module de gestion. Pour le module GNSS, il faut que nous trouvions une antenne et un récepteur. Concernant la gestion, un mini PC fera l'affaire, le temps de stocker les données pendant quelques jours. Un chargeur pour smartphone fera office de batterie.

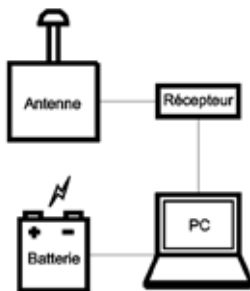


Figure 1 : Schéma de construction d'un cube GNSS

Le mode de récepteur mono-fréquence est utilisé pour des lignes de bases inférieures à 15-20 kilomètres. Les mesures de phases se font sur la porteuse L1 ($\lambda = 19.05\text{cm}$) contenant l'ensemble des observations usuelles, à savoir : C / A code, phase, Doppler, rapport signal sur bruit (SNR) et indicateur de saut de cycle. La durée des observations est d'environ une heure. Les calculs en standard se font avec les orbites radiodiffusées, des modèles ionosphériques et troposphériques. Sur des capteurs mono-fréquence, lorsque les lignes de base sont supérieures à 10 kilomètres, la précision des capteurs est inférieure à celle pouvant être obtenue avec des capteurs bi-fréquence en raison des effets ionosphériques qui ne peuvent pas être éliminés avec des données mono-fréquence.

Les capteurs mono-fréquence sont peu onéreux, ils fournissent des mesures de phases brutes qui sont mises à profit pour réaliser un positionnement différentiel précis dans le cas de courtes lignes de base entre récepteurs.

3. Expérimentations



Figure 2 : Cube GNSS assemblé © Thomas Marques (2017)



Figure 3 : Cube GNSS en phase de mesure © Thomas Marques (2017)

Afin de caractériser la précision du cube, plusieurs types d'expérimentation sont mis en œuvre afin de déterminer les facteurs d'influence sur la précision. Pour ce faire, nous disposons de quatre cubes fabriqués de la même façon. Afin d'obtenir les données les plus favorables possible, nous plaçons les cubes dans des zones en hauteur comme des toits de bâtiments. De plus, il faut également qu'il n'y ait aucun obstacle qui pourrait être la cause de multi-trajet. C'est pourquoi nous cherchons des zones dégagées, sans arbres faisant obstruction.

Evaluation de la longueur de la ligne de base

Tout d'abord, une évaluation de l'influence de la longueur de la ligne de base est nécessaire. Nous menons quatre phases de test. Chaque phase dure environ trois jours (durée de vie de la batterie), pendant lesquels les cubes enregistrent en permanence les données reçues par les antennes. Durant la première phase, les cubes sont séparés d'environ 50m. Pour la deuxième phase ils sont espacés de 1km, de 5km pour la troisième phase, puis enfin de 10km pour la quatrième phase.

Evaluation de l'influence du modèle d'antenne

Pour ce faire, nous refaisons la première phase de test en remplaçant l'antenne de base, par d'autres types d'antennes avec des coûts variables. Nous refaisons uniquement la première phase de test, car nous savons que dans un environnement proche, les erreurs des modèles ionosphériques et troposphériques sont négligeables. La seule erreur qui peut ainsi être mise en évidence sera l'erreur de variation du centre de phase de l'antenne.

Contrôle de l'exactitude en dynamique

Il est important de contrôler l'exactitude en dynamique. En effet, il est nécessaire de mesurer un mouvement et non une position. Pour cela, nous utilisons des antennes de haute précision, servant comme mesures de référence, près des antennes à bas coût. Nous les positionnons dans un milieu où il y a de fortes variations de position afin de vérifier que nous obtenons un écart-type satisfaisant.

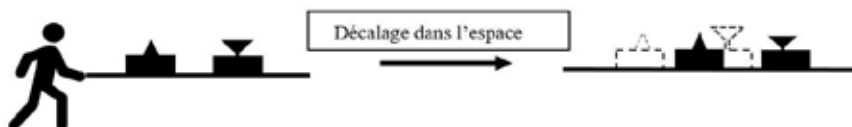


Figure 4 : Schéma d'expérimentation du contrôle de l'exactitude en dynamique

4. Automatisation des traitements

L'automatisation du processus de traitement des données se décompose en plusieurs parties. Nous allons expliciter les différentes phases à l'aide de la figure 5.

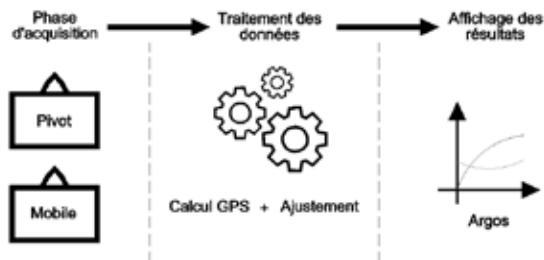


Figure 5 : Schéma de traitement des données

Lors de la phase d'acquisition, il est nécessaire de se rendre sur site afin de placer les cubes sur les points où l'on souhaite faire des mesures. Ensuite, nous lançons l'enregistrement des données pendant la durée souhaitée. Un enregistrement des données toutes les 30 secondes plutôt que toutes les secondes est suffisant. Suite aux tests effectués, les précisions sur les données ne sont pas dégradées. De plus, cela est préférable pour le stockage et le transfert des données enregistrées par les cubes.

Vient ensuite le traitement des données. Une fois que celles-ci ont été récupérées, il est alors nécessaire de les traiter. Pour cela, nous utilisons un logiciel permettant de faire les calculs de position et calculs de lignes de base. A l'aide d'un programme de compensation, nous allons cette fois-ci venir ajuster nos données obtenues.

Enfin, une fois les calculs finis, il ne nous reste plus qu'à afficher les données sur Argos, il s'agit d'une application web d'itmsol. Il nous suffit alors de paramétrer les affichages que nous souhaitons. Pour notre cas, un affichage de variation de position en X,Y et Z selon le temps est nécessaire.

5. Conclusion

L'objectif du projet de fin d'étude était la caractérisation de la précision d'un système cube comprenant un GPS mono-fréquence, ainsi que l'établissement d'une procédure d'acquisition, de traitement et d'affichage des données de manière automatique. Nous avons plusieurs contraintes très importantes, notamment la contrainte financière. En effet, il fallait réaliser l'ensemble de l'étude avec un système *low-cost* donc le choix du matériel a été primordial. Le rapport qualité-prix devait être optimal pour cette étude. De plus, il fallait caractériser la précision des cubes, dans le but de l'auscultation d'ouvrages d'art ou de mouvements géotechniques. Enfin, la solution d'automatisation devait fonctionner quelque soit le nombre de cubes.

Suite à nos expériences menées sur terrain, et après traitement de ceux-ci, nous nous sommes rendus compte que selon l'exigence de précision attendue, l'utilisation des antennes n'était pas la même. En effet, un rapport entre le nombre de cubes et la qualité de l'antenne doit être calculé afin d'optimiser les dépenses des campagnes de mesures.

A l'avenir, une évolution des cubes sera nécessaire selon l'utilisation souhaitée. Pour répondre à un besoin tel que des glissements de terrain par exemple, un système d'alimentation autonome, ainsi qu'un dispositif d'implantation des cubes devront être mis en place. Enfin, un cahier des charges sera mis à disposition des prestataires qui effectueront les mesures. Il comportera les instructions sur le matériel à utiliser, selon la précision à atteindre.

Création et intégration d'une Propriété Par Étages en 3D dans la plateforme ArcGIS (ESRI) et partage via le « cloud »

PFE présenté par : **Laura Barrand**
Société d'accueil : **MBC ingéo SA**
Directeur de PFE : **Mayeul Gaillet**
Correcteur : **Mathieu Koehl**



1. Introduction

La propriété par étages (PPE) est une forme particulière de copropriété suisse où chaque copropriétaire a le droit exclusif d'utiliser et d'aménager certaines parties intérieures d'un bâtiment. En France, on retrouve l'équivalent de ce régime de propriété sous le nom de copropriété. Cela fait plus de 50 ans que la PPE est inscrite dans le code civil suisse.

Dans le canton de Genève, la confection des plans de répartition de la PPE a été confiée, dès son origine, aux bureaux d'ingénieurs géomètres brevetés dans un souci d'uniformisation et de description claire et précise de la composition des étages. Ce cahier est un document incontournable dans le milieu de l'immobilier genevois. Il est reconnu comme étant un garant des transactions immobilières d'appartements privatifs du fait de son inscription au Registre Foncier (RF) et de sa réalisation par un ingénieur géomètre officiel, garantissant son exactitude. Avec des taux hypothécaires historiquement bas, la propriété par étages connaît, depuis plusieurs années, un essor important dans les villes. La demande formulée par les différents acteurs du territoire de disposer de données numériques standardisées et tridimensionnelles, a amené la Direction de la mensuration officielle (DMO) (service du cadastre du canton de Genève) et l'Association genevoise des ingénieurs géomètres officiels et géomaticiens (AGG) à traiter sous forme numérique le dossier de constitution d'une PPE. D'abord sur calques, puis sur papier, le cahier de répartition des locaux de la PPE est, depuis quelques années, également fourni en version numérique dans une base de données géographiques, normalisée à la DMO, pour être directement intégrée dans l'architecture SIG du Canton de Genève.

D'un point de vue légal, on ne retrouve pas ou très peu de réglementation concernant ce cahier dans la législation fédérale. À Genève, des instructions cantonales datant de 1965 puis révisées en 2014 et 2015, complétées par une directive technique instaurée par l'AGG, en collaboration avec le RF et la DMO, permettent de standardiser ce cahier de répartition des locaux afin de faciliter sa compréhension par les différents protagonistes de la PPE.

Les tournants numériques que sont la PPE informatisée, la 3D et le BIM, couplés à des solutions logicielles toujours plus performantes et nomades (ArcGIS Pro et ArcGIS online), laissent augurer de nouvelles opportunités pour les géomètres de vendre des cahiers de PPE 3D aux promoteurs. Cela peut également être bénéfique d'un point de vue promoteur lors des ventes de leurs lots de PPE à de potentiels acheteurs.

Ce sujet de Projet de Fin d'Études est réalisé en partenariat avec la DMO et le Service de Géomatique et de l'Organisation de l'Information (SGOI). Le but de ce PFE consiste à créer une maquette 3D d'une PPE à l'aide des nouvelles solutions ESRI et de la confronter aux intérêts des acteurs de la PPE. Cette étude porte sur trois axes majeurs : la définition, la conception et la diffusion de la PPE 3D. Après avoir réalisé une étude bibliographique complète, portée aussi bien sur les aspects législatifs que techniques du sujet, un des objectifs de cette étude sera de définir ce qu'est une propriété par étages en trois dimensions. Le second enjeu sera d'élaborer une maquette de PPE en 3D sous ArcGIS Pro, basée sur des exemples concrets réalisés par la société MBC ingéo SA. Enfin, une partie dédiée à la diffusion publique et privée conclura cette étude.

2. Cadre juridique de la PPE

Le droit helvétique reconnaît trois régimes pouvant qualifier le droit de propriété : la propriété individuelle, la propriété commune et la copropriété ; la PPE fait partie de cette dernière. Définie aux articles 712a à 712t du Code Civil, elle est fondée sur les principes essentiels de la copropriété ordinaire en leur ajoutant la notion de droit exclusif sur une partie de l'immeuble. Le droit du copropriétaire comporte deux éléments distincts :

- une part de copropriété (quote-part) portant sur l'immeuble tout entier ;
- un droit de jouissance et d'utilisation exclusif portant sur son unité d'étage (lot).

L'unité d'étage est la désignation de l'ensemble des parties exclusives du propriétaire d'étage. Elle se compose de locaux principaux (appartement, local commercial...) et de locaux annexes qui y sont rattachés (cave, box fermé, garage privatif...) ; l'ensemble forme un feuillet, non dissociable. Un lot de PPE doit répondre à trois conditions cumulatives :

- former un tout : les locaux doivent constituer un tout (former une unité économique) ;
- constituer un local (fermé) faisant obstacle à la libre circulation ;
- posséder au moins un accès propre, débouchant sur une partie commune ou directement hors du bien-fonds.

Les parties communes sont les éléments matériels du bâtiment. À cela, s'ajoutent les espaces communs utilisés par l'ensemble des copropriétaires. La quote-part, souvent exprimée en millièmes, est une notion arithmétique. Elle définit la proportion de propriété qui revient au propriétaire. Ces millièmes permettent de répartir les charges de la PPE entre les copropriétaires et de prendre certaines décisions lors de l'assemblée des copropriétaires.

La constitution d'une PPE est établie par un acte notarié, déposé au Registre Foncier. L'acte constitutif doit mentionner, en plus des quotes-parts, la délimitation spatiale. Il doit indiquer de manière claire et précise la situation et la composition d'unités d'étages. À défaut et dans le cas d'une PPE avant construction, un plan de répartition définissant la situation spatiale, la délimitation et la composition d'unités d'étage et indiquant également les surfaces des appartements, doit être joint. Ce plan ne possède qu'un caractère descriptif, il n'est pas un titre authentique. Actuellement, le Code Civil ne présente aucune base légale explicite selon laquelle un plan doit représenter la délimitation spatiale des droits exclusifs dans la propriété par étages.

3. Définition de la PPE 3D

Le premier objectif de cette étude est de définir en quoi consiste une propriété par étages en trois dimensions. Avant de rentrer dans la partie technique et de se lancer dans une quelconque modélisation, il est nécessaire à partir d'une étude approfondie de la législation fédérale et cantonale en vigueur, de déterminer les éléments constitutifs d'une PPE 3D et de son découpage. Le passage de la 2D à la 3D, soulève de nombreuses questions.

Un point important sur le découpage des parties communes et des lots est à préciser. En effet, le modèle genevois est différent du modèle fédéral. À Genève, les limites entre deux lots contigus passent par l'axe du mur et la limite d'un lot en façade comprend la totalité de la façade. Quant à lui, le découpage fédéral prévoit, que tous les murs entre lots soient compris dans les parties communes.

Depuis 2016, un groupe de travail au niveau fédéral, composé de personnes de SwissTopo, du Registre Foncier et de cadastre suisse, a été créé afin de travailler sur le cadastre 3D et plus précisément sur la propriété par étages 3D. Ils ont notamment pour objectifs, d'élaborer une solution technique avec le catalogue des objets pour le nouveau modèle de données, de proposer des adaptations juridiques nécessaires et de mettre en lumière l'utilité d'une documentation en 3D. Au regard du lien étroit entre la réflexion du groupe de travail et cette étude, mais également grâce au partenariat avec la DMO, leurs travaux, certes en cours d'élaboration, ont pu être consultés et une rencontre avec certains membres a pu être organisée.

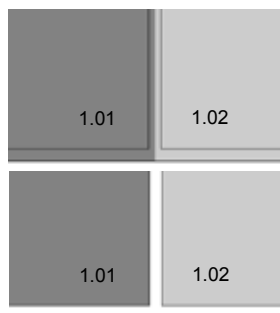


Figure 1 : Différence de découpage genevois et fédéral des lots 1.01 et 1.02

Ainsi, un modèle de données répondant à la législation fédérale, mais pouvant être facilement adapté au modèle genevois, a été créé. Basé sur celui utilisé pour la PPE 2D à Genève, il a été adapté pour la PPE 3D, tout en prenant en compte les réflexions du groupe de travail fédéral. Ce dernier est illustré par un exemple traitant d'un cas d'école, reprenant tous les éléments susceptibles de figurer dans une PPE.

4. De la maquette numérique à la PPE 3D

Le terme de PPE 3D ainsi que son modèle de données étant maintenant définis, la question technique peut à présent être abordée. En Suisse et plus particulièrement à Genève, les échanges entre la DMO et les bureaux de géomètres se font sous forme de fichiers géodatabase. Ainsi, la société MBC ingéo SA réalise quotidiennement ces travaux de conservation cadastrale à l'aide des logiciels de la plateforme ArcGIS. C'est pourquoi, le choix de travailler dans un univers SIG a été privilégié pour cette étude. Cette partie s'appuie sur la figure 2 ci-dessous.

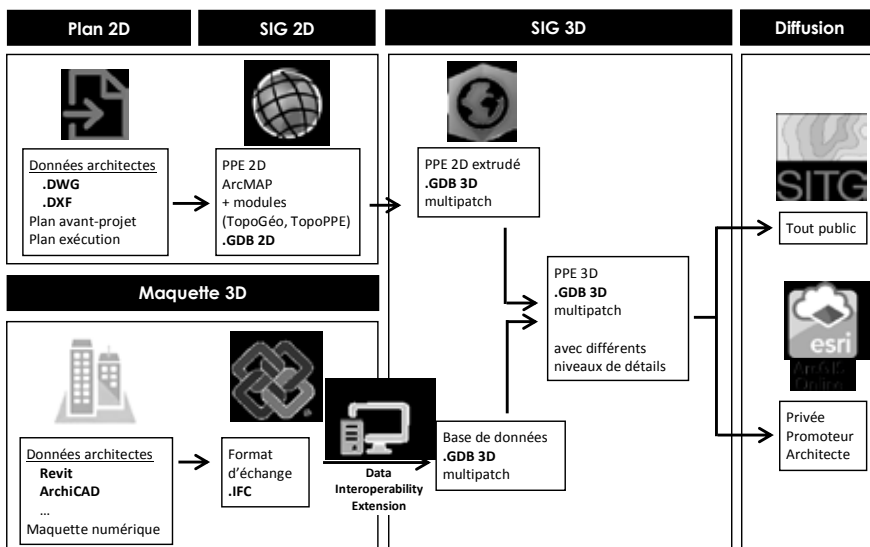


Figure 2 : De la maquette 3D au SIG

La première étape (partie gauche du schéma) est la récolte de données provenant des architectes. Aujourd'hui, pour la constitution d'un cahier de PPE (partie supérieure gauche du schéma), ces derniers nous transmettent des fichiers .DWG ou .DXF où le positionnement dans le parcellaire et la superposition des étages sont contrôlés. Ensuite, ils sont géoréférencés et purgés afin de ne garder que les éléments utiles au géomètre dans la construction des lots et dans la compréhension des plans. Puis, vient le montage géométrique et la saisie attributaire des lots sur ArcMap en se basant sur les plans épurés.

La partie inférieure gauche de la figure représente la collecte de fichiers 3D ; dans notre cas, ce sont des maquettes numériques de bâtiment, provenant des architectes. Ces fichiers sont la plupart du temps issus de format natif de logiciels comme Revit ou ArchiCAD. Après avoir été géoréférencés dans le système de référence suisse (MN95), ils sont exportés au format d'échange .IFC.

La partie centrale « SIG 3D » est dédiée au montage de la PPE en 3D sur ArcGIS Pro. À partir de l'extension « Data Interoperability », le fichier .IFC est converti en fichier géodatabase, où l'on retrouve chaque entité géométrique en fonction de sa nature (point, ligne, polygone et multipatch), triée par famille (dalle, toit, mur, porte, fenêtre...). En parallèle, la classe d'entités 2D (polygone) des lots est convertie en classe d'entités 3D (multipatch) à l'aide des attributs des entités géométriques

(altitude des étages et hauteur). À partir des données 3D du bâtiment provenant de la maquette numérique, et en couplant le découpage des lots, on arrive à construire une maquette de PPE 3D.

5. Diffusion

Le troisième objectif de cette étude est la diffusion de la PPE 3D (partie droite de la figure 2). Il faut distinguer la diffusion publique de la diffusion privée. En effet, en fonction du public visé, le contenu publié sera plus ou moins restreint.

Le territoire suisse est entièrement cartographié sous forme de SIG, où chaque canton gère son propre portail. Le Système d'Information du Territoire à Genève (SITG) est un organisme qui a pour but de coordonner, centraliser et diffuser les données relatives au territoire genevois. Ce guichet informatique, en 2D, répond aux besoins actuels de ses utilisateurs. En perpétuelle évolution, le SGOI a annoncé depuis quelques semaines, sa nouvelle interface tridimensionnelle (carte 3D du SITG), qui propose une vue schématique permettant de survoler l'ensemble du territoire genevois et de consulter les bâtiments, les projets, les ouvrages d'art et les arbres en 3D. La diffusion publique, à travers le SITG, doit prendre en compte la protection de la sphère privée ; du même ressort que les cahiers de PPE actuellement produits ne sont pas diffusables publiquement. Le grand public a seulement connaissance de l'emplacement des bâtiments en PPE ainsi que de sa nature (informatique ou papier). En étudiant les bases légales, il faut ainsi définir ce que l'on peut diffuser ou non.

La diffusion, cette fois-ci privée, ne nous impose pas de contrainte particulière au niveau du contenu. Elle sera destinée aux clients promoteurs, architectes voulant promouvoir leur PPE afin de vendre les différents lots. Cette diffusion, via ArcGIS Online et ces multiples applications, a pour but de proposer, à travers une Story Map, « un cahier de PPE 3D » interactif et plus vivant que le rendu actuel papier ou numérique au format PDF. Cela permettra aux futurs acheteurs de se rendre compte de l'intégration du bâtiment dans son environnement, mais également, de la position géographique du lot et des feuillettes au sein de la PPE.



En continuité de ce projet, la société MBC ingéo SA présentera à ses différents clients promoteurs cette Story Map. Cela permettra d'avoir un retour concret de leur part, afin d'en tirer les avantages et inconvénients pour les utilisateurs ainsi que les limites et les améliorations à effectuer.

Figure 3 : Capture de la Story Map réalisée

6. Conclusion

Ce PFE a permis la réalisation de maquettes 3D de PPE en étudiant plusieurs domaines. Dans un premier temps, une étude approfondie des bases légales et des directives techniques propres au canton de Genève, a révélé de grandes disparités entre les coutumes fédérales et genevoises.

Les échanges avec le groupe de travail fédéral ont été bénéfiques, et ont permis de proposer un modèle de données répondant à la fois au modèle fédéral, mais pouvant aussi être adapté au modèle genevois.

L'utilisation d'ArcGIS Pro a été un atout pour mener à bien cette étude et la modélisation de PPE. En effet, cette récente solution ESRI est désormais efficace et optimisée pour des travaux aussi bien en 2D qu'en 3D.

Enfin, les aspects diffusion et publication qui finalisent ce projet, permettent de proposer commercialement un produit abouti. À travers ArcGIS Online et notamment la confection d'une Story Map, c'est « un cahier 3D » interactif qui sera ainsi présenté à des clients potentiels, afin d'obtenir un retour concret du produit.

Etude du potentiel des drones dans les domaines de la géomatique et de l'urbanisme, au sein d'un bureau de géomètres genevois



PFE présenté par : **Pierre ARNOLD**
Société d'accueil : **MBC ingéo S.A.**
Directeur de PFE : **Guillaume BIZOUARD**
Correcteurs : **Mathieu KOEHL**



1. Introduction et contexte de l'étude

Ce Projet de Fin d'Etudes est réalisé au sein de la société MBC ingéo située sur le canton de Genève en Suisse. Soucieuse des nouvelles technologies et de leurs applications, l'entreprise souhaite explorer le potentiel des drones dans les domaines de la géomatique et de l'urbanisme.

Le contexte géographique joue un rôle important dans le projet. En effet, la Suisse possède une économie forte et stable qui permet d'avoir un certain dynamisme immobilier pour la réalisation de projets nouveaux. De par son passé, son fort tissu industriel, sa population et la présence d'entreprises internationales, le canton de Genève est un des principaux pôles économiques de la Suisse avec un très haut niveau de vie, ce qui entraîne des frais importants pour les sociétés. Le géomètre genevois doit être le plus concurrentiel possible vis-à-vis de ses confrères afin d'obtenir de nouveaux travaux. Dans un métier en perpétuelle évolution, il est nécessaire d'explorer les nouvelles technologies pour sans cesse améliorer et optimiser les techniques de travail. Le bureau MBC ingéo souhaite donc développer une activité drone afin de gagner de nouveaux marchés auprès d'architectes et urbanistes genevois et de diminuer ses coûts sur des prestations classiques.

L'utilisation du drone à Genève n'est pas une activité libre. Celle-ci est très réglementée car une grande partie de la ville et son étendue urbaine se situent dans un rayon de 5 km de l'aéroport international. Ce contexte genevois va donc être étudié afin de mettre en valeur les règles et les possibilités de l'utilisation du drone sur le canton.

2. Les moyens et les enjeux du projet

Pour l'étude, la société a conclu un partenariat avec un bureau d'architectes genevois et deux prestataires professionnels du drone. Les architectes ont proposé deux chantiers différents et ils sont curieux des rendus que pourrait fournir le drone (orthophotos, MNT, modèles 3D texturés). Cette technologie est en plein essor dans le domaine de l'acquisition de données géographiques 2D et 3D, domaine qui offre une demande croissante de nos jours. De plus, le secteur de la construction se trouve dans un fort dynamisme en ce moment à Genève, et de nombreux projets voient le jour. Les architectes et urbanistes s'intéressent de plus en plus aux possibilités qu'offre le drone pour leurs projets. L'aspect visuel des rendus 3D est très apprécié, notamment auprès des clients, professionnels ou particuliers, qui ont le moyen de se projeter facilement au sein d'un futur projet. Le premier enjeu du projet est donc d'étudier l'utilité du relevé par drone à Genève, de mettre en valeur le potentiel du drone et d'obtenir des marchés auprès de clients architectes partenaires.

Le deuxième objectif de l'étude concerne les solutions drones employées et c'est à ce moment qu'interviennent les deux partenaires professionnels du drone. En effet, le bureau MBC ingéo a acquis un drone dans le cadre de l'étude dit « grand public » : le DJI Phantom 4 pro + (Figure 1). Le premier prestataire nous a assisté sur le premier chantier en venant réaliser une partie du travail avec un drone similaire, afin d'apprendre les techniques de vol auprès d'un professionnel expérimenté. Le second prestataire est venu effectuer le deuxième chantier à nos côtés avec un drone professionnel, le eBee plus. Cela permet de faire une comparaison entre une



Figure 1 – Le drone DJI Phantom 4 Pro +

solution drone dite « grand public » et une solution professionnelle reconnue. Cette comparaison s'effectue aussi bien au niveau de la technique d'acquisition que des traitements effectués et de la qualité des données acquises puis générées. Enfin, un troisième chantier s'est ajouté en interne, le relevé d'une maison et de ses façades à l'aide d'un scanner laser terrestre. Ce dernier chantier permet de faire une comparaison entre la technique lasergrammétrique de référence et une technique photogrammétrique avec le drone. Dans tous les cas, le but est de comparer notre drone grand public avec d'autres solutions comme le drone professionnel ou un scanner laser terrestre, toujours dans l'optique de mettre en avant le potentiel et les limites de notre drone grand public. Evidemment, il faudra définir les délais de production et les coûts pour les clients et l'ingénieur géomètre officiel.

Enfin, le dernier enjeu du projet relève des solutions logicielles et informatiques utilisées. En effet, l'infrastructure géoinformatique cantonale est dans l'environnement ESRI et le bureau MBC ingéo a donc décidé de travailler directement dans cet environnement en ce qui concerne les travaux de conservation cadastrale. Pendant l'étude, un nouveau logiciel de traitements photogrammétriques lancé fin 2016 par ESRI, Drone2Map for ArcGIS, va être exploré et utilisé. Le but est de mettre en valeur les possibilités du logiciel par rapport à un autre plus connu tel que Pix4D.

Le projet de fin d'études s'articule donc autour de trois axes principaux :

- Développer l'activité photogrammétrique par drone à Genève et dans la société MBC ingéo en explorant le potentiel des drones,
- Comparer des solutions drones grand public et professionnels,
- Etudier le traitement des données dans l'environnement ESRI.

3. La comparaison entre Drone2Map et Pix4D

Drone2Map for ArcGIS est un logiciel de traitement d'images acquises par drone encore méconnu car très récent. Pendant l'étude, il est comparé à un soft beaucoup plus répandu : Pix4D. Il est important de préciser que le nouvel outil développé par ESRI possède un moteur de calcul photogrammétrique produit par Pix4D. Les deux logiciels restent donc proches sur leurs fonctions principales. Pour effectuer la comparaison, un projet commun a été traité de la même manière sur les deux outils, afin de mettre en valeur les possibilités et les limites du nouveau logiciel Drone2Map.

Au niveau de la calibration automatique de la caméra réalisée par les logiciels, les valeurs sont très proches voire identiques. En effet, la longueur focale et les coordonnées du point principal ne diffèrent pas de plus de 0.01mm. Une autre calibration a été réalisée avec le logiciel Agisoft Lens et les valeurs trouvées sont une nouvelle fois proches avec un écart maximum de 0.2mm. Ces résultats confirment les données constructeurs et la calibration automatique réalisée par Drone2Map et Pix4D est donc efficace et cohérente.

Plusieurs différences existent entre les deux logiciels au niveau de la création du projet, l'alignement des images et la gestion du géoréférencement. En effet, la gestion du système de coordonnées souhaité en sortie est beaucoup plus difficile sur Drone2Map que sur Pix4D. Pour obtenir un système de coordonnées de sortie différent de celui des images en entrée (qui est très souvent en WGS84) sur Drone2Map, il est obligatoire d'utiliser des points d'appui géoréférencés dans le système voulu. Si le projet ne comporte pas de points d'appui, il faudra transformer les coordonnées des images dans le système souhaité avant de réaliser le calcul. Sur Pix4D, il est possible de choisir le système de sortie dès la création du projet, ce qui est beaucoup plus pratique puisque le logiciel gère automatiquement les transformations de coordonnées. De plus, il est impossible d'utiliser des points de contrôle dans Drone2Map contrairement à Pix4D. Cet aspect est primordial pour contrôler la qualité du nuage de points généré.

Les temps de traitement sont similaires pour l'alignement des images et pour la densification du nuage de points. La densité des nuages de points générés est également proche mais il existe quelques écarts entre les deux nuages. En les comparant au niveau de plusieurs zones sur CloudCompare, logiciel de comparaison de nuages, l'erreur moyenne quadratique entre les deux nuages est de l'ordre de 2 à 5 cm en moyenne. Cet écart n'est pas négligeable, sachant qu'aucun point de contrôle n'est utilisé pour vérifier la qualité du nuage de points issu de Drone2Map.

Enfin, les deux logiciels permettent de créer des orthophotographies d'ensemble d'une zone vue du ciel de la même manière. Néanmoins, il existe une différence importante entre les deux logiciels sur la création d'orthoimage. En effet, sur Drone2Map, il est impossible de choisir un plan de projection pour créer une orthophoto d'une zone spécifique ou d'une façade par exemple. Sur Pix4D, nous pouvons créer un orthoplan à n'importe quel endroit de la scène, notamment aligné par rapport à une surface de référence sur une façade, afin de créer l'orthophoto de cette façade. Drone2Map présente donc un manque important au niveau de la création d'orthophotos et Pix4D reste indispensable pour la création d'orthofaçades.

Compte tenu des différents aspects comparés, il est clair que Pix4D reste indispensable, tant au niveau des contrôles qu'au niveau de la création d'orthofaçades par exemple. Drone2Map n'en est qu'à ses premières versions, et il peut être attendu que l'outil va sensiblement s'améliorer dans les mois à venir. Il reste néanmoins très intéressant pour l'import, l'export et la publication de données directement dans l'environnement ESRI.

4. Analyse des résultats et comparaison des solutions

Plusieurs chantiers concrets ont été réalisés durant l'étude afin de mettre en application des expérimentations qui permettent de montrer le potentiel du drone et de comparer les différentes solutions.

Le premier chantier est un bâtiment en cours de transformation au cœur de Genève. L'objectif est de relever le bâtiment dans son intégralité dans le but de dessiner des plans de façades (Figure 2). En effet, l'architecte partenaire a redessiné le projet en se basant sur des anciens plans datant de la construction du bâtiment il y a plusieurs décennies. L'enjeu pour lui est de confronter ces anciens plans à la réalité du nouveau relevé pour valider son projet. L'enjeu pour le bureau de géomètres est d'étudier l'utilisation du drone Phantom 4 Pro + pour un relevé de façades et d'en déduire la qualité. Concernant les nuages de points calculés, les points de contrôle utilisés permettent de vérifier la qualité du nuage photogrammétrique. Pour valider le processus, des distances 2D entre des points caractéristiques ou points d'appui ont été mesurées sur les orthofaçades générées (Figure 2) et comparées aux distances mesurées au tachéomètre sur le terrain.

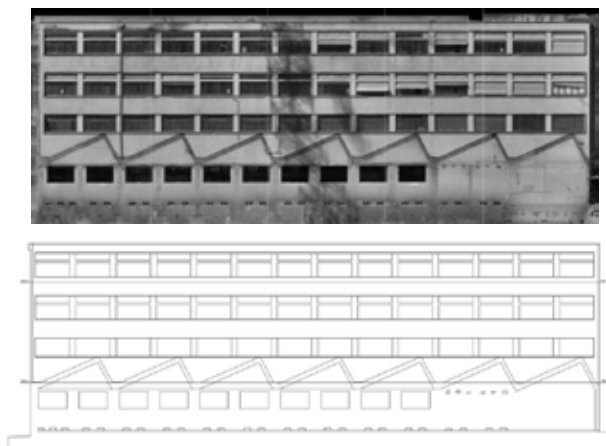


Figure 2 - Exemple d'une ortho façade et son plan associé

Les différents résultats ont permis la validation d'un certain processus de dessin de plans de façade. Cependant, il faut prêter attention aux limites de la méthode qui ont été rencontrées lors des expérimentations.

Le deuxième chantier est une zone de 3ha avec des bâtiments industriels, sur laquelle un plan localisé de quartier est en cours de réalisation pour un futur projet. L'architecte a besoin d'un modèle numérique de terrain et d'informations sur le couvert végétal. Une orthophoto de la zone sera

appréciée pour avoir une vue d'ensemble du site. L'intérêt du projet est sa taille, qui a permis de faire intervenir l'aile volante eBee Plus de SenseFly, drone professionnel, pour la confronter au drone Phantom 4 Pro +, drone grand public. En l'état, il est impossible de programmer des plans de vol et des missions complètes avec le drone de la société MBC ingéo, contrairement à l'aile volante. De plus, elle est équipée d'un système GPS RTK qui ne nécessite pas l'emploi et la mesure de points d'appui pour rattacher le projet. Ces deux facteurs jouent un rôle important dans la planification et la réalisation d'une mission terrain. Le drone professionnel permet un gain de temps et une optimisation du volume de données acquises sur le terrain. En effet, le drone grand public, quant à lui, demande une vigilance accrue car il est piloté manuellement et l'utilisation de points d'appui au sol pour géoréférencer le projet est obligatoire. Les données des deux drones ont ensuite été traitées pour mettre en avant la meilleure solution pour le bureau MBC ingéo en termes de délais, coûts et qualité des résultats.

Le troisième chantier est semblable à la première mission avec des relevés de façades. L'intérêt de ce projet est la comparaison avec un relevé scanner laser terrestre qui va servir de référence pour comparer les nuages de points lasergammétriques et photogrammétriques. La principale différence réside dans la présence de bruit dans le nuage issu du relevé par drone (Figure 3). Le nuage est beaucoup moins propre et demande un temps de calcul plus important pour obtenir une densité identique. Cependant, il comporte certaines zones non mesurables au scanner, comme le toit par exemple. Dans ce cas, le drone peut donc être vu comme un complément très intéressant avec une précision comparable et acceptable.



Figure 3 - Mise en évidence du bruit au niveau du toit sur un nuage de points issu du relevé par drone

5. Conclusion et perspectives

Ce Projet de Fin d'Etudes a permis à la société MBC ingéo de se rendre compte des forces et des faiblesses de son drone DJI Phantom 4 Pro +. Tout d'abord, les aspects législatifs sur l'utilisation du drone à Genève sont maintenant connus. Les activités professionnelles ne posent en général aucun problème pour les autorités compétentes mais des autorisations sont tout de même nécessaires.

Plusieurs chantiers concrets ont permis l'utilisation du drone en situation réelle dans une optique de production. Le partenariat avec le bureau d'architectes a été un vecteur majeur dans la dynamique du projet, puisqu'il a permis de travailler sur des chantiers réels et de confronter les résultats obtenus avec différents acteurs des métiers de la construction.

Concernant les solutions logicielles et matérielles, l'étude a permis de faire un choix concernant le soft de traitement. Il est clair que Drone2Map n'est pas encore au point comparé à un outil comme Pix4D malgré ses fonctions utiles pour des applications dans les systèmes d'informations géographiques par exemple. La société MBC ingéo a aussi pu tirer les conclusions nécessaires à propos de la solution drone la plus efficace et la plus utile pour l'usage qu'elle en aura dans le futur.

Cette étude a été menée dans un but précis en alliant à la fois recherche, production et comparaison de solutions. Le bureau MBC ingéo possède maintenant les réponses à ses questions préalables. L'aspect visuel des modèles 3D est notamment un rendu très intéressant mais qui n'a pas pu être étudié en détail. A l'avenir, il sera important de prêter attention aux différentes utilisations du drone en prévoyant toujours un moyen de contrôle lors de nouveaux travaux.

Mise en place de l'utilisation d'instruments de mesure 3D dans le cadre d'auscultations de barrages

PFE présenté par : **Cyril Cadiou**
Société d'accueil : **Cabinet de Géomètres-Experts dGEma**
Directeur(trice) de PFE : **M. Claude Dhombres**
Correcteurs(trices) : **Mme. Tania Landes**



1. Contexte et objectifs du projet.

Ce PFE est axé sur l'auscultation du barrage des Monts d'Orb. Il s'agit d'un barrage voûte en béton de 200 m de long et 61 m de haut. La voûte étant déjà équipée de cocardes, les méthodes employées ont peu évolué depuis le début des opérations d'auscultations, permettant ainsi une bonne répétitivité des mesures et donc une comparaison des résultats. C'est sur ce principe de mesures comparatives que reposent les auscultations d'ouvrages. Les cocardes font partie d'un réseau de points dont font également partie des cocardes de référence situées en aval du barrage et dont les coordonnées sont connues et considérées fixes. Ces cocardes associées à 4 piliers d'observations en béton forment un réseau d'auscultation. La méthode d'auscultation utilisée repose sur des mesures angulaires, effectuées à l'aide d'un tachéomètre pour le contrôle planimétrique et sur du nivellement direct pour le contrôle altimétrique. Bien que très précises, ces mesures ne permettent de détecter que des mouvements ponctuels et non d'analyser le comportement global du barrage. C'est pour cela qu'il a été décidé de s'intéresser aux nouveaux moyens de mesure ayant vu le jour ces dernières années, à savoir le scanner laser terrestre (SLT) et la photogrammétrie par drone. Le but étant de voir si ces nouvelles technologies peuvent, à terme, remplacer les mesures tachéométriques. L'aspect du traitement des mesures tachéométriques a également fait l'objet de recherches.



Figure 1 : Barrage des Monts d'Orb, vue aérienne [BRL@]

L'un des objectifs de ce projet est de contrôler les méthodes de calculs topométriques actuelles et de proposer une solution plus rigoureuse proposant des analyses statistiques et s'appuyant si besoin sur des logiciels plus performants que Covadis. Nous nous sommes donc intéressés aux différentes possibilités s'offrant à nous en matière de traitement des données, à savoir les logiciels de compensation de réseaux d'auscultation permettant une analyse précise des résultats ainsi que la détection d'erreurs aberrantes dans les mesures et la réduction, voir la suppression, de leurs effets grâce à des tests statistiques et des ajustements dits robustes.

Un autre axe de recherche a concerné la mise en place d'une méthode permettant l'auscultation du barrage voûte des Monts d'Orb à l'aide d'un scanner laser terrestre, en l'occurrence un Faro Focus 3D x330, ainsi qu'une méthode faisant intervenir la photogrammétrie par drone pour effectuer une analyse globale du comportement de la voûte. Une analyse des résultats sera effectuée en les comparant avec les résultats obtenus à l'aide d'une auscultation tachéométrique. Le SLT ne permet pas de calculer les coordonnées des cocardes se trouvant sur la voûte du barrage, nous allons donc comparer les mouvements observés avec le tachéomètre et le SLT entre mai 2016 et janvier 2017. La photogrammétrie par drone, quant à elle, permet de déterminer les coordonnées des cocardes. N'ayant qu'une série de mesures effectuées par le drone, nous ne pouvons pas comparer les mouvements de la voûte entre deux époques de mesures. Nous comparerons donc directement les coordonnées des cocardes issues des mesures tachéométriques et de la photogrammétrie

2. Acquisition des données.

Tachéomètre : L'auscultation tachéométrique est basée sur la méthode des intersections de plans. Dans ce cas, aucune mesure de distance n'est effectuée. Le tachéomètre, un Leica TCA1800 ayant une précision angulaire de 0.3 mgon, est mis en station sur les 4 piliers d'observation du réseau d'auscultation et les mesures angulaires sont ensuite effectuées en suivant le principe du tour d'horizon. Au mois 5 mesures sont effectuées sur chaque cocarde permettant de réduire le risque de faute dans les mesures et de garantir ainsi la qualité de ces dernières. On procède également à un double retournement afin d'éliminer les erreurs systématiques liées aux défauts de l'appareil.

SLT : Une série de mesure a été effectuée en mai 2016 (avant le PFE) et une autre en janvier 2017 (pendant le PFE). Les mesures du SLT ont été faites depuis 5 stations du côté aval du barrage : 2 stations sur la pente de la rive gauche, 1 station centrale et 2 stations sur la pente de la rive droite. Ces 5 stations sont nécessaires pour avoir un bon recouvrement du barrage tout en étant proche de lui et en ayant des angles d'incidences¹ faibles. L'augmentation de l'angle d'incidence entraîne une baisse de la précision des mesures de distance. Des sphères ont également été utilisées en janvier 2017 pour effectuer une consolidation² basée sur cibles.

Drone : Le drone utilisé est un Phantom 4 Pro équipé d'une caméra de 20 mégapixel avec un capteur de 1 pouce et une focale fixe de 8.8 mm. A partir de ces caractéristiques, un plan de vol a été établi de façon à ce que les cocardes situées sur le barrage, d'environ 1 cm de diamètre, soit facilement visibles sur les photos. Les cocardes serviront au géoréférencement du modèle photogrammétrique. Le plan de vol est composé de plusieurs vols verticaux, à cause de la verticalité de l'objet, et comporte des prises de vue perpendiculaires à la voûte ainsi que des prises de vue obliques afin de réduire la déformation du modèle appelée « effet de dôme ». Un recouvrement de 80% entre deux prises de vue successives a également été prévu.

Prises de vue perpendiculaires à 10 m de la voûte	- Taille pixel objet : 2.7 mm - Emprise sur l'objet : 15 m x 10 m - Un vol vertical tous les 3 m : 67 vols verticaux pour couvrir les 200 m du barrage - 1 prise de vue tous les 2 m suivant l'axe vertical
Prises de vue obliques à 20 m de la voûte	- Taille pixel objet : 5.4 mm - Emprise sur l'objet : 30 m x 20 m - Un vol vertical tous les 6 m : environ 35 vols verticaux pour couvrir les 200 m du barrage - 1 prise de vue tous les 4 m suivant l'axe vertical

Tableau 1 : Plan de vol du Phantom 4 Pro

3. Traitement des données.

3.1. Compensation du réseau d'auscultation

Le traitement des observations tachéométriques a été effectué à l'aide de 3 logiciels de compensation : Covadis, Jag3D et CoMeT. Ils utilisent tous le principe des moindres carrés mais les deux derniers permettent d'effectuer des calculs dont les résultats peuvent être analysés dans le détail, notamment grâce à des tests statistiques.

- test global (ex : test du chi-deux) : permet de détecter la présence d'erreurs aberrantes dans les mesures. En revanche, il ne permet pas de les localiser.
- tests individuels (ex : résidus normés) : appliqués à toutes les observations pour détecter lesquelles sont entachées d'une erreur aberrante.

Jag3D et CoMeT ont clairement mis en évidence la présence d'une erreur aberrante dans l'observation angulaire effectuée depuis le pilier 1111 sur la cocarde de référence 101.

¹ Angle entre la direction du faisceau laser du SLT et la normale à l'objet au point d'impact du laser.

² Recalage de plusieurs nuages de points acquis à une même époque et représentant le même objet sous différents angles de vue.

Actif	Instrument...	Cible-ID	Tprio	Tpost	T > Φ^{-1}
☒	1111	101	26.040695	30.047424	☒
☒	1111	2	0.069267	0.054704	☐
☒	1111	3	0.284650	0.225394	☐

Tableau 2 : Mise en évidence d'une erreur dans l'observation de 1111 vers 101 [Jag3D]

Covadis, quant à lui, ne présente que les 3 écarts angulaires maximum en fin de compensation. L'écart maximum correspondait également à l'observation 1111 sur 101 mais la décision de supprimer ou non l'observation appartient à la personne en charge des calculs. La décision repose sur l'expérience de cette personne et non pas sur une analyse statistique.

3.2. Traitement des mesures du SLT

Consolidation : Deux méthodes de consolidation des nuages ont été utilisées lors des calculs, l'une basée sur l'utilisation de cibles (sphères blanches) et l'autre basée sur l'utilisation des nuages de points. Les deux méthodes ont montré des résultats similaires. Le logiciel SCENE de Faro a été utilisé seulement pour la consolidation basée sur sphères alors que le logiciel RealWorks de Trimble a été utilisé pour les deux consolidations.

	Consolidation basée sur sphères		Consolidation basée sur les nuages
	SCENE	RealWorks	RealWorks
Ecart ³ moyen sur l'ensemble des sphères	2.5 mm	3 mm	
Ecart moyen entre les nuages			3 mm

Tableau 3 : Comparaison des consolidations basées sur sphères et basées sur les nuages

La consolidation basée sur les nuages sera préférée à celle basée sur les sphères car la mise en place de ces dernières prend beaucoup de temps à cause de la nature du terrain (pentes très raides et sol glissant). De plus le recouvrement moyen entre les nuages est de 66%, ce qui est suffisant pour une consolidation basée sur les nuages.

Comparaison Mai 2016 – Janvier 2017 : Afin d'étudier les mouvements de la voûte du barrage, le nuage de point issu des mesures de janvier 2017 a été comparé au nuage de points de mai 2016. L'idée était de caler les 2 nuages l'un par rapport à l'autre à l'aide des parties des nuages représentant des éléments supposés stables. Cela concerne les culées du barrage et toutes les parties maçonnées se trouvant aux pieds du barrage. Ces éléments sont bien répartis et encadrent bien le barrage. En se basant sur cette hypothèse de stabilité, les 2 nuages peuvent être recalés l'un par rapport à l'autre en utilisant l'algorithme ICP⁴ du logiciel RealWorks en ne prenant en compte que les zones stables des nuages. A l'issue de ce calage, l'erreur de nuage à nuage est de 3 mm et le recouvrement est de 67%.

La comparaison des deux nuages indique la présence de mouvements allant de 3.0 mm vers l'amont à 33.1 mm vers l'aval. Ces valeurs ont été comparées à celles obtenues à partir des mesures tachéométriques et les écarts sont relativement importants. Ils varient entre -5.3 mm et 20.7 mm et sont totalement aléatoires. La comparaison avec les mesures tachéométriques a mis en évidence une réelle imprécision des mesures du SLT. Plusieurs raisons peuvent en être la cause :

- Calage des nuages de mai 2016 et janvier 2017 basé sur une hypothèse non vérifiée de stabilité des environs du barrage ;
- Précision insuffisante du Faro Focus 3D x330 pour un chantier d'auscultation ;
- Imprécision des nuages de points issus de chaque station associée à l'imprécision de la consolidation ainsi qu'à celle du géoréférencement entre les deux époques de mesure.

³ Écart de position du centre d'une sphère dans deux nuages distincts

⁴ Iterative Closest Point

3.3. Traitement des mesures au drone

Calibration : il est important de connaître les distorsions du capteur de la caméra car elles génèrent un désalignement du centre de perspective, du point image et du point objet. Le principe de colinéarité n'est alors plus respecté. Ces distorsions ont été modélisées à partir d'une pré-calibration effectuée en laboratoire ainsi qu'à partir d'une calibration in-situ effectuée grâce aux mesures faites sur le terrain. Pour cette dernière, 9 points d'appui (cocardes) répartis sur l'ensemble du barrage, et dont les coordonnées ont été déterminées à partir des mesures tachéométriques, ont été utilisés. La valeur maximale de distorsion est de 45.06 μm pour la pré-calibration et 37.70 μm pour la calibration in-situ. Cela montre une certaine instabilité du capteur lors du transport et au cours su temps.

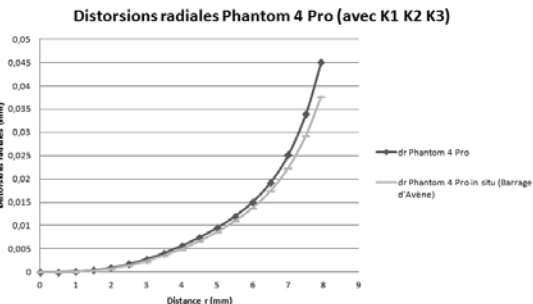


Figure 2 : Distorsions radiales du Phantom 4 Pro

Géoréférencement du modèle : Le modèle a été géoréférencé à l'aide des 9 points d'appui utilisés pour la calibration in-situ. 16 points de contrôle ont ensuite été utilisés pour vérifier la précision du modèle. Les coordonnées de ces 16 points ont été calculées par le logiciel Photoscan Pro et ont ensuite été comparées aux coordonnées vraies issues des mesures tachéométriques. Le tableau suivant présente les résultats en utilisant les deux calibrations.

	Pré-calibration	Calibration in-situ
Erreur moyenne sur les points d'appui	5.9 mm	1.9 mm
Erreur moyenne sur les points de contrôle	9.6 mm	3.0 mm
Ecart type	10.0 mm	3.2 mm

Tableau 4 : Erreurs moyennes sur les points d'appui et de contrôle

On privilégiera une calibration in-situ à une pré-calibration lorsque la situation le permettra.

4. Conclusion et perspectives

La comparaison des différents logiciels de compensation a pu montrer qu'une meilleure compréhension des résultats était possible à l'aide de CoMeT et Jag3D. Ces derniers permettent d'étudier les résultats dans le détail quand Covadis ne présente qu'une liste des 3 plus grands écarts à l'issue de la compensation

Nous avons pu nous rendre compte que les mesures du SLT ne permettaient pas de déterminer avec précision les mouvements du barrage. Bien que présentant des comportements intéressants au niveau de zones spécifiques du barrage (ex : joints entre les plots), le trop gros écart avec les résultats obtenus avec le tachéomètre nous pousse à nous interroger sur ces mouvements détectés. Le relevé photogrammétrique semble plus prometteur, les résultats ont montré qu'avec de nouvelles mesures permettant de faire une étude comparative, nous pourrions détecter des mouvements à partir de 3 mm.

Les mesures au drone sur un barrage étaient une première pour dGema mais aussi pour le pilote du drone. A l'avenir, la technique pourrait être améliorée en effectuant des vols entièrement manuels, et donc plus proches de la voûte du barrage, ainsi qu'en s'adaptant aux contraintes liées à la luminosité. L'observation visuelle est très importante dans le domaine de l'auscultation de barrage, les mesures effectuées par drone sont donc très intéressantes car elles permettent d'avoir une vue du barrage à l'instant des mesures, chose que ne permettent pas les mesures au tachéomètre. Les images peuvent être archivées et traitées longtemps après la prise de mesures. En plus de l'étude des mouvements, on pourrait à l'avenir étudier la piste de la cartographie d'anomalies.

Analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'humidité du sol basée sur des mesures spectrales

PFE présenté par : **Perrine Mohr**
Société d'accueil : **KIT Karlsruhe Institut für Technologie**
Technologie
Directrice de PFE : **Mme. Dr.rer.nat Sina KELLER**
Correcteurs(trices) : **M.Prof.Dr.-Ing. Stefan HINZ**
Mme. Dr.rer.nat. Sina KELLER



1. Contexte et objectifs du projet

La connaissance de l'humidité du sol joue un rôle important dans de nombreux domaines, telles que l'agriculture, la protection de l'environnement et l'hydrologie. Elle sert à la compréhension des cycles locaux de l'eau, car à l'aide de l'humidité du sol, le stockage de l'eau dans le sol et le parcours d'écoulement peuvent être décrits. Des méthodes de saisie classiques, telle que la détermination gravimétrique de l'humidité du sol, saisit l'humidité du sol sur un échantillon d'une taille de quelques centimètres seulement. La télédétection représente une alternative plus efficace et meilleure marché pour déterminer l'humidité du sol, c'est pourquoi des chercheurs se penchent sur ce thème depuis 1980. Lors de la recherche des données spectrales, ils ont découvert qu'en cas d'augmentation de l'humidité du sol, la réflectance du sol diminue. En outre, une augmentation de l'humidité du sol entraîne une baisse de la température.

Dans ce mémoire, ces corrélations seront examinées et analysées, la priorité étant mise sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'humidité du sol basée sur des mesures spectrales. Les recherches pour déterminer l'humidité du sol à l'aide de données spectrales ayant été réalisées jusqu'à présent, ont eu lieu en laboratoire dans des conditions idéales, la corrélation des données s'effectuant la plupart du temps par des analyses de régression entre les mesures spectrales et les données de référence.

Aucune analyse exacte n'a été faite, pour savoir si les découvertes faites lors des mesures en laboratoire se sont confirmées dans la pratique et si la détermination de l'humidité du sol à l'aide de mesures spectrales dans des conditions réelles est possible. Une combinaison de mesures spectrales et des données thermales infrarouges pour évaluer l'humidité du sol n'a également pas été effectuée jusqu'à présent.

Les mesures, qui serviront de base à ce mémoire, ne seront pas prises en laboratoire, contrairement aux recherches précédentes, mais sous des conditions réelles sur le terrain. Ce faisant, un lysimètre sera arrosé lors de quatre campagnes de mesure et la dynamique temporelle sera saisie à l'aide d'un spectromètre de terrain et d'une caméra infrarouge thermale. Comme données de référence pour l'humidité du sol, des détecteurs TDR (Time Domain Reflectory) étant répartis spatialement seront utilisés, en associant ceux-ci aux données spectrales par des analyses de régression. Les détecteurs TDR répartis spatialement permettent d'analyser la dynamique spatiale. En enregistrant de surcroît la température de la surface du sol, on déterminera si une combinaison des données spectrales et infrarouges thermiques entraîne une amélioration des définitions de l'humidité du sol.



Figure 1: campagne de mesure

2. Systèmes de saisie employés, montage expérimental et campagnes de mesures

Dans ce mémoire, la dynamique spatio-temporelle de l'humidité du sol est examinée à l'aide de systèmes de télédétection, car ces derniers présentent de nombreux avantages, comme par exemple une prise d'une région choisie meilleure marché et avec un investissement de temps comparativement inférieur.

Contrairement aux recherches effectuées jusqu'à présent, la collecte des données ne se fait pas en laboratoire mais dans des conditions réelles. En plus de la collecte des signatures spectrales à l'aide d'un spectromètre de terrain non imagé, la surface d'un lysimètre est en outre saisie au moyen d'une caméra infrarouge thermique. Dans le sous-chapitre 2.1, les systèmes de saisie seront présentés plus précisément.

Une autre particularité de ce mémoire est l'examen de la dynamique spatiale qui est effectué par la mise en place de différents détecteurs hydrologiques et météorologiques, répartis spatialement sur le lysimètre. Ces détecteurs servent de données Ground Truth aux mesures observées par les détecteurs de télédétection. Dans les mémoires précédents, seule la surface comme Ground Truth a été prise en compte, mais pas la variabilité spatiale dans les différentes profondeurs d'un sol.

2.1 Systèmes de saisie employés

Spectromètre de terrain: la saisie des rayonnements électromagnétiques s'effectue dans ce mémoire à l'aide d'un spectromètre de terrain dans la zone de 350 à 2500 nm. Les signatures spectrales sont représentées en fonction de la longueur d'onde. Le spectromètre est un FieldSpec3. Contrairement aux détecteurs de télédétection imagés, il s'agit chez les spectromètres de terrain de systèmes non imagés, qui possède un angle d'ouverture solide et relativement étroit, et ne saisissent ainsi ponctuellement qu'un extrait limité de la surface. Des détecteurs de télédétection imagés, par exemple des caméras hyperspectrales, saisissent la surface de la terre extensivement et sont la plupart du temps utilisées dans des avions. Les données spectrales mesurées avec des spectromètres de terrain et les découvertes qui en résultent, se retransmettent toutefois sur des détecteurs de télédétection traditionnels.

Caméra infrarouge thermique: la caméra infrarouge thermique FLIR-Tau2 640 sert à l'observation thermographique d'une surface. Le système de caméra travaille dans l'infrarouge thermal du spectre électromagnétique et enregistre des rayonnements dans la zone de 7,5 à 13,5 μm . La résolution géométrique de la caméra est 640 x 512 pixels. La caméra enregistre une valeur de température par pixel, possède une fréquence d'images de 30 Hz et un objectif d'une distance focale de 13 mm.

TDR-Sensoren: Les détecteurs TDR servent de données de référence aux données spectrales et infrarouges thermiques et à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'humidité du sol dans cinq différentes profondeurs du sol. Ce faisant, le taux d'humidité du sol est enregistré.

D'autres détecteurs météorologiques, comme le rayonnement solaire, la température de l'air et l'humidité de l'air, servent à la saisie d'événements externes.

2.2 Montage expérimental

Pour ce mémoire, un propre lysimètre a été élaboré. La surface du lysimètre est saisie par le spectromètre de terrain et la caméra infrarouge thermique, lors de quatre campagnes de mesure différentes. En plus, des détecteurs supplémentaires ayant été fixés, mesurent des données hydrologiques et météorologiques. Un dispositif à membranes est employé pour l'arrosage pulsé du sol, grâce auquel l'humidité du sol est activement variée.

Un lysimètre se compose d'un échantillon du sol, avec lequel le régime d'eau est mesurable. En ce qui concerne la surface de l'échantillon du sol, il s'agit d'un sol nu, sans végétation. Le lysimètre a une hauteur de 20 cm et un diamètre de 30 cm. L'échantillon a été prélevé à Waldbronn (48°56'19.3 N, 008°29'16.5 E). Il se compose de 4,78% de sable, 72,66% de limon et 22,66% d'argile. Il s'agit donc d'un limon très argileux (U14).

2.3 Campagnes de mesures

Sur la figure 2, la collecte des données est représentée graphiquement pendant une campagne de mesures. A gauche, on voit le lysimètre, se composant d'un échantillon du sol. Lors des séries de mesures, les systèmes de saisie expliqués précédemment sont utilisés. Pendant les campagnes de mesures, la caméra infrarouge thermique (caméra IR) et le spectromètre de terrain sont positionnés de telle sorte qu'ils saisissent l'humidité en surface du lysimètre. Les détecteurs météorologique et hydrologique se composent d'un appareil de mesure du rayonnement solaire, de détecteurs de température et d'humidité atmosphérique et de détecteurs TDR. Après la collecte des données, l'analyse des données brutes est effectuée, à partir desquelles les résultats sont ensuite déduits.

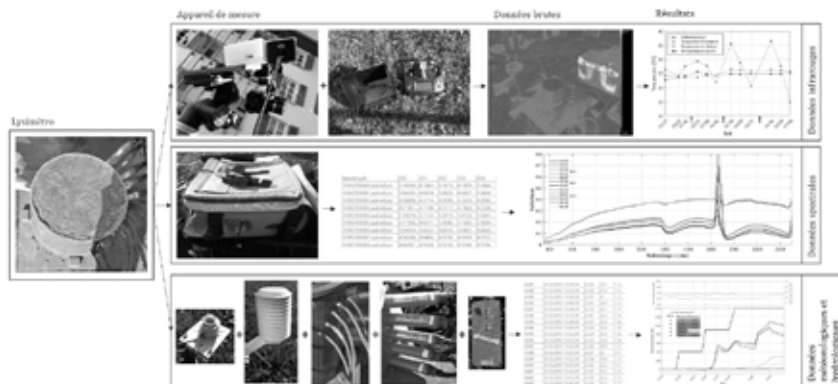


Figure 2: Montage expérimental à gauche : lysimètre, en haut : caméra infrarouge, au centre : spectromètre de terrain, en bas : détecteurs météorologique et hydrologique.

Chaque campagne de mesures comporte plusieurs séries de mesures. Dix mesures individuelles de la surface du lysimètre sont effectuées par série de mesures avec le spectromètre de terrain, à la cadence de environ 7 minutes et la surface est filmée en infrarouge thermal. Les détecteurs hydrologiques et météorologiques saisissent en continu des données avec une cadence de 3 minutes. Après trois séries de mesures, un arrosage pulsé du sol a lieu. Ces trois séries forment ainsi une phase d'arrosage.

3. Traitement des données

Le traitement et la visualisation des données a été effectué par Matlab.

Données TDR :

- Tri temporel des données
- Calcul des bilans hydriques

Données spectrales :

- Conversion de DN en réflectance absolue
- Correction spline
- Filtre de lissage (Savitzky Golay)
- Calcul de la moyenne pour chaque série de mesures
- Calcul des indices
- Etablir un propre index
- Matching temporel avec l'humidité du sol
- Entartrage pour la corrélation de l'humidité du sol avec le propre index

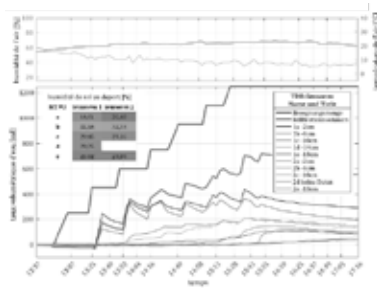


Figure 3 : bilans hydriques du 25.03.17

Données infrarouges thermales :

- Création d'images à partir des séquences vidéo
- Elaboration de masques
- Calcul de la valeur de température moyenne
- Comparaison de la température thermique avec la température d'aire et le rayonnement solaire

4. Resultats, conclusion et perspectives

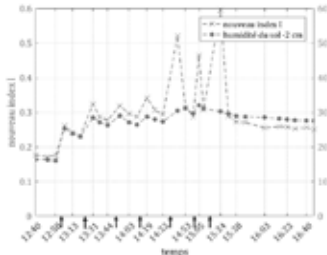


Figure 4: campagne de mesure du 25.03.17, matching temporel

Toutefois, ce périmètre est le plus important pour les mesures spectrales, car les mesures spectrales ne saisissent qu'environ un centimètre de la couche supérieure. Cependant, pour obtenir des données de référence de la surface, deux solutions possibles ont été présentées. D'une part, les données TDR ont été parallèlement superposées à des données spectrales à la surface, à une profondeur de deux centimètres. Ce faisant, le taux d'eau du centimètre supérieur est toutefois négligé. D'autre part, une évaluation pour des recherches ultérieures a été présentée, pour lesquelles il faut une balance et un bac collecteur, en plus du système de mesure de ce mémoire. Au moyen de la balance, le taux d'eau évaporé peut être déterminé et à l'aide du bac collecteur, l'écoulement de la surface peut être enregistré. Avec l'information de ces taux, on peut recalculer la quantité d'eau disponible dans le centimètre supérieur de l'échantillon du sol.

Une corrélation entre la température en surface et l'humidité en surface était difficile. Une baisse de la température entre la première et la dernière mesure pendant une journée est visible. De plus, la plupart du temps une augmentation après un arrosage et une diminution peu après est visible. L'augmentation correspond à la température d'eau. La température diminue peu après, car l'eau a une meilleure conductivité thermique. Pour des recherches supplémentaires, il faudrait de plus amples informations, tels que la capacité thermique spécifique du sol, la température de l'eau, la propriété du sol et le comportement d'infiltration du sol, car chaque sol stocke et achemine la chaleur différemment.

Pour un examen plus poussé de l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'humidité du sol basée sur des données infrarouges spectrales et thermales, il est ainsi recommandé d'installer une balance et un bac collecteur au montage expérimental. Ce faisant, l'humidité de la surface peut être définie et les indices peuvent être transformés en pourcentage d'humidité du sol. Pour l'emploi des données infrarouges thermales, des coefficients thermiques supplémentaires, comme par exemple la capacité thermique, sont nécessaires. Un autre aspect intéressant serait d'examiner le comportement d'infiltration sur différentes variétés de sol et de les catégoriser, pour pouvoir déduire les effets sur la dynamique spatiale à l'aide d'une série temporelle. Lors de recherches futures, les découvertes faites dans ce mémoire peuvent être transposées aux détecteurs de grandes surfaces.

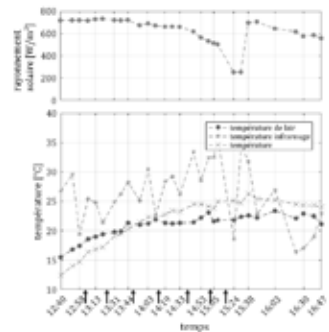


Figure 5 : Comparaison de température

Multi-Laserscanner: integration, calibration and evaluation for an Unmanned Aerial System

PFE présenté par : **Nicolas Reydel**

Société d'accueil : **Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung**

Directeur(trice) de PFE : **Boris Jutzi**

Correcteurs(trices) : **Tania Landes**



1. Multi-Laserscanner: integration, calibration und evaluation for and Unmanned Aerial System

Introduction :

Lors de ce projet, deux scanners laser ont été intégrés, calibrés et évalués pour l'utilisation mobile d'un „Unmanned Aerial System“. Le dispositif final est composé de deux scanners laser Hokuyo UTM-30-LX, d'un drone DJI Matrice 100, d'une antenne GNSS et de quelques caméras stéréo. Les scanners laser sont installés l'un horizontalement sur le haut du drone, l'autre à l'arrière pour la mesure verticale. Les mesures avec le drone permettront d'avoir d'une part un champ de vision plus grand lors de mesures à l'extérieur et d'autre part une mesure plus rapide grâce à ce système.

La structure du drone :

Pour ce projet, les différents capteurs seront intégrés à un drone de type DJI Matrice 100. Ce drone est un « *quadcopter* », spécialisé pour le développement. Par défaut, le drone est équipé d'une antenne GNSS, d'un baromètre, d'une IMU (Inertial Measurement Unit), de gyroscopes, ... Il est aussi possible d'y rajouter des caméras. Le poids maximal du drone ne doit pas dépasser 3,6 kg, ce qui limite le nombre de capteurs qu'il est possible d'embarquer. Les scanners laser sont de types Hokuyo UTM-30-LX. Ce sont des scanners laser *single-pulse* de taille 60x60x87 mm et peuvent mesurer jusqu'à 30 m de distance. Ces scanners laser mesurent avec une fréquence de 40 Hz avec un FOV de 270°. Ainsi pour chaque ligne de scan, on obtient 1081 mesures (une mesure tout les 0.25°). Sous 10 m, la précision de mesures est de 1 cm, sinon jusqu'à 30 m, la précision est de 3 cm.



Figure 1: Photo du drone avec les capteurs

Calibration

Pour obtenir la position relative des capteurs, il a fallu mener une calibration. Dans ce projet, trois types de calibration ont été testés :

- Calibration tactile: des marqueurs rétro-réfléchissants sont posés sur les appareils. La position de ces marqueurs est mesurée avec un „Tracking-System” et ainsi est obtenue la position relative des appareils.
- Calibration semi-automatique: ces mêmes capteurs sont disposés autour d'un scanner laser. Leurs positions seront ainsi mesurées avec le „Tracking-System” et le scanner laser. Avec ces informations, il est possible de calculer le centre de mesure du scanner laser.
- Calibration automatique: le nuage de points calibré de façon rapide est comparé à une référence mesurée au scanner laser terrestre. Par compensation des distances entre nuages de points, une nouvelle transformation est définie.

La fusion de la calibration tactile et de la calibration semi-automatique permet d'obtenir le même résultat que la calibration automatique.

La calibration tactile permet d'obtenir la position relative des différents éléments du drone. Ainsi, il est possible de définir les systèmes de coordonnées locales à chaque fois. A partir de ces informations, on pourra calculer les différentes transformations entre chaque capteur (Figure 2).

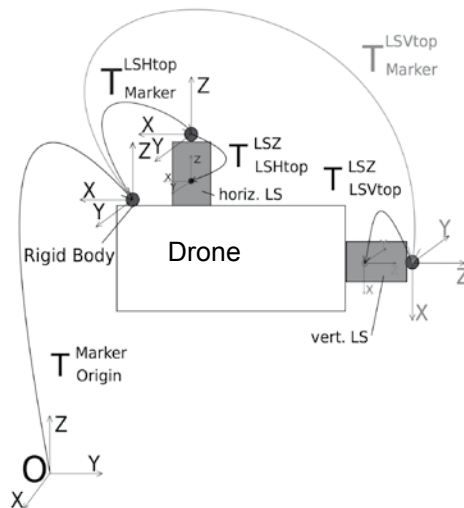


Figure 2: Schéma du UAS avec transformation

La calibration semi-automatique permet de définir précisément le centre du scanner laser, la position exacte n'étant pas donnée dans les spécifications. Plusieurs marqueurs rétro-réfléchissants sont placés autour du scanner laser. Ils seront mesurés à la fois avec un « Tracking-System » comme référence avec le scanner laser. On pourra ainsi en déduire la position du centre de mesure du scanner laser, en utilisant l'intensité pour définir la position des marqueurs (Figure 3).

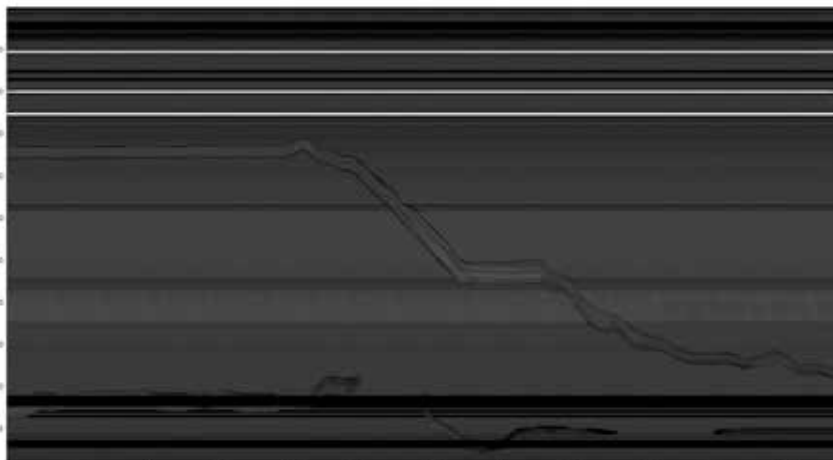


Figure 3 : Intensité mesurée. En abscisse : les lignes de scan et en ordonnée l'ouverture de l'angle (1-1081). Les lignes blanches sont trois marqueurs rétro-réfléchissants.

La calibration automatique utilise deux nuages de points, l'une à partir d'un scanner laser terrestre en temps que référence, l'autre à partir d'une des mesures effectuées avec le drone. On utilisera une calibration approximative pour générer ce nuage de points. Lors de cette calibration, on comparera les différences des distances entre les deux nuages de points. Par itération, on cherchera à minimiser ces différences en modifiant, à chaque itération la calibration utilisée. La Figure 4 montre les différents nuages de points utilisés. Au final, on comparera les deux nuages de points à gauche.

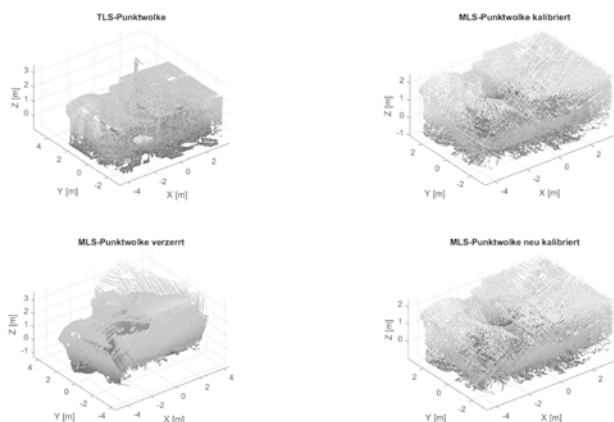


Figure 4 : Calibration automatique. En haut gauche, le nuage de points obtenu avec le scanner laser terrestre. En haut à droite, un nuage de points obtenu avec une calibration correcte. En bas à gauche, le nuage de points obtenu avec une calibration approximative. En bas à droite, les résultats de la calibration automatique.

Résultats

Les mesures ont été effectuées en site interne et externe. Pour obtenir un nuage de points, il faut connaître la trajectoire du drone pendant la mesure. Pour les mesures à l'intérieur, on utilisera le „Tracking-System“ avec des marqueurs sur le drone (Figure 5).

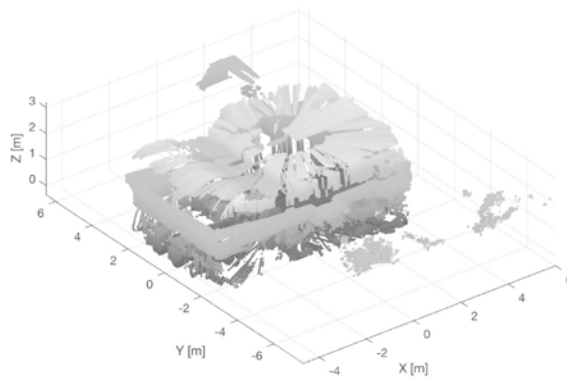


Figure 5: Nuage de points d'une salle

Pour ce qui est de la mesure à l'extérieur, la trajectoire est calculée à partir des données GNSS et de l'IMU. Les mesures n'étant pas trop précises, le nuage obtenu possède quelques erreurs (Figure 6).

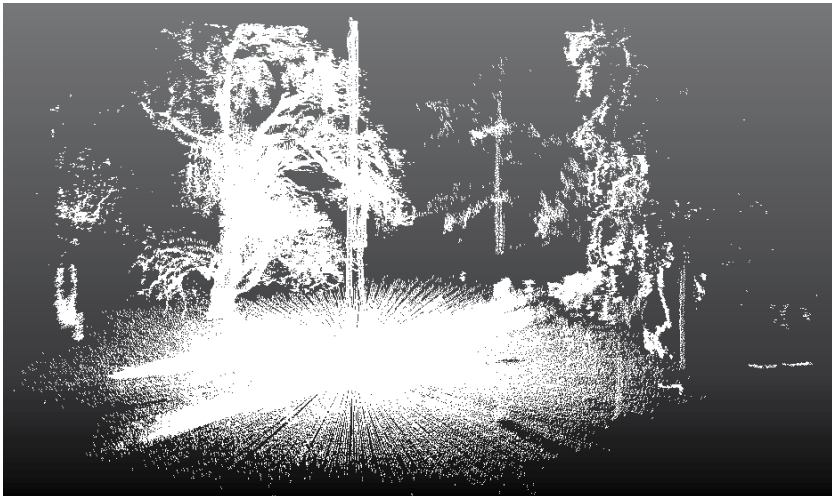


Figure 6: Nuage de points d'un arbre

Conclusion

Le drone avec scanners laser fonctionne correctement et est opérationnel. Pour augmenter la précision de mesure à l'extérieur, il serait intéressant d'y ajouter des caméras, pour obtenir une trajectoire différente.

Plus d'infos : <http://topographie.insa-strasbourg.fr>

Contact

jdt2017@insa-strasbourg.fr

Avec l'aide de Tania Landes

Maître de conférences INSA Strasbourg
tania.landes@insa-strasbourg.fr
tél. 03 88 14 47 34

INSA Strasbourg

Spécialité topographie
24 boulevard de la Victoire
67084 Strasbourg Cedex
tél. 03 88 14 47 00
www.insa-strasbourg.fr

INSA


GÉOMÈTRE-EXPERT
CONSEILLER VALORISER GARANTIR


aft