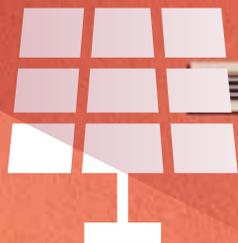


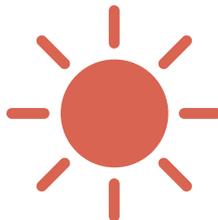
## 17<sup>e</sup> JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 23 AU 25/09/20

La topographie au service  
de l'environnement





# Sommaire



Mot du directeur —————> p. 4

Programme —————> p. 5

Salon des exposants —————> p. 6

Conférence: « La topographie  
au service de l'environnement » —————> p. 7

Équipe des Journées  
de la topographie 2020 —————> p. 8

Ordre de passage des PFE —————> p. 9

Résumés des PFE —————> p. 15

# Mot du directeur

Depuis 2003, les Journées de la topographie (JDT) constituent à l'INSA Strasbourg un événement majeur de la rentrée. Il s'agit bien évidemment d'un moment fort pour l'ensemble des parties prenantes de la spécialité topographie [collègues impliqués dans la formation, élèves, professionnels justes diplômés ou plus aguerris, entreprises, Ordre...] mais aussi un moment qui a su acquérir une visibilité bien au-delà de l'établissement au cours des années.

En raison de la situation sanitaire qui a rendu incertaine la tenue d'événements physiques à l'automne, les JDT se font cette année sous un format 100 % virtuel. Ce format distanciel est une opportunité d'accroître le public potentiel, pour faire rayonner la formation d'ingénieur topographe, au sens large, sans limite autre que celle d'internet lui-même.

Malgré le format inédit de cette année, le programme aura la même richesse que les éditions passées. Les 17<sup>e</sup> Journées de la topographie 2020 sont évidemment marquées par les soutenances de projets de fin d'études (PFE), dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie. Elles sont aussi l'occasion d'échanger avec des entreprises lors d'un salon des exposants qui sera « virtuel », permettant aux professionnels et aux étudiants de découvrir les activités des entreprises.

L'organisation des JDT se fait toujours avec l'aide des professeurs et d'étudiants topographes de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> années de l'INSA Strasbourg. Cette mobilisation qui, pour les étudiants, mélange les promotions, facilite les passages de témoins et contribue à un événement dont la qualité est régulièrement saluée. Les partenariats avec l'Ordre des géomètres-experts (OGE) et avec l'Association francophone de topographie (AFT) prennent cette année un sens particulier. Tous relèvent un défi organisationnel particulier.

Le thème de cette année s'inscrit dans une problématique mondiale majeure : « La topographie au service de l'environnement ». Le topographe, en tant qu'expert de la mesure, est un acteur incontournable de la modélisation de l'existant, qui constitue la base pour l'aménagement des espaces. Ce thème sera abordé par des experts selon plusieurs échelles.

Je tiens à remercier tous les acteurs, à savoir les étudiantes et étudiants, l'équipe pédagogique, technique et administrative qui les encadre, ainsi que les professionnels qui leur font confiance, pour leur engagement au service d'une profession dont le dynamisme ne se dément pas.

# Programme

100 % VIRTUEL

	MERCREDI 23 SEPTEMBRE	JEUDI 24 SEPTEMBRE	VENDREDI 25 SEPTEMBRE
8 h			
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE) <b>JURY 1</b> <b>JURY 2</b>	Soutenances de PFE <b>JURY 1</b> <b>JURY 2</b> <b>JURY 3</b>	Soutenances de PFE <b>JURY 1</b> <b>JURY 2</b> <b>JURY 3</b>
10 h			
11 h			
12 h	Délibération et annonce des résultats	Délibération et annonce des résultats	Délibération et annonce des résultats
13 h	Soutenances de PFE <b>JURY 1</b> <b>JURY 2</b>	Salon des exposants 13 h - 17h30	
14 h			Conférence: « La topographie au service de l'environnement »
15 h			
16 h			Présentation du métier de géomètre-expert
17 h			
18 h		Conseil de l'Association francophone de topographie (AFT) (Réservé aux membres) 17 h - 20 h	Clôture des Journées de la topographie
19 h			

# Salon des exposants

JEUDI 24 SEPTEMBRE  
DE 13 H À 17H30



Comme le veut la tradition des Journées de la topographie, nous reconduisons le salon des exposants cette année aussi. Toutefois, au vu de la situation sanitaire instable, l'équipe organisatrice a fait le choix de dématérialiser ce salon !

Vous aurez la possibilité de prendre rendez-vous avec chacune des entreprises participantes sur des « stands numériques » afin de discuter comme lors d'un salon conventionnel, mais sans avoir à sortir de chez vous ! Et, comme l'année dernière, un petit jeu avec récompense sera proposé pendant le salon.

## Entreprises du salon des exposants



Colas



Leica  
Geosystems



Compass  
Navigation Europe  
SPRL



Sogelink



Faynot Industrie



Teria



Geofit Group



3WTopo



Geosat



AFT



Geotopo



OGE

Invités  
d'honneur

# Conférence : « La topographie au service de l'environnement »



**VENDREDI 25 SEPTEMBRE  
DE 14 H À 16 H**

Développement durable, écologie, respect de l'environnement... Ces mots sont souvent utilisés en politique et font écho à la volonté qui est apparue depuis trente ans de préserver ce qui reste de notre planète. Cette volonté s'est traduite par des actions que nous avons tous pu observer à différentes échelles: tri sélectif, passage progressif à l'énergie renouvelable... pour ne citer que ces deux-là. Ces actions ont été plus ou moins bien suivies et accueillies par les citoyens, mais la volonté de changer les choses est restée.

Tous les corps de métiers agissant sur les territoires et l'urbanisation ont donc vu leurs missions se compléter d'un aspect environnemental. Notre cœur de métier a bien entendu été affecté par cette volonté, car nous sommes des acteurs directs ou indirects de l'aménagement territorial à bien des niveaux. C'est littéralement dans l'étymologie du mot « topographie » (du grec *topos*, lieu et *graphein*, dessiner) !

Cependant, dans les faits, comment cela se traduit-il ? Comment est-ce que la topographie peut-elle se mettre au service de l'environnement et des concepts qui en découlent ? Pour répondre à cette question, nous avons demandé à quatre professionnels d'intervenir lors de la conférence de cette année et de nous éclairer sur les degrés d'action de la topographie dans le domaine de la préservation de l'environnement. Le sujet sera abordé à différentes échelles, allant du niveau local au niveau national.

## **Intervenant-e**

- Nathalia Philipps, doctorante CIFRE en climatologie urbaine à l'Eurométropole de Strasbourg
- Philippe Slisse, chef de projet SIG3D à l'Eurométropole de Strasbourg

(liste non exhaustive)

# Équipe des Journées de la topographie 2020



Nouvelle année, nouvelles Journées de la topographie! Pour cette 17<sup>e</sup> édition, Hélène Macher a repris le flambeau d'organisatrice, épaulée par son équipe d'étudiants et de professionnels de l'INSA Strasbourg pour suivre la trace laissée par Tania Landes, que nous remercions encore une fois pour les seize premières éditions.

Cette édition au format inédit a été un challenge d'organisation afin d'adapter l'évènement aux conditions sanitaires incertaines. Le passage au virtuel des Journées de la topographie a été un défi d'une part d'un point de vue logiciel, puisque tout le programme a été adapté pour assurer l'évènement en ligne, d'autre part, au niveau de la communication en amont des journées qui a été essentielle pour expliquer ce format encore peu connu aux étudiants et aux participants.

Nous vous souhaitons à toutes et à tous de passer un bon moment numérique lors de cet évènement.



DR

**De gauche à droite:** François Potentini (G5), Jade Lautier (G5), Édouard Jund (G5), Delphine Schueller (G5) et Raphaël Moreau (G4).

# Ordre de passage des PFE

**MERCREDI 23 SEPTEMBRE**

## **JURY 1**

**Président de jury: NATCHITZ Emmanuel**

**8 h 30 • Amélioration d'une solution d'acquisition existante de données LiDAR dynamiques pour l'utilisation en intérieur: intégration de bibliothèques *open source* de SLAM et de débruitage** • p. 17

- Étudiant: CARREAUD Antoine
- Structure d'accueil: HÉLIMAP, Épalinges (Suisse)
- Correcteur: KOEHL Mathieu

**9 h 30 • Reconstruction 3D des usines de la faïencerie de Sarreguemines à partir de photos d'archives terrestres, de relevés drones et TLS** • p. 21

- Étudiant: LOSSER Merlin
- Structure d'accueil: Musées de Sarreguemines, Sarreguemines
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, KOEHL Mathieu

**10 h 30 • Relevé et modélisation 3D de la carrière de Froidmont (Aisne)** • p. 25

- Étudiante: RICHARD Angélique
- Structure d'accueil: EPCC Somme Patrimoine, Ribemont-sur-Ancre
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, KOEHL Mathieu

-----  
**Président de jury: MOREL Laurent**

**13 h 30 • Développement d'une méthode de vectorisation automatique des marquages de réseaux enterrés à partir d'orthophotographies** • p. 29

- Étudiante: NORMIER Élisabeth
- Structure d'accueil: SOGELINK, Caluire-et-Cuire
- Correcteur: ALBY Emmanuel

**14 h 30 • Modélisation d'un site médiéval de Châtenois pour une valorisation grand public et une exploitation scientifique** • p. 33

- Étudiante: THIBAUD Lucie
- Structure d'accueil: Archéologie Alsace, Sélestat
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, ALBY Emmanuel

**15 h 30 • Reconnaissance automatique d'objets pour le jumeau numérique ferroviaire à partir d'imagerie aérienne** • p. 37

- Étudiant: DESBIOLLES Valentin
- Structure d'accueil: ALTAMETRIS, Saint-Denis
- Correcteurs: MACHER Hélène, ALBY Emmanuel

## **JURY 2**

### **Président de jury: CLERGEOT Bertrand**

**8 h 30 • Étude sur la division primaire en application de l'article R. 442-1 a) du Code de l'urbanisme** • p. 41

- Étudiante: GRANJON Marion
- Structure d'accueil: Cabinet AGATE géomètre-expert, Grenoble
- Correcteur: LAMBERT Régis

**9 h 30 • Étude de la norme LADM, potentiel modèle pour le cadastre suisse et français** • p. 45

- Étudiant: COMBE Jean Lou
- Structure d'accueil: Direction de l'information du territoire du canton de Genève, Genève [Suisse]
- Correcteur: LEDIG Jacques

**10 h 30 • Intégration de données juridiques de copropriété et de division en volumes dans une maquette BIM avec suivi des modificatifs** • p. 49

- Étudiant: GIBERT Guillaume
- Structure d'accueil: RENFERT & VENANT, Colombes
- Correcteur: LEDIG Jacques

---

### **Présidente de jury: DUQUENNE Françoise**

**13 h 30 • Monitoring par photogrammétrie: surveillance automatisée** • p. 53

- Étudiant: ALRASLAN Muhi Aldin
- Structure d'accueil: SITES - Rhône-Alpes, Dardilly
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

**14 h 30 • Mise en place d'un protocole semi-automatisé pour la cartographie des morphologies glaciaires** • p. 57

- Étudiante: CUNTHEN Aneesha
- Structure d'accueil: UFR Sciences et techniques, Département Géosciences, Le Mans
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

**15 h 30 • Développement d'une méthodologie de calibration fine de la caméra panoramique utilisée en *mobile mapping* et valorisation de la donnée photogrammétrique acquise** • p. 61

- Étudiant: PIRANDA Geoffrey
- Structure d'accueil: GEOFIT, Nantes
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

## JEUDI 24 SEPTEMBRE

### JURY 1

**Président de jury: POLIDORI Laurent**

**8 h 30 • Détermination conjointe des inondations et du type d'eau au moyen de l'imagerie multispectrale** • p. 65

- Étudiante: AMZIL Sabine
- Structure d'accueil: LEGOS, Toulouse
- Correctrice: LANDES Tania

**9 h 30 • Analyse automatique du couvert végétal pour la gestion du risque végétation en milieu ferroviaire à partir d'imagerie aérienne** • p. 69

- Étudiante: ROUILLON Hélène
- Structure d'accueil: ALTAMETRIS, Saint-Denis
- Correcteurs: LANDES Tania, ALBY Emmanuel

**10 h 30 • Création d'une visite virtuelle de la tour Hans von Altheimsturm des ponts couverts de Strasbourg par intégration d'un modèle 3D dans un moteur de jeu** • p. 73

- Étudiant: DURIEUX Florian
- Structure d'accueil: DRAC Grand Est, Strasbourg
- Correctrices: MACHER Hélène, LANDES Tania

### JURY 2

**Président de jury: FLACELIÈRE Bernard**

**8 h 30 • Étude sur l'exploitation de mesures de nuages de points pour le domaine de l'auscultation automatique** • p. 77

- Étudiante: ANDRIAMIHAJA Ariala
- Structure d'accueil: SIXENSE SOLDATA, Nanterre
- Correcteur: FERHAT Gilbert

**9 h 30 • Optimisation des solutions de positionnement GNSS pour les opérations offshore d'exploration production de Total** • p. 81

- Étudiant: JOLAIN Gautier
- Structure d'accueil: TOTAL S.A., Pau
- Correcteur: FERHAT Gilbert

**10 h 30 • Mise en place d'un service environnement dans un cabinet de géomètre-expert** • p. 85

- Étudiant: SALGUES Hugo
- Structure d'accueil: VALORIS, Toulouse
- Correcteur: KOEHL Mathieu

## **JURY 3**

**Présidente de jury: DUQUENNE Françoise**

**8 h 30 • Étude et analyses des outils de modélisation semi-automatiques et comparaison avec les outils classiques** • p. 89

- Étudiant: DOMANGE Lucas
- Structure d'accueil: GEOSAT, Pessac
- Correctrice: MACHER Hélène

**9 h 30 • Détection et vectorisation automatique d'objets linéaires dans des nuages de points de voirie** • p. 93

- Étudiant: BARÇON Étienne
- Structure d'accueil: TT Géomètres-Experts, Paris
- Correctrice: MACHER Hélène

**10 h 30 • Système de photogrammétrie embarqué sur véhicule: développement et amélioration du système existant, définition des conditions d'utilisation et de mise en œuvre au regard de cahiers des charges types de relevés** • p. 97

- Étudiant: THOMINE Valentin
- Structure d'accueil: Cabinet GREUZAT, Varredes
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

## **VENDREDI 25 SEPTEMBRE**

### **JURY 1**

**Président de jury: ORTLIEB Hubert**

**8 h 30 • Relevé par Lidar mobile de cours d'eau et intégration aux relevés bathymétriques réalisés par sondeur monofaisceau** • p. 101

- Étudiant: DIDIER Guillaume
- Structure d'accueil: AXIS Conseils, Orléans
- Correcteur: KOEHL Mathieu

**9 h 30 • Évaluation de solutions commerciales et développement d'un dispositif autonome de télésurveillance** • p. 105

- Étudiant: REBETEZ Julian
- Structure d'accueil: Haller Wasser and partner S.A., Carouge (Suisse)
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, LEDIG Jacques

**10 h 30 • Quantifier la précision pour des mesures topographiques sur structures navales; développement d'un outil d'analyse** • p. 109

- Étudiant: CARPENT Clément
- Structure d'accueil: TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
- Correcteurs: LANDES Tania, LEDIG Jacques

## **JURY 2**

**Président de jury: FLACELIÈRE Bernard**

**8 h 30 • Interface génie civil/équipement :  
positionnement d'interfaces dans des trémies** • p. 113

- Étudiant: ACKER Arthur
- Structure d'accueil: SITES - Provence, Aix-en-Provence
- Correcteur: ALBY Emmanuel

**9 h 30 • Détection automatique de changements  
et de défauts dans le béton sur orthophotographies** • p. 117

- Étudiante: GRUSSI Caroline
- Structure d'accueil: SITES - Rhône-Alpes, Rueil-Malmaison
- Correcteur: ALBY Emmanuel

**10 h 30 • Utilisation de l'apprentissage machine  
dans la classification de données aériennes 3D** • p. 121

- Étudiante: LECOCQ Mira
- Structure d'accueil: IGO, Nîmes
- Correcteur: ALBY Emmanuel

## **JURY 3**

**Président de jury: NATCHITZ Emmanuel**

**8 h 30 • Étude des champs d'application  
du Zeb Revo RT, du Backpack, du scanner laser statique  
et du drone avec rendements associés** • p. 125

- Étudiant: REY Jean-Victor
- Structure d'accueil: GEXIA Foncier, Labège
- Correctrice: LANDES Tania

**9 h 30 • Apport d'informations thermiques,  
de couleur et d'intensité pour la détection automatique  
d'ouvertures dans des nuages de points** • p. 129

- Étudiante: ROY Leyla
- Structure d'accueil: Laboratoire ICube, Unistra,  
Illkirch-Graffenstaden
- Correctrice: LANDES Tania

**10 h 30 • Maquette numérique 3D  
à l'échelle de la ville: mise en place  
d'un processus de production automatisé** • p. 133

- Étudiant: MARTIN Victor
- Structure d'accueil: ATGT Géomètre-Expert, Bobigny
- Correctrice: MACHER Hélène

## PROJETS DE FIN D'ÉTUDES SOUTENUS AU MOIS DE JUIN 2020

*Parameter estimation for persistent scatterer interferometry using compressive sensing* • p. 137

- Étudiant: REBMEISTER Matthieu
- Structure d'accueil: Institut de photogrammétrie et de télédétection, KIT (Allemagne)
- Correctrice: LANDES Tania

*Structural deformation monitoring by multitemporal terrestrial laser scanning* • p. 141

- Étudiante: BAUDUIN Teresa
- Structure d'accueil: Laserscan Berlin 3D Solutions GmbH (Allemagne)
- Correctrice: LANDES Tania



# Résumés des PFE





# Amélioration d'une solution d'acquisition existante de données LiDAR dynamiques pour l'utilisation en intérieur : intégration de bibliothèques open source de SLAM et de débruitage

*PFE présenté par :* **Antoine Carreaud**  
*Société d'accueil :* Helimap System et HEIG-VD  
*Directeurs de PFE :* Julien Vallet et Adrien Gressin  
*Correcteur :* Mathieu Koehl  
*Encadrant :* Jonathan Senn



## 1. Contexte et objectifs

Ce Projet de Fin d'Etudes (PFE) est réalisé dans le domaine de la cartographie 3D dynamique, plus précisément sur le débruitage et le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping, Localisation et Cartographie simultanée).

Il est effectué dans les locaux de Hélimap System à Epalinges (Suisse), ainsi que dans ceux de l'HEIG-VD à Yverdon au département EC+G (Environnement Construit et Géoinformation).

Ce PFE a deux objectifs majeurs autour du traitement de données LiDAR dynamiques :

- Le premier consiste à s'intéresser aux algorithmes de localisation et de cartographie simultanée (SLAM) appliqués à des données LiDAR dynamiques. Il s'agissait d'abord de faire un état de l'art des différentes bibliothèques qui existent puis d'en choisir une qui corresponde aux attentes. Cette solution a été implémentée sur le capteur existant, en faisant quelques modifications matérielles. Par la suite, des tests ont été effectués sur différents sites (tunnel, relevé d'intérieur, ...), puis comparés avec des données références afin d'évaluer la précision. Ces tests seront aussi comparés avec ceux d'une solution de LiDAR mobile commerciale si le temps le permet.
- Le second consiste à corriger le bruit présent dans les données issues de relevés LiDAR dynamiques. En effet, le type de capteur low-cost utilisé pour ce projet engendre du bruit sur le nuage de points de l'ordre de plusieurs centimètres. Après avoir fait un état de l'art des solutions existantes, trois ont été retenues et comparées.

L'entreprise Helimap System réalise elle-même l'intégration de ses systèmes d'acquisition, ce qui lui a permis de ne pas dépendre de solutions commerciales clés en main plus onéreuses. Cela donne aussi la garantie de pouvoir gérer les paramètres du système librement. Ce projet adopte cette même logique en s'appuyant sur l'existence de plusieurs capteurs commerciaux fonctionnant avec la technologie SLAM.

Le système existant utilisé pour ce projet, visible en Figure 1, est composé de :

- Une centrale inertielle + un récepteur GNSS (Applanix APX-15)
- Une antenne GNSS
- Un LiDAR low-cost (Velodyne VLP-16)
- Un micro-ordinateur RaspberryPi pour piloter les capteurs et gérer l'enregistrement des données
- Une batterie LiPo pour l'alimentation

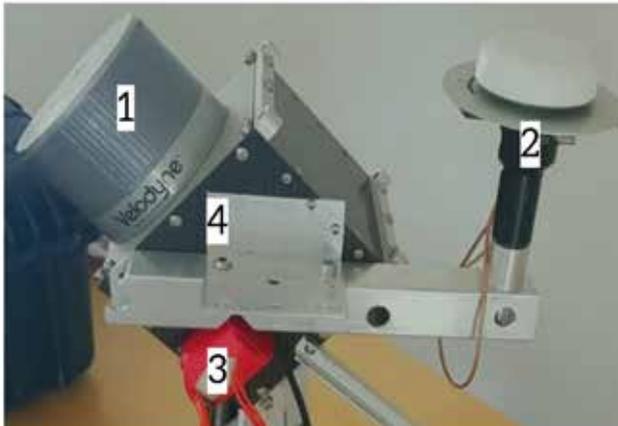


Figure 1: Montage du système initial, 1) LiDAR VLP-16 de Velodyne, 2) antenne GNSS, 3) batterie LiPo, 4) centrale inertielle APX-15 et Raspberry Pi 3B+ (à l'intérieur du caisson).

## 2. Premiers résultats

Les premiers résultats des deux objectifs de ce PFE seront présentés dans cette partie : c'est à dire pour (1) l'intégration d'une librairie open source pour faire du SLAM, et (2) le débruitage de nuages de points.

### a) Objectif SLAM

Le SLAM fonctionne en considérant un petit nuage de points acquis à un instant  $t$  (sur un très court laps de temps) comme s'il était statique, le prochain nuage, à l'instant  $t+1$  va être recalé par rapport au précédent grâce aux données d'une centrale inertielle et à des calculs de corrélations entre les deux nuages. Ainsi, de proche en proche, une trajectoire va être calculée. Cette trajectoire peut dériver rapidement, c'est pourquoi la création de submaps (correspondant à des données acquises sur une dizaine de secondes) est importante afin de recalibrer chaque submap ensemble.

Grâce à la recherche bibliographique, nous avons identifié la librairie open source permettant de faire du SLAM qui nous conviendrait. Plusieurs articles scientifiques l'ont présentée en utilisation dans des cas réels ; elle est reconnue dans ce domaine et est très utilisée ce qui permet d'avoir un support communautaire. Cette librairie s'appelle Google Cartographer et utilise des standards de la robotique comme le système d'exploitation ROS qui permet de créer des environnements dédiés au contrôle d'un robot. Nous avons donc dû utiliser un type de fichier spécifique, le fichier .bag, qui regroupe toutes sortes de messages de capteurs. Dans notre cas, ce sont les messages du LiDAR et de la centrale inertielle qui nous intéressent. Le diagramme des transformations de fichiers qui permet d'utiliser la librairie Google Cartographer est visible en Figure 2.

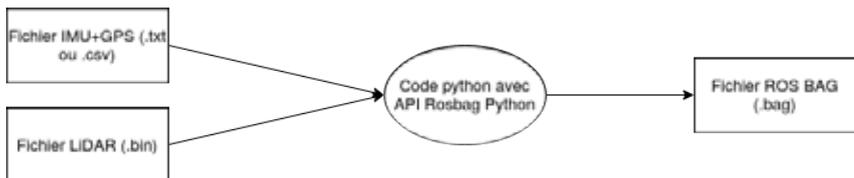


Figure 2: Diagramme décrivant les transformations de formats de fichier.

Des premiers tests ont été effectués avec la centrale inertielle d'origine, l'APX-15 de Applanix, cependant nous n'avons pas accès aux données brutes de celle-ci. Nous avons donc intégré une autre centrale, la XSENS MTI-G-700. L'intégration de celle-ci a permis d'utiliser la librairie de SLAM et la présentation des résultats obtenus est visible en Figure 3.

Nous allons présenter le résultat obtenu en intérieur, sur le rez-de-chaussée des locaux de Helimap (environ 300 m<sup>2</sup>). Les paramètres (notamment le poids donné aux mesures de la centrale inertielle, le poids du recalage nuage/nuage, le nombre de données accumulées dans une submap) ont été ajustés pour obtenir le meilleur résultat possible (visible en Figure 3). La première étape consistait à calculer la meilleure trajectoire à partir des données LiDAR et IMU (Inertial Measurement Unit). Cette Figure montre le résultat de la deuxième étape : la reconstruction du nuage de points. Afin de qualifier la précision du nuage de points acquis par SLAM, nous avons calculé la distance entre ce dernier et une référence acquise avec un scanner terrestre statique de Leica (RTC360). L'histogramme sur la Figure 3 nous montre une exactitude de 8 cm (68 % des distances sont inférieures à 8 cm). Cette exactitude n'est pas uniquement due à la précision de la trajectoire calculée par SLAM mais aussi au bruit de mesure du LiDAR.

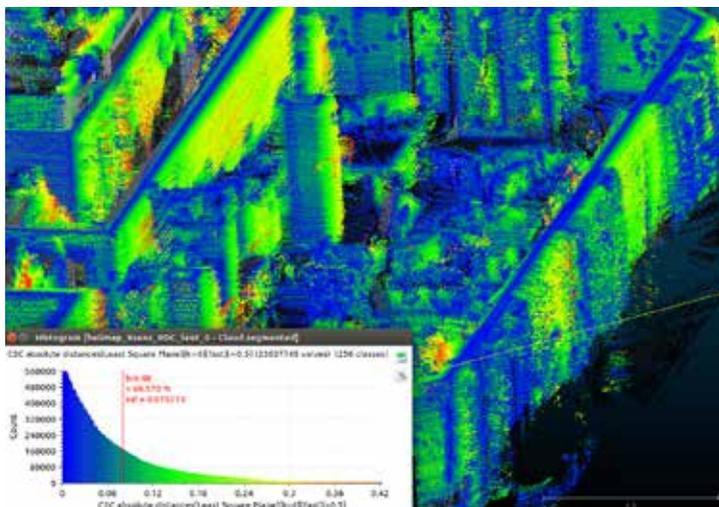


Figure 3: Visualisation des distances et de l'exactitude du nuage de points acquis par SLAM en intérieur; les distances sont calculées en valeurs absolues par rapport à un nuage de points de référence. Le nuage de points est coloré en fonction de la distance à la référence selon les couleurs visibles dans l'histogramme.

Afin de relever les plafonds en intérieur, nous voulions placer le LiDAR verticalement. Ce placement ne permettait pas de faire du SLAM, la reconstruction ne se faisait pas correctement car il n'y avait pas assez de formes reconnaissables, comme des coins permettant le recalage. C'est pourquoi il a été positionné de manière horizontale. L'ajout d'un LiDAR et le montage de l'ensemble sur un sac à dos est en cours de réalisation afin d'acquérir plus de données (horizontalement et verticalement) pour permettre un recalage correct (LiDAR horizontal) et couvrir les plafonds (LiDAR vertical).

#### b) Objectif Débruitage

Grâce à l'étude bibliographique, nous avons identifié plusieurs possibilités open source de débruitage de nuages de points. L'une est basée sur le deep learning (la librairie PointCleanNet), une autre se réfère à l'implémentation d'un filtre bilatéral pour des nuages de points. La dernière option testée a été l'implémentation du SOR (Statistical Outlier Removal) Filter de Cloud Compare.

PointCleanNet est un réseau de neurones qui a pour but de diminuer le bruit dans un nuage de points. Il est entraîné sur des petits objets sur lesquels du bruit blanc a été ajouté (moyenne nulle et variance finie). Le principal inconvénient de cette librairie est du au temps de calcul. Nous avons dû faire des tests sur des nuages de moins de 500k points. Même avec si peu de points, les temps de calcul peuvent aller jusqu'à plusieurs heures. L'utilisation de cette solution n'est pas adéquate dans un contexte de production de données et a été rapidement oubliée.

Le SOR Filter de CloudCompare est la méthode la plus simple à utiliser parmi celles testées, mais beaucoup de données sont perdues. Avec des paramètres trop restrictifs, les angles seront également altérés.

L'implémentation du filtre bilatéral pour un nuage de points est très efficace. Les résultats obtenus sont très encourageants, mais attention à utiliser les bons paramètres pour conserver les angles et ne pas trop lisser le nuage de points.

L'analyse qualitative (visuelle) de l'apport des filtres est évidente, le bruit du nuage a fortement diminué pour le filtre bilatéral comme le montre la Figure 4. L'angle droit du mur est gardé pour toutes les méthodes, ce qui n'est pas le cas si on choisit mal les paramètres; les tuyaux sur le bord du mur sont conservés pour le filtre bilatéral, ce qui est satisfaisant, car les tests avec les autres méthodes montrent qu'ils sont supprimés ou tordus. Cette analyse se fait entre une référence acquise au RTC360 de Leica en rouge et le nuage de points du système de Helimap avec le LiDAR VLP-16 en blanc.

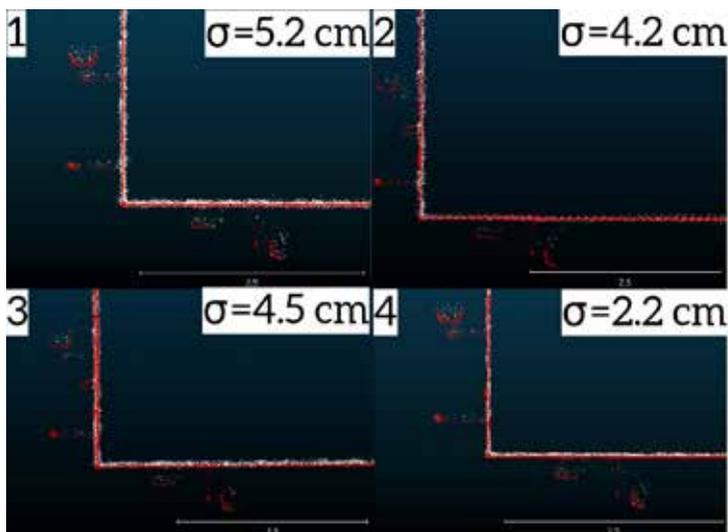


Figure 4: Coin de mur en vue du dessus, en rouge la référence, en blanc : 1) nuage original bruité, 2) nuage débruité avec PointCleanNet, 3) nuage débruité avec SOR Filter de CloudCompare, 4) nuage débruité avec le filtre bilatéral.

L'analyse quantitative donne un sigma de 5.2 cm de distance entre le nuage acquis avec le LiDAR low cost et le nuage de référence. Après deux itérations du filtre bilatéral, la valeur est de 2.2 cm, alors que pour les deux autres méthodes la valeur n'est que de 4.2 et 4.5 cm. Ces valeurs sont cohérentes avec l'analyse qualitative.

### 3. Conclusion et perspectives

Un système d'acquisition LiDAR dynamique a été modifié afin de pouvoir acquérir les données nécessaires pour l'utilisation de la librairie open source Google Cartographer. Afin de faire fonctionner cette librairie avec nos données, la partie software a été développée en Python. Plusieurs tests ont été effectués pour qualifier la précision par comparaison avec une référence.

Une méthodologie de débruitage de nuages de points a été choisie après avoir testé plusieurs librairies.

Enfin, l'intégration d'un deuxième LiDAR sur un Backpack est en cours d'exécution et permettra d'acquérir des nuages de points en SLAM bien plus complets qu'avec un seul LiDAR. Le deuxième LiDAR (vertical) sera complémentaire au premier (horizontal), il permettra de relever les plafonds et le sol tandis que le premier permet déjà de se positionner et d'acquérir les murs.

# Reconstruction 3D des usines de la faïencerie de Sarreguemines à partir de photos d'archives terrestres, de relevés drones et TLS

*PFE présenté par :*

**Merlin LOSSER**

*Société d'accueil :*

Ville de Sarreguemines

Laboratoire ICube UMR 7357, Equipe TRIO

INSA Groupe PAGE

*Directrice de PFE :*

Mme Julie KIEFFER

*Correcteurs :*

Mr Mathieu KOEHL et Mr Pierre GRUSSENMEYER

*Encadrant :*

Mr Samuel GUILLEMIN



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet s'inscrit dans la continuité de la collaboration entre la ville de Sarreguemines et l'INSA Strasbourg. En effet, deux précédents projets ont déjà été menés entre ces parties. Cela a commencé par la modélisation du jardin d'hiver par Valentin Girardet en 2018, puis par la modélisation du Casino des faïences et du pavillon de Geiger en 2019 par Georges Miguet. Cette fois-ci le projet, n'est pas une simple modélisation mais une reconstruction d'anciens bâtiments administratifs de l'usine n° 4 de faïencerie de la ville. En effet, ces bâtiments ont subi des modifications après la seconde guerre mondiale. Dans la continuité de la conservation du patrimoine industriel de la ville, l'idée est de reconstruire un modèle 3D de ces bâtiments afin de les intégrer plus tard dans un modèle à plus grande échelle d'une partie du centre-ville de Sarreguemines.

L'étude devait dans un premier temps s'appuyer sur les travaux réalisés au cours d'un projet de recherche technologique (PRT) par Aneesha Cunthen et Muhi Aldin. En effet, ils avaient étudié la faisabilité de l'utilisation d'images d'archives aériennes pour la génération d'un modèle 3D. Malheureusement, l'étude n'ayant pas abouti à des résultats suffisamment satisfaisants, les images d'archives aériennes ont été retirées du projet. Pour construire notre modèle 3D nous avons donc différents types de données ; les données lasergrammétriques, les données photogrammétriques et les images d'archives terrestres.

Les objectifs de ce projet sont multiples. Tout d'abord, il en va de la conservation du patrimoine industriel de la ville de Sarreguemines, c'est pour cette raison que la collaboration entre la ville et l'INSA Strasbourg a débuté. En effet, pendant longtemps les faïenceries ont fait la renommée de la ville à l'échelle nationale et même au-delà. Cette industrie a perduré pendant un peu plus de 200 ans, mais a malheureusement pris fin en 2007. L'histoire des faïenceries faisant partie intégrante de l'histoire de la ville, cette dernière essaye de conserver et de partager un maximum ce patrimoine. Pour cela, elle peut s'appuyer sur le Musée de la faïence qui retrace l'histoire de l'industrie dans la ville et qui présente les différentes collections qu'ont pu produire les faïenceries. La visite du musée se termine par un passage dans le fameux jardin d'hiver.

Dans le même esprit de conservation du patrimoine, ce projet a pour objectif la production d'un modèle 3D des bâtiments administratifs tels qu'ils étaient aux alentours des années 1920/1930. La construction de ce modèle repose sur le traitement des images d'archives. En effet, ce sont les seules traces qui témoignent de l'état du bâtiment à cette époque. A partir de cette modélisation, une visite en réalité augmentée pourrait être envisagée afin de permettre une immersion totalement dans l'enceinte de l'usine. Aussi, une vidéo pourrait être réalisée afin de permettre à la ville de Sarreguemines de pouvoir facilement diffuser ce nouveau support de conservation du patrimoine de la ville.

## 2. Acquisition des données

Le projet a commencé par l'acquisition des données sur le terrain. Pour cela deux journées de terrain ont été planifiées, le 3 et 11 Mars 2020. Lors de ces jours de levé, les acquisitions des données lasergrammétriques et photogrammétriques ont été réalisées. Pour ce faire, l'aide de Samuel Guillemin, ingénieur d'étude au laboratoire de photogrammétrie de l'INSA Strasbourg, a été précieuse

En effet, c'est ensemble que nous avons procédé aux levés lasergrammétriques. L'un s'est occupé de réaliser le levé scanner à proprement parler, pendant que l'autre s'occupait du levé topographique qui permettra de géo-référencer les nuages de points. D'un point de vue technique, nous étions équipés d'un tachéomètre Trimble M3 pour la partie topographie, et d'un scanner laser Faro X330. Un jeu de sphères a également été utilisé. Elles permettent la consolidation des différents nuages de points lors de l'étape de traitements informatiques des données. Elles ont également été levées au tachéomètre afin d'en déterminer les coordonnées qui serviront au géoréférencement du nuage.

Concernant le levé photogrammétrique, il a été réalisé par drone. Le vol a été opéré par Mr Mathieu Koehl, professeur à l'INSA Strasbourg. En effet, dernièrement le laboratoire de photogrammétrie a fait l'acquisition d'un drone DJI Phantom 3 permettant maintenant la réalisation de levé photogrammétrique au drone et évitant ainsi de passer par un sous-traitant. Mr Mathieu Koehl ayant toutes les accréditations nécessaires, est en mesure d'effectuer les vols. Pour la bonne réalisation du levé, des cibles en forme de quadrillages ont été disposées autour des bâtiments. Ces mêmes cibles ont été levées en coordonnées grâce à l'antenne GPS Trimble R12. Elles serviront de points d'appuis dans le traitement des données, et également dans le géoréférencement des données. Les images ont été acquises lors de deux vols, le drone était configuré pour prendre des images à intervalle de temps régulier afin de faciliter le pilotage. Les images nadirales et obliques ont été prises.

Enfin, les dernières données du projet sont les images d'archives. Evidemment, elles n'ont pas fait l'objet d'une campagne d'acquisition à proprement parlé puisque elles proviennent toutes d'époques différentes. Toutefois, il est important de souligner le travail de recherche de Mme Julie KIEFFER, directrice des musées de Sarreguemines. En effet, c'est elle, qui en amont du projet, a réalisé un important travail de recherche au sein des archives de la ville. Cette mission a permis de recueillir un certain nombre d'images d'archives de l'ensemble des sites des faïenceries. En ce qui concerne le site du projet, qui sont le bâtiment administratif, l'ancien laboratoire et l'ancien magasin de l'usine n°4, un peu plus d'une dizaine d'images ont été répertoriées. Parmi elles on compte une grande majorité de photos de l'entrée du site n°4 qui est en fait le bâtiment administratif. C'est donc sur ce bâtiment que se concentrera en grande partie l'étude.



Figure 1 : Exemples d'images d'archives à disposition du projet

Les images ne pouvant pas être datées précisément, il a d'abord fallu estimer la période à laquelle elles ont été prises. Pour cela, on a pu catégoriser les images en deux parties, celle prises avant la seconde guerre mondiale et celles prises après. En effet, les bâtiments ayant subi de gros dégâts au cours de la guerre, il a été facile de différencier les images sur ce critère. Pour les images prises avant la guerre aucune modification n'a été remarquée sur l'ensemble des clichés. Cela nous a permis d'émettre l'hypothèse que les bâtiments étaient restés identiques durant les décennies avant la seconde guerre mondiale. On a alors pu définir une période pour la modélisation assez large qui sont les années 1920-1930.

### 3. Traitements informatique

Une fois les données acquises, il faut les traiter afin de pouvoir les exploiter au maximum. Selon le type de données, il existe des chaînes de traitements spécifiques.

Pour commencer avec le traitement des données lasergrammétriques, il est indispensable de commencer par la consolidation du nuage. En effet, cette étape qui permet de recalculer les nuages de points les uns par rapport aux autres va simplifier le travail de géoréférencement. Il sera plus simple de le faire une seule fois pour l'ensemble des nuages que de les géoréférencer un par un. Cette étape de consolidation des nuages de points a été effectuée sur le logiciel Scene de Faro. Nous avons procédé à une consolidation dite basée sur les cibles. Dans notre cas, il s'agissait non pas de cible mais de sphères disposées de manière uniforme dans l'environnement scanné. Grâce au diamètre des sphères rentré manuellement dans le logiciel, ce dernier est capable de les reconnaître. Une fois le nuage consolidé, il est possible de passer au géoréférencement. Il est indispensable d'avoir au préalable calculé les coordonnées des centres des sphères. Pour cela, un calcul sous Covadis a été effectué dès le retour du terrain. Cette étape a également été réalisée sous Scene.

L'étape suivante, est sûrement la plus minutieuse de la chaîne de traitement. En effet, il s'agit de l'étape de segmentation du nuage. Cette étape peut être assimilée au nettoyage du nuage de points. Lorsque le scanner scan une scène, de nombreux artefacts peuvent apparaître créant des points aberrants. Aussi, il est important de supprimer tous ce qui n'apporte rien au nuage de points, tels que les éléments urbains présents dans la scène (voitures, piétons, etc). L'étape suivante aurait dû être le maillage du nuage mais dans notre cas, une fusion avec le nuage issu du traitement des images du drone a été réalisée.

Avant d'obtenir un nuage de points issu de ces fameuses images prises avec le drone, il existe aussi un certain nombre d'étapes à suivre. Il a d'abord fallu orienter les images afin d'obtenir un nuage de points de jonction. Pour cela, un certain nombre de cibles connues en coordonnées avaient été pointées sur certaines photos. Une fois le nuage obtenu, l'ensemble des cibles ont été pointées sur l'ensemble des photos afin de pouvoir optimiser les paramètres de la caméra. Une fois cette étape réalisée, une densification du nuage a été générée. Toutes les étapes de cette chaîne de traitement ont été réalisées sous Metashape.

Une fois le nuage dense obtenu, il a été fusionné avec le premier nuage de point généré par le levé lasergrammétrique. Cette fusion a pour but d'obtenir un nuage encore plus dense et de surtout compléter les manques de chaque nuage de points. En effet, les images drone ont apporté beaucoup d'informations sur les toitures des bâtiments alors qu'inversement les scans ont permis d'apporter des informations sur leurs façades. Lorsque les deux nuages ont été fusionnés, il a alors fallu repasser par une étape de nettoyage afin d'obtenir un nuage de points global le plus propre possible. La fusion ainsi que le nettoyage du nuage ont été réalisés sous 3D Reshaper. Lorsque celui-ci a été complètement nettoyé, les étapes suivantes ont été le maillage et texturage du modèle. En effet à partir du nuage de points il est possible de créer un modèle 3D en créant un maillage. Cela consiste à créer des triangles entre les points du nuage afin de créer des surfaces. Seulement à ce moment il est possible d'y appliquer les textures. Celles-ci sont plaquées sur le modèle via des points de références.

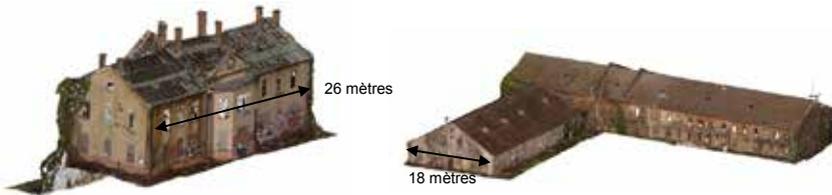


Figure 2 : Modèles 3D maillés texturés des bâtiments tels qu'ils sont actuellement

Enfin, il a fallu traiter les images d'archives, ce qui constitue la partie la plus ardue de ce projet. De nombreux projets ont déjà porté sur le traitement de photos de ce type. Cependant les images utilisées dans ces projets respectaient quelques conditions importantes, telles que le nombre d'images d'archives, leur qualité ou encore leur fonction (photos destinées à de la photogrammétrie ou photos lambda par exemple). Dans notre cas, nous disposons d'un très faible échantillon d'images

provenant d'époques différentes, de qualités différentes sans avoir été prises pour un traitement photogrammétrique. L'enjeu était donc de réussir à traiter ces images avec les logiciels de photogrammétrie moderne.

De nombreux tests et expérimentations ont été réalisés sous le logiciel Metashape. Dans un premier temps, des points remarquables ont été relevés sur le modèle 3D précédemment présenté. Ces points ont servis de points d'appuis pour les images d'archives, l'objectif étant de réussir à déterminer les paramètres d'orientation de l'ensemble des photos d'archives. Des images du bâtiment prises au drone ont été intégrées au projet afin d'aider au calcul des paramètres. Si dans un premier temps cela a fonctionné pour une partie des images, il était impossible d'aller plus dans les traitements en raison du manque de points de jonctions entre les images d'archives. Pour pallier à cela de nouveaux points connus en coordonnées, appelés markers, ont été ajoutés aux projets. Des tests avec les paramètres d'orientations entrés manuellement avant le calcul d'orientation ont été effectués sans résultats supplémentaires.

De ce fait, il a été décidé d'essayer de déterminer ces paramètres d'orientation via un calcul de transformation linéaire directe (DLT). C'est une méthode qui consiste à déterminer 11 paramètres par la méthode des moindres carrés à partir des coordonnées images et objets des markers. Pour ce faire, un logiciel, appelé faisceaux, développé au début des années 2000 a été utilisé. Il est alors possible de calculer les paramètres de la projection centrale à partir des 11 paramètres précédents. Malheureusement, malgré l'intégration de ces nouveaux paramètres d'orientation dans les projets Metashape, il n'était pas possible de générer un nuage de points issus des images d'archives.

Une dernière solution d'orientation des images a été envisagée. Celle-ci s'appuie sur un autre logiciel de photogrammétrie, Photomodeler. En effet, ce dernier permet l'orientation de photos par le pointer de points connus en coordonnées. Cette méthode a donc été employée et a à première vue fonctionné. En effet, il a été possible de construire un début de modélisation du bâtiment à partir de points visibles sur plusieurs images. Cependant, lors de mesures de contrôle il a été constaté que les dimensions du bâtiment n'étaient pas similaires aux réelles dimensions de celui-ci. Aussi de nombreux points n'étaient visibles que sur une seule image, rendant impossible leur modélisation.

Il a alors fallu trouver une solution qui permettrait tout de même obtenir un modèle 3D du bâtiment en attendant de trouver de nouvelles solutions de modélisation. Un modèle 3D réalisé sur Sketchup a alors été réalisé se basant sur les dimensions du modèle maillé et texturé, ainsi que sur le visuel des images d'archives. Ce modèle demande encore un travail de colorisation ainsi que de géoréférencement, mais actuellement il est le seul modèle 3D obtenu.

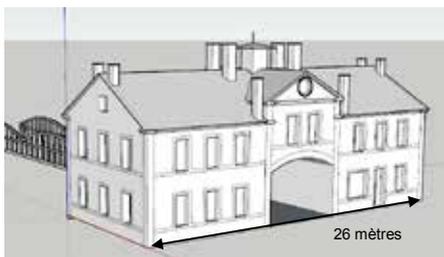


Figure 3 : Modélisation du bâtiment administratif sous Sketchup

#### 4. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de mettre en avant la difficulté que peut représenter le traitement d'images d'archives. Cela est possible mais sous certaines conditions qui si elles ne sont pas respectées rendent le traitement bien plus compliqué.

Différentes méthodes de modélisation ont été utilisées au cours du projet que ce soit pour la construction du modèle existant ou bien de la reconstruction 3D de l'ancien bâtiment. Certes toutes les méthodes n'ont pas apporté les résultats espérés mais cela aura permis de mettre en avant les limites de ces mêmes méthodes dans des cas de figures spécifiques.

Enfin, la collaboration entre la ville et l'INSA devrait se poursuivre avec un projet global à l'échelle du centre-ville et qui relierait les trois premiers projets de modélisation du patrimoine industriel de la ville.

# Relevé et modélisation 3D de la carrière de Froidmont (Aisne)

PFE présenté par : **Angélique RICHARD**

Société d'accueil : **EPCC Somme Patrimoine**

Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,

Equipe TRIO, INSA Groupe PAGE

Directeur de PFE : **M. Gilles PRILAUX**

Correcteurs : **M. Pierre GRUSSENMEYER & M. Mathieu KOEHL**

Encadrant : **M. Samuel GUILLEMIN**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Plusieurs projets de sauvegarde et de valorisation du patrimoine souterrain de la Grande Guerre ont vu le jour, notamment grâce à la Mission du Centenaire de la Première Guerre mondiale et à l'EPCC<sup>1</sup> Somme Patrimoine. De nombreux sites dans la partie nord de la France ont servi de refuge pour les soldats. La préservation des traces qu'ils y ont laissées est primordiale et permet, à travers leur numérisation, la commémoration et le recensement de la mémoire des combattants ainsi qu'une diffusion au grand public.

La carrière de Froidmont est située à Braye-en-Laonnois, dans le département de l'Aisne. Au cours de la Grande Guerre, les troupes allemandes puis américaines ont investi les lieux. Elles ont, tour à tour, gravé les murs des galeries souterraines, comme il en a été le cas pour de nombreux souterrains des Hauts de France à cette époque. La 26<sup>e</sup> Division Yankee ainsi que les 101<sup>e</sup> et 102<sup>e</sup> divisions d'infanterie américaines sont les auteurs d'un très grand nombre d'œuvres de la carrière. En plus des traces laissées sur les parois calcaires, les galeries contiennent encore des éclats de grenade, des casques, des bouteilles et des chaussures en cuir notamment, témoignant des conflits de la Première Guerre mondiale.

La numérisation 3D de la carrière de Froidmont et des œuvres des soldats s'inscrit dans la continuité des travaux entrepris les années précédentes, tels que la modélisation 3D des carrières de Montigny ou de la Maison Blanche souterraine de Neuville-Saint-Vaast. Elle permettra de fournir une cartographie du site encore inexistante au moment des levés et aidera à sa préservation et sa conservation. Le principal objectif est donc de réaliser une visite virtuelle de la carrière à travers un modèle de réalité virtuelle et une vidéo de quelques minutes illustrant les galeries, les nombreuses œuvres des soldats et leur histoire. Des modèles de réalité augmentée sont également prévus au niveau de certaines œuvres.

La combinaison de plusieurs techniques d'acquisition est une solution idéale pour atteindre les objectifs de ce projet. En effet, en couplant la lasergrammétrie, la photogrammétrie et les levés topographiques, la numérisation 3D du site est possible grâce à des mesures sans danger pour l'environnement, sans contact avec les œuvres fragiles. Différents niveaux de détails peuvent alors être acquis afin de documenter des sites complexes. Un modèle dit hybride, plus précis et plus complet, regroupant des données de différents types et sources, peut alors être obtenu.

## 2. Acquisitions sur le terrain

Au cours du mois de février 2020, une première mission d'acquisition de quatre jours a permis le levé de la carrière. Une partie de l'extérieur, à l'entrée des galeries, ainsi que la volumétrie du chemin souterrain principal de circulation a été levé par lasergrammétrie. Les zones présentant des œuvres ont été sujettes à des levés photogrammétriques. Un cheminement topographique a été mis en place afin de géoréférencer les différentes données acquises dans le système de coordonnées national RGF93 CC49<sup>2</sup>. Des sphères blanches ont été mises en place tout au long des galeries,

<sup>1</sup> EPCC : établissement public de coopération culturelle

<sup>2</sup> RGF93 CC49 : réseau géodésique français 1993 Lambert conique conforme zone 49

facilitant ainsi la consolidation des numérisations, c'est-à-dire le recalage des nuages de points entre eux. Plusieurs instruments ont servi pour les divers levés, à savoir une caméra Canon EOS 5D SR, un scanner laser FARO Focus 3D X330, un tachéomètre Trimble M3 ainsi qu'un récepteur GNSS<sup>3</sup> Trimble R10. Des levés avec un scanner laser mobile, le LiBackpack C50 de GreenValley International, ont également été effectués à l'intérieur des souterrains.



Figure 1 : Instruments utilisés : 1) Caméra Canon EOS 5D SR 2) Scanner laser FARO Focus 3D X330 3) Tachéomètre Trimble M3 4) Récepteur GNSS Trimble R10 5) Scanner laser GreenValley International LiBackpack C50.

Une deuxième campagne d'acquisition était prévue lors du mois d'avril 2020. En raison de la crise sanitaire liée au COVID-19, la mission a été reportée. Elle avait pour but de finaliser les levés des galeries et de compléter les données acquises auparavant. La crise a également engendré des conditions difficiles pour la réalisation des traitements de ce projet.

### 3. Modélisation 3D des numérisations

À la suite des levés, il est nécessaire d'effectuer des traitements sur les données acquises. Les numérisations photogrammétriques et lasergrammétriques sont, dans un premier temps, traitées individuellement en parallèle puis sont associées dans le but de créer un modèle hybride et d'aboutir, après certaines opérations, aux livrables requis.

Les différentes étapes de modélisation 3D des données sont exposées ci-dessous.

#### Photogrammétrie

Les données issues de la photogrammétrie ont été traitées avec le logiciel Agisoft Metashape. Elles concernent les zones où les combattants ont gravé les murs calcaires. Au total, treize zones ont été photographiées avec l'appareil photo reflex. Le choix des œuvres à documenter a été effectué par M. Gilles PRILAUX.

Le logiciel utilisé permet de construire des modèles selon la chaîne de traitement illustrée en figure 2. Après l'étape d'orientation des photos, le géoréférencement a été réalisé à l'aide des données lasergrammétriques, en mesurant des points caractéristiques dans les nuages déjà géoréférencés. Les étapes suivantes ont été les constructions du nuage dense de points, du maillage et de son texturage.



Figure 2 : Chaîne de traitement des données photogrammétriques utilisée avec le logiciel Agisoft Metashape.

Dix projets photogrammétriques ont été construits de cette manière, à savoir quatre zones allemandes et six zones américaines. Les trois zones restantes n'ont pas pu être modélisées par manque de données lasergrammétriques à leur niveau. Les modèles obtenus sont photo-réalistes et de haute précision. Les résultats des traitements sont donc des nuages denses de points ainsi que des maillages texturés en 3D. Ils sont d'une grande qualité visuelle et métrique mais sont également volumineux en raison de leur haut niveau de détail. Cette qualité permet une meilleure expérience immersive dans la réalité virtuelle, la vidéo ou pour le modèle de réalité augmentée par exemple. Les nuages denses de points sont exploités pour la réalité virtuelle alors que les maillages 3D sont utiles à la réalité augmentée, la vidéo de visite virtuelle ainsi qu'à la réalité virtuelle.

<sup>3</sup> GNSS : Global Navigation Satellite System

## Lasergrammétrie

Dans un premier temps, le calcul des coordonnées des points levés a été nécessaire à l'aide du logiciel Covadis (Geomedia) et de l'application 3DCONF. La descente dans la carrière souterraine s'effectue par une cheminée et rend ainsi impossible les visées pour un cheminement topographique traditionnel. Afin de surmonter cette difficulté, les numérisations de l'extérieur de la carrière et de la descente ont été géoréférencées grâce aux coordonnées des sphères blanches disposées au niveau de la partie extérieure de l'entrée. La consolidation et le géoréférencement des nuages de points ont permis d'accéder aux coordonnées (en RGF93 CC49) des sphères au pied de la cheminée et de calculer le reste des coordonnées des points en utilisant une transformation Helmert 3D, disponible avec 3DCONF. Un extrait cadastral de la zone en question a été superposé au cheminement topographique, permettant ainsi de vérifier l'orientation et l'étendue des galeries souterraines levées.

Dans un second temps, les données issues du scanner laser statique ont été traitées. Soixante-deux numérisations ont été consolidées et géoréférencées sous le logiciel FARO SCENE, grâce aux données topographiques calculées. Pour les étapes suivantes, le logiciel 3DReshaper a été utilisé. Les nuages de points ont subi des segmentations afin de nettoyer le bruit visible et gênant. Un rééchantillonnage d'un point tous les centimètres au niveau des nuages de points de l'intérieur des galeries a été nécessaire dans le but d'alléger les nuages et de faciliter les futures exploitations. Un traitement au niveau de la couleur de la végétation extérieure était essentiel pour obtenir un rendu plus réaliste.

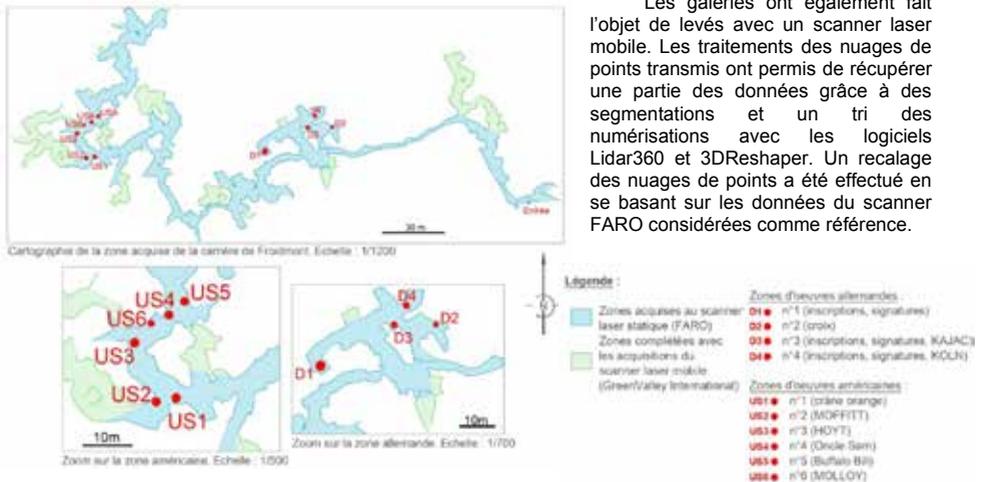


Figure 3 : Cartographie de la partie levée de la carrière et localisation des œuvres.

Le nuage de points global résultant de la modélisation 3D des données du scanner laser statique rend possible la création du modèle de réalité virtuelle, de la cartographie du site et de la volumétrie des souterrains utilisée pour la visite virtuelle. Les nuages de points issus du scanner laser mobile sont utilisés pour compléter la cartographie de la carrière et effectuer une comparaison des techniques d'acquisition statiques et mobiles.

## 4. Exploitation des résultats

La cartographie de la carrière de Froidmont a été réalisée à partir des nuages de points issus des scanners laser statique et mobile. Des plans de découpe horizontaux ont été extraits avec le logiciel RealWorks de Trimble. La modélisation en 2D et la mise en page du plan ont été réalisées avec Covadis.

La réalité augmentée est également un moyen de partager les données acquises. Afin de visualiser l'œuvre modélisée à l'aide d'un script, d'une cible et d'un QRCode, il est nécessaire de simplifier le maillage 3D texturé utilisé en réduisant son nombre de faces avec un logiciel, tel que

MeshLab par exemple. Les modèles de réalité augmentée rendent possible l'association entre le réel et des objets virtuels dans un environnement réel.

L'immersion dans un modèle de réalité virtuelle est une expérience qui permet au grand public d'interagir et de comprendre aisément des données présentées dans un espace virtuel en trois dimensions. Les résultats ont été exploités afin d'obtenir une réalité virtuelle plus réaliste, plus fluide, permettant une expérience immersive plus satisfaisante. Pour ce projet, plusieurs expérimentations et modifications ont amené à faire le choix de deux modèles différents. En effet, une première réalité virtuelle a été créée. Elle est constituée du nuage de points global du scanner laser FARO ainsi que des nuages denses de points des œuvres, permettant la découverte de la carrière dans sa totalité. Le

deuxième modèle ne comprend que les parties importantes du site, à savoir les zones proches des œuvres. Il est également composé du nuage de points tronqué du scanner laser statique et des maillages 3D texturés des œuvres, de manière à mieux apprécier les détails qu'elles présentent.

La vidéo de visite virtuelle de la carrière est un des principaux livrables requis pour ce projet. Elle présente en cinq minutes les galeries souterraines sous la forme d'une visite, la plus réaliste possible, le long de la carrière. La découverte des œuvres allemandes et américaines et leur histoire se fait au fur-et-à-mesure de l'avancée. Différents types de résultats sont exploités et assemblés pour obtenir la vidéo, à savoir le maillage volumétrique des souterrains, les nuages de points non rééchantillonnés de l'extérieur ainsi que les maillages texturés des œuvres.



Figure 4 : Exemples d'œuvres modélisées en 3D, présentes dans la carrière de Froidmont.

## 5. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a rendu possible la modélisation 3D d'une partie de la carrière de Froidmont et a permis d'entreprendre la conservation des vestiges de la Première Guerre mondiale qu'elle abrite. La diffusion au grand public est alors une possibilité grâce aux différents rendus.

En plus d'une simple immersion dans un modèle, la réalité virtuelle peut être considérée comme un outil de protection des sites. En effet, sa praticité est un avantage et permet donc d'accéder virtuellement aux lieux sans s'y rendre. L'environnement est alors accessible depuis n'importe où, avec l'équipement adéquat.

La visite virtuelle sous forme de vidéo permet de découvrir le site d'une autre manière et peut toucher un plus grand nombre de personnes grâce à son partage sur internet qui la rend plus accessible. La vidéo constitue ainsi un outil puissant de communication et s'inscrit dans le devoir de mémoire des soldats de la Grande Guerre.

Les modèles de réalité augmentée ont le pouvoir de générer un environnement hybride où virtuel et réel se mélangent. Ils suscitent un grand intérêt de la part du grand public, avec un rendu photo-réaliste qu'il est possible d'observer sur un écran. Les QRcodes permettant l'accès aux modèles de réalité augmentée seront disponibles dans le mémoire de fin d'études.

La cartographie des souterrains est d'une grande utilité au vu du manque de données concernant la carrière. La complexité de cette dernière couplée avec les risques d'effondrement, la fragilisent et rendent alors primordiale une documentation.

Ce projet pourra être complété en intégrant les données traitées issues d'une potentielle deuxième campagne d'acquisition. La construction des modèles photogrammétriques des trois dernières zones américaines déjà photographiées serait alors possible notamment grâce à leur géoréférencement. Un modèle de réalité virtuelle plus développé peut également être envisagé. Une carte interactive pourrait être mise en place, permettant une téléportation vers une zone et affichant les informations des œuvres. L'immersion serait alors plus vivante et pédagogique pour le grand public.

# Développement d'une méthode de vectorisation automatique des marquages de réseaux enterrés à partir d'orthophotographies.



*PFE présenté par :* Elisa **NORMIER**  
*Société d'accueil :* Sogelink  
*Directeur de PFE :* Maxime **WERLEN**  
*Encadrant :* Yoann **COURTOIS**  
*Correcteur :* Emmanuel **ALBY**



## 1. Contexte et objectif

Depuis 2005, avant tout démarrage de travaux sur le domaine public, la réglementation française (article R554-27 du Code de l'Environnement) rend obligatoire le marquage au sol des réseaux enterrés jusqu'à 2 mètres au-delà de l'emprise des travaux. Cette responsabilité incombe au maître d'ouvrage qui peut la déléguer, par mandat écrit ou par clause technique et financière dans le marché, à une entreprise ou à un tiers.

De plus, cette réglementation impose aux exploitants de réseaux de fournir les informations et les plans des réseaux de la zone de travaux lors de la réponse à la Déclaration de projet de Travaux (DT) et lors de la réponse à la Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT). Par ailleurs, la réglementation anti-endommagement (rendue obligatoire par l'arrêté du 27 décembre 2016) impose à chaque exploitant de réseaux d'indiquer la classe de précision A (meilleure précision), B ou C associée à chaque réseau.

En outre, les marquages de réseaux enterrés répondent à la norme P98-332 datant de février 2005 qui impose une codification des couleurs. Un type de réseau aura toujours ses marquages correspondants de la même couleur.

Ainsi, le contexte juridique actuel, de géoréférencement de l'ensemble des réseaux, implique que de nombreux marquages se croisent sur le terrain. Il devient alors parfois difficile d'avoir une vision globale de l'ensemble des réseaux.

C'est dans ce cadre que ce Projet de Fin d'Études (PFE) trouve sa place. Son objectif est de créer un outil pour faciliter le dessin vectoriel des marquages de réseaux enterrés réalisés avant le démarrage des travaux à partir d'orthophotographies de la zone. Les raisons de ce PFE sont multiples : gain de temps et de précision pour le géomètre, amélioration de la sécurité des chantiers, etc.

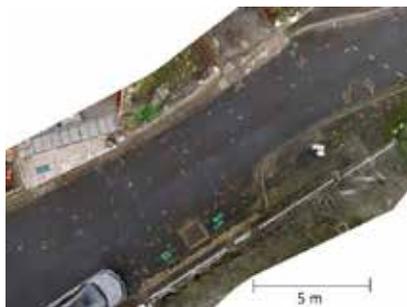


Figure 1 : Extrait d'orthophotographie (donnée interne à Sogelink).

## 2. Mise en place d'une chaîne de traitements

Après examen de différents chantiers, le choix a été fait de privilégier la vectorisation de marquages de réseaux enterrés représentés par des tirets (représentation utilisée en majorité). En effet, aucune réglementation ne norme la manière de représenter les réseaux sur le terrain (tirets, pointillées, lignes continues, etc.). Or, il est primordial de connaître la représentation à privilégier pour pouvoir traiter le maximum de chantiers possibles.

Il convient également de s'intéresser aux caractéristiques des réseaux pour prédire leurs positions et leurs comportements. En effet, certains types de réseaux sont considérés comme "flexibles", tandis que d'autres sont "rigides". C'est le cas, par exemple, du réseau d'assainissement qui est relativement linéaire et présente des coudes.

La connaissance des caractéristiques des réseaux (couleur de peinture, comportement, etc.) présente un grand intérêt pour pouvoir discriminer un réseau plutôt qu'un autre. Cela a permis la mise en place d'une chaîne de traitements comprenant la détection des marquages de réseaux enterrés et la gestion des éléments détectés.

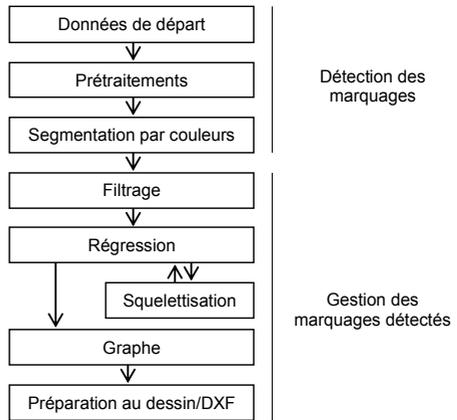


Figure 2 : Algorithme général proposé.

Un contrôle visuel sera tout-de-même nécessaire pour contrôler et vérifier la qualité des résultats obtenus, mais également pour traiter les zones indéterminées.

### 3. Étude approfondie de chaque étape de l'algorithme général

Ce PFE s'articule autour du pilotage par les risques avec des développements et des expérimentations. L'objectif final étant que ce projet ne présente plus d'élément bloquant pouvant le faire échouer dans le futur. Ainsi, chacune des étapes proposées dans l'algorithme général a été étudiée de façon approfondie avec une analyse du principe envisagé, des solutions existantes, des cas particuliers, etc. selon le critère de criticité (outil de priorisation utilisé) associé à chaque étape.

#### 3.1 Prétraitements

L'étape de prétraitements comprend, entre autres, le changement d'espace colorimétrique pour ne plus être dépendant des conditions de luminosité liées à l'acquisition. En effet, l'utilisation d'images couleurs en RVB (Rouge, Vert, Bleu) acquises à différents moments de la journée et/ou de l'année, implique un certain nombre de difficultés telles que les changements de luminosité (globale ou locale), la présence d'ombres et de variations de couleurs qui perturbent la détection fine des marquages de réseaux.

Pour pallier cette difficulté, les concepts d'invariance colorimétrique et d'espaces de représentation couleur (espaces colorimétriques) ont été introduits. Dans sa thèse, (Murgia, 2018) explique que l'invariance colorimétrique est le fait de "considérer que la couleur d'un objet est dissociable de la couleur de la lumière qui l'illumine". Autrement-dit, il s'agit de séparer la luminance (information relative à l'intensité de la lumière) de la chrominance (seconde information portée par la lumière et introduisant la notion de couleur).

Le choix a été fait, pour ce projet, d'utiliser un espace colorimétrique qui sépare la luminance et la chrominance. Ce qui n'est pas le cas de l'espace colorimétrique RVB où chacun des trois canaux contient à la fois des informations sur la luminance et sur la chrominance. Le principal intérêt de ce changement d'espace colorimétrique est d'écartier le problème lié aux différences d'expositions.

Canal	R	V	B	Y	Cb	Cr	
Valeurs	Point 1	173	113	139	128	134	156
	Point 2	126	75	108	88	138	151
	Point 3	168	108	133	123	133	156
	Point 4	167	102	126	118	132	159
	Point 5	107	72	104	82	140	146
Moyenne	148,2	94	122	107,8	135,4	153,6	
<b>Écart-type (<math>\sigma</math>)</b>	<b>29,8</b>	<b>19,1</b>	<b>15,4</b>	<b>21,2</b>	<b>3,4</b>	<b>5,1</b>	



Tableau 1 : Résultats d'un test de changements d'expositions.

### 3.2 Segmentation par couleurs et filtrage

Cette étape a pour objectif la détection des marquages de réseaux enterrés par rapport aux autres éléments de l'orthophotographie (fond, autres marquages, voitures, etc.).

La segmentation est une étape importante et généralement effectuée lors de traitements d'images. Elle consiste en la division de l'image en sous-ensembles homogènes, c'est-à-dire qui présentent des caractéristiques similaires. Il s'agit avant tout de la mise en place d'informations sémantiques sur les objets présents au sein de l'image (étiquetage des pixels). Le but est de faire en sorte que les pixels appartenant à une même zone (même objet) aient la même information sémantique (étiquette).

Les méthodes de segmentation peuvent être séparées en deux grandes catégories :

- les méthodes de segmentation par analyse de propriétés colorimétriques et d'intensité,
- les méthodes de segmentation par analyse de propriétés spatiales.

Compte tenu des possibilités et des résultats de chaque type de segmentation, le choix a été fait d'utiliser une segmentation par analyse des propriétés colorimétriques et d'intensité avec une segmentation par seuillage double suivie d'une croissance de régions. Cela permet de limiter le nombre de détections et notamment le nombre de fausses détections (faux positifs). Par ailleurs, la croissance de régions permet de limiter la sur-détection et la sur-segmentation.

Par la suite, un filtrage des différents éléments détectés est réalisé. Les critères de filtrage considérés sont directement liés aux nombres de pixels qui constituent l'élément détecté. Pour cela, la notion de composante connexe a été utilisée pour déterminer les propriétés de chaque élément détecté. Une fois les composantes connexes créées, des opérateurs morphologiques ont été utilisés pour regrouper des composantes connexes via un critère spatial ; et ainsi regrouper un marquage qui aurait été détecté en plusieurs éléments distincts.

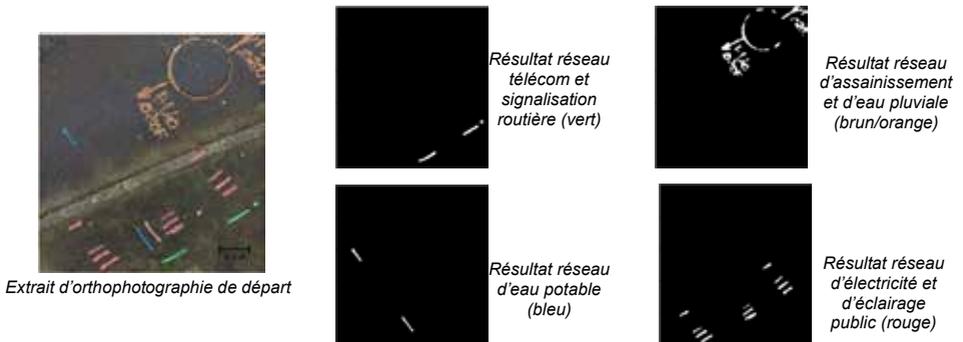


Figure 3 : Exemples de résultats après les étapes de prétraitements, segmentation par couleurs et filtrage.

### 3.3 Régression et squelettisation

La régression orthogonale, à réaliser sur l'ensemble des composantes connexes détectées, permet d'obtenir directement la droite moyenne. Cette approche apparaît comme très efficace pour les tirets "simples" (droits et isolés).

La squelettisation, quant-à-elle, est réalisée pour l'ensemble des composantes connexes complexes. Cela représente surtout les éléments tels que les intersections, les cercles, les chevrons, les écritures, etc. Elle consiste en la suppression de certains pixels de la composante connexe initiale pour ne conserver que ceux situés le long des axes principaux (c'est-à-dire des axes médians). Le but est de préserver la forme générale de la composante connexe initiale et d'en extraire les informations topologiques caractéristiques telles que les extrémités, les pixels d'intersections, le nombre de branches, etc.

Attention tout-de-même, la squelettisation est une opération sensible au bruit. Une faible variation dans la forme initiale engendre rapidement des variations importantes sur le squelette obtenu. Cela représente le défi majeur de la squelettisation. De plus, il existe de nombreux algorithmes disponibles avec différents résultats à la fin. Cependant, un squelette possède des propriétés invariantes intéressantes : l'homotopie (préservation de la topologie), la préservation de la géométrie, l'épaisseur unitaire et la réversibilité.

Ces deux étapes permettent une première gestion des éléments détectés. Voici une visualisation des résultats obtenus :



Figure 4 : Résultat de la détection et de la gestion des marquages (extrait d'orthophotographie).

### 3.4 Graphe et création d'un export DXF (Drawing eXchange Format)

Ces deux étapes, encore en développement, vont permettre de créer le fichier DXF associé à la vectorisation des marquages détectés. Cela concerne en majorité l'étude technique de la solution de liaison des éléments détectés ainsi que la traduction graphique de cette étude technique. L'idée est de conserver une logique métier pour la création des liaisons et non d'utiliser seulement une logique géométrique.

## 4. Conclusion

Les premiers résultats obtenus, après étude approfondie et développement en python de chacune des étapes jusqu'à l'étape de "squelettisation" incluse, permettent de se rendre compte que la majorité des éléments d'intérêts sont détectés. Toutefois, un contrôle et/ou un filtre sera à appliquer car les méthodes et algorithmes déployés ne sont pas infallibles et peuvent conserver certains artefacts. C'est le cas par exemple des feux arrières de voitures qui sont détectés en tant qu'éléments faisant partis du réseau d'électricité (en rouge) ou encore de certains éléments sur la pelouse (tels que des déchets) parfois détectés comme éléments du réseau d'assainissement (exemple de visualisation en haut à gauche de la figure 4, en orange).

L'ensemble des résultats obtenus sera comparé avec ceux obtenus par un géomètre en vue de pouvoir réaliser une évaluation de la sensibilité et de la précision de la détection et ainsi mettre en avant les avantages et inconvénients de cette chaîne de traitements.

---

### Référence bibliographique

Murgia, J. (2018) *Segmentation d'objets mobiles par fusion RGB-D et invariance colorimétrique*. Thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort-Montbéliard : 167p.

# Modélisation d'un site médiéval de Châtenois pour une valorisation grand public et une exploitation scientifique

PFE présenté par : **Lucie Thibaud**  
Société d'accueil : **Archéologie Alsace**  
Directeurs de PFE : **Jacky Koch et Florian Basoge**  
Correcteurs : **Mathieu Koehl et Emmanuel Alby**  
Encadrant : **Mathieu Koehl**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Châtenois est un village situé dans le sud du Bas-Rhin, proche de Sélestat. Il a la particularité d'abriter un quartier médiéval, que l'on peut facilement repérer par l'intermédiaire du double mur d'enceinte qui l'entoure.



Figure 1: Photographie de l'ensemble du site en 2013  
(Photo A. Warrington)

Le travail sur la commune de Châtenois a débuté il y a 17 ans, lorsque Jacky Koch, archéologue spécialiste de la période médiévale auprès d'Archéologie Alsace, a fait la découverte fortuite du mur d'un bâtiment datant du XIII<sup>ème</sup> siècle, après l'effondrement d'un mur de terrasse qui avait été construit postérieurement. A compter de cette découverte, des campagnes de fouilles ont été effectuées chaque année sur l'ensemble du site de Châtenois, et plus particulièrement sur le jardin du presbytère, où a été découvert le mur. Depuis, des vestiges allant du XI<sup>ème</sup> au XVII<sup>ème</sup> siècle ont été révélés sur la totalité du site.

A partir de 2012, le topographe Florian Basoge a débuté des acquisitions

photogrammétriques terrestres et aériennes régulières sur le site des fouilles, ce qui a permis de réaliser des modèles géoréférencés des différentes étapes de fouilles, qui ont fait l'objet du PRT de Guillaume Gibert, étudiant topographe à l'INSA de Strasbourg, en 2019.

Le projet présenté aujourd'hui prend la suite de ces travaux, et a pour objectif de fournir une modélisation générale du site médiéval exploitable à la fois par les scientifiques, mais également par le service de valorisation du patrimoine dans un but de mise à disposition pour le grand public.

Châtenois étant situé sur la route des vins d'Alsace, et sur le passage de nombreux sentiers de randonnée, c'est un village touristique. La mairie a déjà mis en place un sentier de découverte formé de panneaux explicatifs sur le pourtour du quartier ainsi que des fouilles. Ce projet vient en complément de ces panneaux explicatifs pour donner une vue d'ensemble du quartier et permettre de superposer les différents niveaux de fouilles qui ont été mis au jour. Cela permettra par la suite de pouvoir utiliser ces données dans divers projets de valorisation, par exemple en insérant le site historique dans l'environnement actuel à travers des projets de réalité virtuelle ou augmentée, ou en réalisant des animations temporelles.

## 2. Travaux de terrain

La réalisation de ce projet s'appuie en grande partie sur les projets photogrammétriques des étapes de fouilles réalisées au fil des années par Florian Basoge. Il a toutefois fallu procéder à des acquisitions sur le terrain, notamment pour pouvoir réaliser le modèle global. Les murs d'enceinte ont

été numérisés ainsi que l'intérieur du clocher de l'église, qui date du XIII<sup>ème</sup> siècle, et dans lequel, malgré les restaurations, des traces de maçonnerie de l'époque sont toujours visibles et pourront être mises en valeur à l'aide d'outils numériques.

Pour ces acquisitions les techniques de photogrammétrie et de lasergrammétrie ont été utilisées. Une numérisation de l'ensemble du site par photogrammétrie aérienne a permis de générer un modèle numérique de terrain (MNT) qui sert de support à l'intégration des autres éléments du site. Une partie des acquisitions du mur d'enceinte s'est faite par lasergrammétrie, car l'agencement des murs la rendait avantageuse, le reste a été acquis par photogrammétrie.

L'intérieur du clocher a lui été numérisé par lasergrammétrie, qui était la méthode la plus adéquate du fait de la faible luminosité ainsi que de la complexité de l'endroit.

Dans les deux cas, des sphères ainsi que des cibles ont été positionnées et relevées respectivement au tachéomètre et au GPS afin de pouvoir assurer le géoréférencement des modèles.

### 3. Modélisation des différents éléments du quartier

A chaque méthode d'acquisition correspond une méthode de traitement. Dans le cadre de ce PFE, trois méthodes de modélisation ont été mises en oeuvre :

- ◆ Par maillage à partir de nuages de points photogrammétriques
- ◆ Par maillage à partir de nuages de points lasergrammétriques
- ◆ Par primitives géométriques

#### Traitements photogrammétriques

Pour réaliser les traitements photogrammétriques des images, le logiciel *Metashape* (Agisoft) a été utilisé. Il propose une chaîne de traitement pour les données, qui est la suivante :

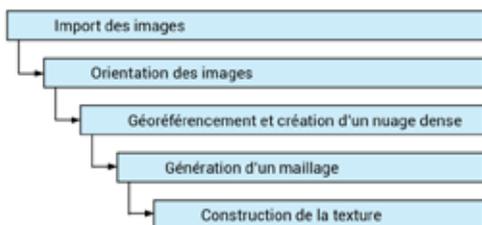


Figure 2: Chaîne de traitement au sein du logiciel metashape

en place une visite virtuelle il faut insérer la modélisation dans un moteur de jeu vidéo. Ce dernier ne peut pas prendre en charge l'animation d'un modèle trop lourd, qui résulte souvent dans ce cas en une succession d'images saccadées.

Une étape, portant le nom de « retopologie » a donc été ajoutée à cette chaîne de traitement, avant l'étape de texture. Elle consiste à réorganiser les faces du modèle de manière à réduire leur nombre, ainsi qu'à leur donner une cohérence spatiale, ce qui facilite ensuite l'étape de texture. Cette manipulation a été réalisée à l'aide du logiciel *Zbrush*, qui est, à l'origine, utilisé pour la modélisation de personnages 3D dans des jeux vidéos. La figure ci-dessous montre un exemple de retopologie d'un maillage triangulaire en un maillage quadrangulaire simplifié.



Figure 3: Pierre du pressoir avant (gauche) et après (droite) retopologie

## Traitements lasergrammétriques

La chaîne de traitement adoptée a été la suivante :

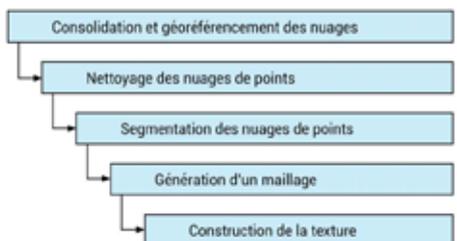


Figure 4: Chaîne des traitements lasergrammétriques



Les traitements photogrammétriques et lasergrammétriques ont permis d'obtenir des modèles géoréférencés, maillés et texturés des différentes étapes de fouilles, des murs d'enceinte ainsi que du sol.



La question s'est ensuite posée de la modélisation des bâtiments de l'intérieur du quartier. Ces habitations, appelées bâtiments du « contexte » ne présentent pas d'intérêt archéologique majeur, ayant toutes été rénovées depuis l'époque médiévale. Il a donc été décidé

de les modéliser en primitives géométriques, pour ne pas alourdir le modèle.

## Modélisation par primitives géométriques

La méthode de modélisation par primitives géométriques consiste à modéliser des objets à partir de formes très simples telles que des parallélépipèdes, des sphères ou des cylindres. Elle peut être plus ou moins complexe, selon le niveau de détail que l'on veut donner à la modélisation. Dans le cadre de ce PFE, le logiciel utilisé a été *Autodesk Maya*.

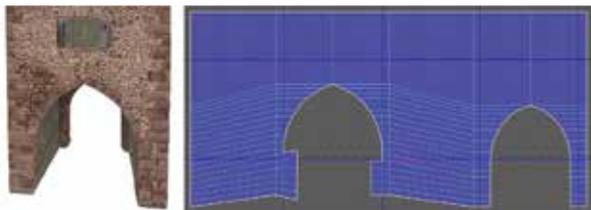


Figure 5: Exemple d'UV sur la tour-porte de Châtenois

En accord avec l'archéologue Jacky Koch, il a été décidé de modéliser les bâtiments du contexte en LOD2, c'est-à-dire sans texture ni matérialisation des débords de toit et des ouvertures. Cette décision se justifie par le fait qu'il n'y a pas besoin, d'un point de vue archéologique, de représenter l'aspect actuel des bâtiments,

et également par le fait que cela permet de montrer au spectateur que là n'est pas la partie principale du modèle. Ils ont été modélisés à partir d'un plan cadastral, contenant les empreintes des bâtiments.

Deux bâtiments présentant un intérêt archéologique particulier, la tour-porte située à l'entrée est du quartier, ainsi que l'extérieur du clocher de l'église se trouvant dans l'enceinte médiévale ont été modélisés plus finement, en LOD3.

A la différence des bâtiments du contexte, cette modélisation représente non seulement les ouvertures et ornements des édifices, mais également leur texture. L'application de celles-ci suit un procédé particulier dans *Maya*, qui est la création d'UV. Ces UV sont en fait un « dépliage » dans un espace 2D de l'objet en 3D. La texture est ensuite appliquée sur ces UV, ce qui permet d'avoir un meilleur contrôle sur son application, car une image étant un objet intrinsèquement bidimensionnel, il est plus aisé de la manipuler dans un espace au même nombre de dimensions.

Pour la plupart des textures, un prétraitement est réalisé à l'aide du logiciel *Photoshop*, pour redresser les images non orthogonales, ou agrandir une texture pour éviter les répétitions de motifs. La combinaison de ces méthodes permet d'obtenir des modèles à l'aspect réaliste tout en gardant un nombre de polygones permettant de manipuler le modèle de manière fluide.



Figure 6: Modélisation du clocher de l'église de Châtenois

## 4. Solutions de visualisation et de valorisation des résultats

L'objectif de ce PFE était de réaliser un modèle exploitable à la fois par les scientifiques et le grand public. Cette contrainte est valable dans la phase de modélisation, mais également lors de la recherche de solutions de visualisation. Pour la partie scientifique, la solution trouvée a été d'intégrer le modèle final dans un SIG, puis d'en proposer une visualisation sur une visionneuse Web. C'est une manière de regrouper tous les éléments du site dans un même modèle, ce qui permet de faire une synthèse de tous les travaux réalisés depuis 17 ans. Cette solution propose également d'attacher à chaque élément des métadonnées, qui sont particulièrement importantes en archéologie, car un élément sans sa description apporte peu voire aucune information. Cette solution est également intéressante dans une optique de valorisation car elle permet à l'utilisateur d'interagir avec le modèle à l'aide d'outils très simples.

Concernant la valorisation, l'objectif du PFE est d'essayer divers outils et de proposer des pistes pour la réalisation dans un prochain projet d'une solution de valorisation. La réalisation d'une visite en réalité virtuelle a été abordée. En effet, en intégrant le modèle dans un moteur de jeu, il est assez rapide de créer un personnage en vue à la première personne et de le faire déambuler dans le modèle. Les difficultés de cette solution viennent de la disposition en couches des éléments de fouilles, qu'il faudrait pouvoir afficher ou non, ce qui nécessite du temps passé sur le code de cette interaction entre l'utilisateur et le modèle. Cela reste néanmoins une solution intéressante et envisageable dans un prochain projet.

La solution retenue dans le cadre de ce projet a été la réalisation d'une vidéo dans le logiciel *Maya*. Celui-ci propose de créer des objets caméra et des les animer à l'aide d'une « timeline » et d'un éditeur.



Figure 7: Objet caméra dans le modèle général

*Maya* comporte également un moteur de rendu intégré, *Arnold*, qui permet de gérer les lumières et l'ambiance des scènes de la vidéo.

## 5. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de réaliser un modèle de l'ensemble du quartier en combinant diverses méthodes de numérisation. Au final, le modèle peut être utilisé par les archéologues mais propose également un contenu accessible au grand public, à travers des outils interactifs, qui peuvent attirer la curiosité du visiteur et aiguïser son intérêt pour le site. Les outils présentés dans ce projet sont une base de données concernant le site, qui pourra être enrichie par de nouvelles initiatives lors d'un prochain travail, sur le modèle lui-même à travers la texture des bâtiments du contexte par exemple, mais également sur la visualisation à travers de potentielles visites en réalité virtuelle ou augmentée, qui permettront de promouvoir le site de Châteinois.

Comme nous l'a récemment montré la crise du Covid-19, l'accès à un site historique peut rapidement se trouver mis à mal, sans que l'on y soit forcément préparé. Durant le confinement, de nombreuses initiatives de la part des acteurs du monde de la culture comme les cinémas et les musées se sont mises en place pour permettre aux citoyens d'avoir accès à un contenu culturel, et cela a contribué à démontrer à quel point la digitalisation de monuments est indispensable dans la conservation et la mise à disposition du patrimoine historique.

# Reconnaissance automatique d'objets pour le jumeau numérique ferroviaire à partir d'imagerie aérienne



PFE présenté par : Valentin Desbiolles  
Société d'accueil : ALTAMETRIS Lyon  
Directeur de PFE : M. André Pereira  
Correcteurs : Mme. Hélène Macher  
M. Emmanuel Alby  
Encadrant : M. Pierre Assali



## 1. Les besoins formulés par l'entreprise

Par sa collaboration étroite avec le groupe SNCF, l'entreprise ALTAMETRIS est souvent missionnée pour la réalisation de plans topographiques des lignes de chemin de fer. Des acquisitions photogrammétriques et/ou LiDAR aéroportées (drones ou hélicoptères) sont réalisées afin de produire des orthophotos ou ortho-lidar servant de support pour le report de plans topographiques. Ces plans permettent alors de situer les objets de voies utiles au bon fonctionnement de la ligne. Aujourd'hui, ce travail de report représente une part importante dans le temps nécessaire à la réalisation de la mission. Cette opération fastidieuse est également source de nombreuses erreurs impliquant des contrôles renforcés qui impactent inévitablement l'efficacité de l'ensemble de la chaîne.

Il est alors question de savoir si le report pourrait être automatisé, sachant que les objets de voies répondent la plupart du temps à des modèles standards. Un report automatique doit ainsi permettre un gain de temps tout en garantissant le niveau de précision exigé par le cahier des charges.

## 2. Les attentes sur la solution à fournir

La solution à concevoir s'appuiera sur l'analyse d'orthophotographies aériennes (résolution de 1cm à 5 cm par pixel) dans le domaine du visible. L'outil à déployer devra réaliser deux tâches majeures. Dans un premier temps, il est question de reconnaître et localiser sur l'image les objets de voies à reporter de manière automatique, en sorte, remplacer l'œil de l'opérateur qui repère où se trouve l'objet d'intérêt sur l'orthophoto.

Dans un second temps, l'outil procédera à une insertion des objets détectés dans un plan DAO. Tous les objets de voies sont associés à une représentation standard par une norme mise en place par SNCF : la norme EPURE. Cette norme regroupe un ensemble de blocs types à utiliser pour l'insertion de l'objet dans un plan. C'est pourquoi nous parlerons d'insertion en bloc des objets détectés. En accord avec l'ensemble des membres de l'équipe en charge de la réalisation des plans topographiques, trois objets spécifiques ont été retenus dans le cadre de cette étude : les balises KVB ((K)Contrôle de Vitesse par Balises), les regards SES ainsi que les armoires SES (Système Electrique et Signalisation) présentés ci-contre sur la figure 1.



Figure 1 – Instances des objets de voies à détecter pour notre étude - document interne SNCF

### 3. Une phase de détection automatique

La méthode retenue pour la détection et la localisation des objets d'intérêt sur l'orthophoto s'est portée sur le réseau de neurones Mask-R-CNN. Les principaux avantages d'un tel outil résident dans :

- Sa robustesse : le réseau est capable de s'adapter aux variations de formes des objets à détecter qui surviennent notamment par la présence de masques (branches d'arbres, buissons, ballast) mais aussi d'aspects pouvant provenir d'un changement de luminosité au passage d'un nuage, la vétusté de l'objet atténuant sa teinte, etc ;
- Sa précision avec la génération d'un masque de l'objet (pixels composant l'objet sur l'image) permettant alors de travailler au plus proche de l'objet s'avérant utile en vue d'une extraction de caractéristiques.

La mise en place d'une telle solution passe par une phase d'apprentissage du réseau. Le concept vise à labéliser des images, c'est à dire indiquer où et quels objets s'y trouvent. Le réseau peut alors utiliser ces images afin de réaliser des prédictions et voir s'il s'est trompé ou non. En cas de mauvaises détections, le réseau est capable de modifier la valeur de ses paramètres afin de ne plus commettre cette erreur. Le jeu d'entraînement est donc fondamental et conditionne les performances du réseau. Il est donc nécessaire de disposer de plusieurs images des objets à détecter sous différents aspects pour couvrir tous les cas d'apparition (présence de masque, teinte plus foncée au passage d'un nuage, etc).

Dans nos travaux, un travail a été fait de manière à rendre plus efficace la conception d'un jeu d'entraînement.

Pour savoir ce que contient une image pour le réseau, il est nécessaire que l'opérateur détoure à la main les contours des objets d'intérêt. Cette tâche est donc très fastidieuse pour l'opérateur dans le cas d'objets aux contours complexes.

ALTAMETRIS dispose de nombreux plans DAO d'anciennes missions réalisés sur base d'orthophotos. Or un plan AutoCAD s'avère être la labélisation d'une orthophoto, sur laquelle nous dessinons les contours d'un objet d'intérêt. Sur ce constat et des données à disposition, nous avons produit un programme capable de générer automatiquement des jeux d'entraînement compatibles avec le réseau utilisé.

L'analyse des calques des plans existants permet d'extraire, pour chaque instance des objets d'intérêt, son emprise géographique et donc son "masque" sur l'image source. En parallèle, un autre programme est appelé afin de découper l'ortho-image brute en imagettes de dimensions réduites exploitables pour un réseau de neurones. Il est important de noter que le fichier de géoréférencement est recalculé pour chaque imagette. Enfin, un script permet d'associer une imagette à l'objet détecté sur AutoCAD grâce à ses coordonnées et au fichier de géoréférencement de l'imagette. Un jeu d'entraînement peut alors être constitué sous les normes MS-COCO (format standard des jeux d'entraînement s'appuyant sur la base de données COCO) et sous la forme d'un format JSON. Au moment de l'écriture de ce rapport, notre jeu d'entraînement contient 750 instances de balises KVB, 250 instances d'armoires SES et 800 instances de regards SES



(a) Détection de 2 balises KVB

(b) Détection biaisé d'une armoire SES

(c) Détection d'un regard SES

Figure 2 – Détections produites par le réseau de neurones

Après avoir mis en place cette solution entièrement automatisée, nous disposons d'un outil prenant en entrée une orthophoto et fournissant en sortie les masques de nos objets détectés avec un label pour les identifier.

Plusieurs indicateurs nous permettent d'analyser la qualité des détections de notre réseau. Le plus largement répandu reste le mAP (*mean Average Precision*).

Pour définir à quoi il réfère, il est nécessaire d'introduire les notions de précision et de rappel. La figure 3 ci-contre présente ces deux notions de manière graphique et visuelle. Le mAP correspond à la valeur moyenne de la courbe présentée en figure 4 comptant sur un axe la précision et sur l'autre le rappel.

Si la précision désigne le taux de faux positifs (objet déclaré par erreur comme un objet d'intérêt) et le rappel le taux de faux négatifs (objet d'intérêt n'ayant pas été détecté), le mAP permet de réunir ces deux notions afin de juger si le réseau détecte bien tous les objets d'intérêts en faisant le moins d'erreurs possibles.

Dans l'état actuel des travaux, notre réseau présente un mAP de 0.89 sur un jeu de validation qui laisse sous-entendre que peu d'objets d'intérêt sont oubliés.

Il est également possible de fournir les taux de vrais-faux positifs sur une orthophoto test :

	Taux vrais positifs	Taux faux positifs
Nombre	22	7
Pourcentage	75,9	24,1

#### 4. Une phase d'insertion automatique

Les objets de voies possèdent tous un bloc prédéfini selon la norme EPURE mise en place par SNCF. L'insertion de ces objets dans un plan DAO revient donc à déterminer les paramètres d'insertion du bloc pour chaque objet et d'exécuter la commande *Insertion en bloc* d'AutoCAD de manière automatique. Pour les objets sur lesquels portent notre étude qui sont de formes rectangulaires, les paramètres d'insertion sont :

- Un point d'insertion ;
- Un azimut ;
- Les dimensions de l'objet : largeur et hauteur.

Toutes ces informations peuvent être extraites à partir des coins de l'objet, qu'il est possible d'obtenir à partir de son masque. La solution a donc inclus un programme permettant l'extraction des coins du masque, puis de calculer les paramètres d'insertion cités au paragraphe précédent.

En ce qui concerne le processus d'insertion en bloc, plusieurs fonctions intégrables dans AutoCAD ont été développées permettant de rendre automatique l'insertion en bloc dans AutoCAD et de façon détournée. En effet, la commande ne passe plus par une sollicitation de l'opérateur pour renseigner les paramètres d'insertion mais va directement chercher l'information dans le résultat de la fonction précédente, rendant l'insertion complètement automatique.

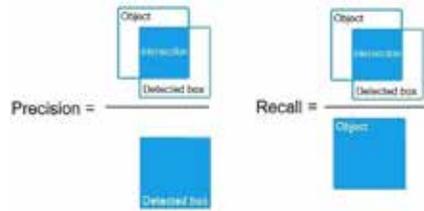


Figure 3 - Définition des indicateurs de précision et de rappel  
Extrait de : Tan,R.J.(2019). Breaking Down Mean Average Precision.

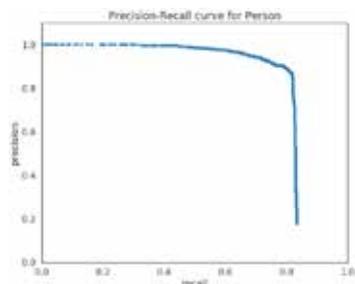


Figure 4 – Courbe définissant le mAP : *mean Average Precision*  
Extrait de : Tan,R.J.(2019). Breaking Down Mean Average Precision.

Toutefois, si l'outil reste autonome, il nécessite l'appui de l'opérateur pour une phase de contrôle visuel comme montré en figure 6. Une dernière fonction a donc été mise en place afin de centrer la vue sur les objets insérés afin que l'opérateur puisse au choix valider l'insertion, l'invalider en supprimant le bloc inséré (cas d'une fausse détection) ou corriger l'insertion en repositionnant le bloc, corrigeant l'orientation, etc.



Figure 5 – Résultat d'une insertion automatique avec zoom sur la zone cible présentant l'insertion de 3 balises KVB dont 2 vrais positifs et 1 faux positif

## 5. Etude de précision et rôle de l'opérateur

La solution proposée dans ce projet a pour but d'alléger et d'accélérer l'insertion des objets de voies concernés dans cette étude. Néanmoins, les résultats d'un réseau de neurones ne sont pas parfaits et doivent rester une aide à la détection. En effet, chaque détection du réseau peut être considérée comme vrai positif ou faux positif.

Paramètre d'insertion testé	Norme du vecteur erreur sur le point d'insertion des vrais positifs	Différence entre la largeur vraie et celle de l'objet analysé	Différence entre l'attribut vraie et celui de l'objet analysé
	(km)	(km)	(mètre)
Moyenne	3	5	2
Ecart type	2	3	1

Figure 6 – Données établies sur une orthophoto test présentant 25 objets

Si le but est de maximiser le taux de vrais positifs, il est aussi préférable d'augmenter le taux de faux positifs par rapport aux faux négatifs. En effet, il est plus facile pour l'opérateur de supprimer une fausse détection que de rechercher un oubli sur l'orthophoto. Ce constat a donc été intégré dans le paramétrage du réseau mais demande donc à l'opérateur d'assister le réseau. Si l'insertion doit s'avérer plus rapide, la solution ne remplace pas l'opérateur qui reste le seul décideur de son plan.

## 6. Conclusion

Au terme de nos travaux, la solution proposée prendra la forme d'une série de programmes. Cette chaîne de traitement contient deux branches principales, la première en charge de la génération d'un jeu d'entraînement automatique basé sur les plans AutoCAD réalisés sur des anciens projets et une autre branche dédiée à la détection des objets d'intérêt puis leurs insertions dans un plan DAO. Cette dernière prend en charge la préparation de l'orthophoto sur laquelle l'opérateur travaille (découpage de l'image en imquettes, génération des fichiers de géoréférencement associés), la détection des objets d'intérêt (en faisant tourner le réseau Mask-R-CNN) ainsi que l'extraction des caractéristiques géométriques nécessaires pour l'insertion (les coins de nos objets dans notre situation). La deuxième partie en charge de l'insertion a été implémentée directement dans l'application AutoCAD et prend la forme d'un plugin AutoCAD. Ces fonctions permettent alors l'ouverture d'un nouveau dessin vierge disposant de tous les calques standards pour le report d'objets de voies, l'insertion automatique des objets détectés à la bonne localisation, orientation et aux bonnes dimensions ainsi qu'une phase de contrôle qui dirige la fenêtre AutoCAD sur les objets insérés par notre solution en guise de contrôle pour l'opérateur.

# Etude sur la division primaire en application de l'article R. 442-1 a) du Code de l'Urbanisme au sein du cabinet de géomètres-experts AGATE (Grenoble 38)



PFE présenté par : **Marion GRANJON**  
Société d'accueil : **AGATE,**  
*Cabinet de géomètres-experts*  
Directeur de PFE : **M. Jean-Luc ROUX**  
Correcteur : **M. Régis LAMBERT**



---

## 1. Définition et objectifs de l'étude

La division est une action qui s'appuie sur l'unité foncière et a pour finalité le morcellement de cette dernière. Elle est réglementée par le code de l'urbanisme qui, de ce fait, distingue deux cas majeurs de division foncière : celles constitutives d'une autorisation d'urbanisme (tel que les lotissements) et les autres (division primaire, PCVD ...).

Chaque type de division, qu'elle soit constitutive d'une autorisation d'urbanisme ou non, qu'elle soit en propriété ou en jouissance, peut engendrer différentes autorisations (PA, DP ...) délivrées dans le but de construire.

La division en propriété est la plus répandue et correspond par exemple à la vente d'un lot issu d'une division. La division en jouissance, quant à elle, se caractérise de manière la plus répandue sous forme de bail.

L'encadrement de la procédure pour les divisions n'est pas nouveau : la première réglementation est apparue durant la première guerre mondiale, et a abouti à la promulgation de la loi dite Cornudet du 14 mars 1919 instaurant "*un plan d'aménagement, d'embellissement et d'extension*" ou PAEE. Sa modification, en date du 12 juillet 1924 a permis la mise en place d'autorisation pour les divisions du sol (lotissements).

La division primaire, quant à elle, est définie par l'article R. 442-1 a) (Décret n°2012-274 du 28 février 2012 art.5), précédemment R. 315-2 d), du code de l'urbanisme :

*« Ne constituent pas des lotissements au sens du présent titre et ne sont soumis ni à déclaration préalable ni à permis d'aménager :*

*a) Les divisions en propriété ou en jouissance effectuées par un propriétaire au profit de personnes qui ont obtenu un permis de construire ou d'aménager portant sur la création d'un groupe de bâtiments ou d'un immeuble autre qu'une maison individuelle au sens de l'article L. 231-1 du code de la construction et de l'habitation [...] ».*

La division primaire est une procédure simple à mettre en œuvre, qui est exclue de la procédure de lotissement. En effet, le projet est connu dans sa globalité (définition des parties privatives, communes, aménagements, constructions) avant que la division ne soit réalisée : le respect de l'ensemble des règles du PLU (plan local d'urbanisme), notamment, est examiné au moment de la demande du permis de construire.

Ainsi, elle ne nécessite pas obligatoirement de plan de division dans le dossier de permis de construire, contrairement à la procédure de PCVD, mais peut être grandement recommandé néanmoins.

Par ailleurs, la division primaire a dernièrement connu un essor du fait de la caractérisation de lotissement dès le premier lot détaché (depuis l'ordonnance n°2005-1527 du 8 décembre 2005 entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> octobre 2007). Cela en fait une procédure à fort potentiel pour les années à venir du fait de la diminution d'espaces constructibles et l'augmentation constante de la demande. En effet, en plus de sa facilité d'utilisation, cette procédure permet une surdensification de l'habitat.

Néanmoins, ce type de division soulève de nombreuses questions qui restent dans l'ensemble sans réponses précises. Cela apporte alors un flou dans la manière d'appliquer la loi et peut de ce fait, être la source d'insécurité juridique pour les pétitionnaires.

Ce PFE aura donc pour objectif d'évaluer et mettre en avant les problématiques liées à cette procédure pour tenter d'en extraire une méthode d'application harmonisée auprès des professionnels de l'aménagement.

Les questionnements majeurs sont les suivants :

- Quelle est l'assiette sur laquelle déposer le permis de construire ? Faut-il le déposer sur l'unité foncière dans sa globalité, c'est-à-dire celle existant avant la division ; ou anticiper la division et dans ce cas le déposer sur la seule partie qui recevra les constructions ?
- Quelle est l'assiette sur laquelle déposer le permis modificatif ? Quelles sont les difficultés liées au permis modificatif dans ce cas ?
- Comment appliquer les règles d'urbanisme (prospect, hauteur bâti ...) ?
- Comment gérer plusieurs divisions simultanées au regard des différents codes (urbanisme, environnement) ?
- Quelles sont les conséquences sur le surplus après achèvement, notamment au regard du droit de l'urbanisme, du code de l'environnement ?

## 2. Contexte de l'étude

L'urbanisation connaît une croissance constante. En 2018, 55% de la population mondiale vivait dans des zones urbaines. Dans dix ans, elle devrait être de 60% (Aboulnaga, Elwan, & Elsharouny, 2019).

Cela va engendrer dans les années à venir, une demande accrue de construction, ce qui impliquera des montages juridiques complexes pour pourvoir à cette demande. Par ailleurs, on le voit déjà, une des conséquences de la pandémie actuelle est l'augmentation de la demande de maisons individuelles. Il est donc important que la procédure de division primaire soit comprise de tous (architectes, promoteurs, notaires, services instructeurs ...) que ce soit pour son intérêt, mais également pour les démarches de sa mise en œuvre.

Il s'avère qu'au sein même de la profession de géomètres-experts, les questionnements énoncés plus haut sont toujours d'actualité. En effet, bien que globalement connue, la procédure divise quant à sa mise en œuvre, notamment au moment du dépôt du PC pour la détermination de l'assiette ainsi que pour l'application des règles d'urbanisme. De ce fait, ce sujet répond à un besoin professionnel et permettra, nous l'espérons, d'apporter un début de réponse.

## 3. Etude bibliographique

### 3.1 L'unité foncière comme notion de base du droit de l'urbanisme

Le terme d'unité foncière définit plus communément le terrain, une parcelle ou un îlot de propriété. Cette notion est la base sur laquelle reposent les différentes lois et règles d'urbanisme ainsi que les concepts utilisés dans le cas de construction ou de division, notamment. Bien que cette notion soit le fondement de toute opération d'urbanisme, il n'existait pas de réelle définition, ce qui peut sembler paradoxal, avant une jurisprudence publiée en 2005 (Légifrance, 2005).

Cette dernière établit une définition qui est la suivante : « *Considérant qu'une unité foncière est un îlot de propriété d'un seul tenant, composé d'une parcelle ou d'un ensemble de parcelles appartenant à un même propriétaire ou à la même indivision* ».

La notion d'unité foncière est régie aussi bien par le droit privé (droit des biens, droit de propriété) que par le droit de l'urbanisme (droit à construire). Cette dualité nécessite donc une application des lois réfléchie, afin que les concepts d'urbanisme respectent les principes du droit privé (Mas & Calmels, 2007).

En règle générale, le droit de propriété est désigné comme étant l'élément caractéristique de l'unité foncière. Toutefois, c'est le droit de construire rattaché au droit de propriété qui, ici, va faire l'objet d'une attention plus détaillée. L'ancien article L. 112-1 du Code de l'urbanisme (abrogé en 2000) définit le droit à construire comme étant « [...] *attaché à la propriété du sol* ». Ainsi, le droit de construire ne peut exister seul.

En effet, le droit de l'urbanisme régit la constructibilité inhérente à la propriété d'une (ou plusieurs) unité foncière. Le droit de construire peut être traduit alors comme étant le droit d'utiliser cette constructibilité. Cette dernière résulte entre autre de l'application des règles d'urbanisme énoncées dans le PLU (CES, implantation, hauteur ...).

### **3.2. La division d'une ou plusieurs unités foncières**

Comme nous l'avons précisé ci-dessus (Cf §1), la division est une action qui s'appuie sur l'unité foncière et a pour finalité le morcellement de cette dernière. Rappelons qu'il existe deux cas de division : celles nécessitant une autorisation d'urbanisme et les autres.

La réalisation d'un lotissement nécessite l'obtention d'autorisations d'urbanisme. Il en existe deux types selon les conditions d'emplacement et de réalisations d'aménagement commun :

- Le permis d'aménager si le lotissement se situe dans le périmètre d'un site protégé ou qu'il y a création d'aménagements communs à plusieurs lots
- La déclaration préalable sinon.

### **3.3. La division primaire, division non constitutive de lotissement**

La division primaire telle que définie à l'article R. 442-1 a) ne constitue pas un lotissement au regard du Code de l'urbanisme.

Le fait de ne pas suivre la procédure de lotissement permet un assouplissement certain notamment par la non obligation de viabiliser les lots avant leur vente. Il y a également possibilité d'éviter le recours au préfinancement des travaux d'aménagement de l'opération.

Concernant la procédure de division primaire, il est apparu que l'assiette foncière sur laquelle déposer le permis de construire se révèle complexe à définir. On constate d'ailleurs que la jurisprudence de la Cour Administrative d'Appel (CAA) a connu des revirements. Les institutions juridictionnelles n'ont pas donné de réponse satisfaisante à ce jour.

Le CAA de Versailles en 2007 (Légifrance, 2007) avait établi que le permis de construire devait être délivré avant la division du terrain et donc, porter sur l'ensemble de l'assiette foncière initiale.

Puis en 2013, le CAA de Lyon (Légifrance, 2013) vient contredire cette décision en admettant que la demande de permis de construire ne devait porter que sur la superficie où des travaux seraient effectués, alors que le CAA de Versailles avait évoqué l'ensemble de l'unité foncière

Ces contradictions ne permettent pas aux professionnels de conseiller de manière certaine leurs clients et ils ne suivent donc que leur propre démarche de réflexion. La difficulté réside dans l'interprétation que chaque professionnel peut en faire, créant une incertitude sur le plan juridique qui est pourtant à la base des conseils prodigués dans ce métier.

A ce stade, seule une décision rendue par le Conseil d'Etat permettrait d'éclaircir la situation.

D'autre part, ce questionnement en amène un autre, relatif à la manière d'appliquer les règles d'urbanisme. En effet, elles sont établies sur l'ensemble de l'assiette du projet avant division sauf si le PLU précise l'inverse. Dans ce cas, elles sont appliquées lot par lot.

Cela implique donc que le projet soit réalisé en se basant sur l'unité foncière et non sur le lot résultant. De ce fait, les règles de prospect sont définies par rapport à la limite divisoire et non comme une construction sur un même terrain. De plus, il est possible de construire tout en ne respectant pas la hauteur du bâti par rapport à la limite car sinon il s'agirait d'une procédure de DP et donc constitutive de lotissement. Bien que le PLU impose des coefficients d'emprise au sol (CES), la procédure de division primaire peut avoir pour conséquence une densification de l'habitat.

Une autre problématique évoquée dans ce sujet porte sur le permis modificatif. Le permis de construire obtenu dans le cadre d'une procédure de division primaire entre dans le champ d'application du permis modificatif.

Un modificatif est censé intervenir avant l'achèvement de l'objet du permis initial. Mais il ne pourrait être délivré si le permis primitif n'était pas exécuté de manière conforme ; en revanche, il serait délivré pour permettre de le régulariser.

Si la division a déjà été réalisée et que le modificatif est obtenu et mis en place après, l'unicité de l'autorisation n'est plus respectée, et, de ce fait, la division serait qualifiée de « *DP à la formation de cette autorisation* » (Durand, 2013) et rentrerait alors dans les procédures dites de lotissement. Dès lors, la question est de définir l'assiette foncière sur laquelle déposer ce permis modificatif ainsi que les conséquences.

#### 4. Conclusion et perspectives

Il apparaît donc que cette procédure, bien que simple dans sa mise en œuvre révèle un questionnement susceptible de générer une insécurité juridique lors des montages. En effet, le propriétaire de l'unité foncière initiale pourrait contester l'autorisation de construire déposée.

L'objet de ce PFE est, dans un premier temps, de collecter des informations (évolution du droit, état du droit actuel tant légal que jurisprudentiel, pratiques des professionnels, questionnements ...). Ce recueil d'informations permettra dans un second temps, de poser de manière synthétique les problématiques relatives à cette procédure, dans l'optique de sécuriser les montages. L'objectif final étant de permettre aux professionnels d'avoir accès, dans un seul document, aux données afin de mettre en œuvre ce type de division de manière sûre.

*Se référer au mémoire complet pour l'ensemble des résultats*

#### Références

- 
- Aboulnaga, M. M., Elwan, A. F., & Elsharouny, M. R. (2019). Climate Change Adaptation Scenarios in Developing Countries. In *Urban Climate Change Adaptation in Developing Countries: Policies, Projects, and Scenarios* (pp. 233–260). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05405-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05405-2_8)
- Durand, P. E. (2013). *Le nouveau régime des divisions foncières dites « primaires » (3e partie)*. Retrieved from [http://jurisurba.blogspot.com/archives/category/divisions\\_foncieres/index-1.html](http://jurisurba.blogspot.com/archives/category/divisions_foncieres/index-1.html)
- Légifrance. *Conseil d'Etat, 1ère et 6ème sous-sections réunies, du 27 juin 2005, 264667, mentionné aux tables du recueil Lebon.*, (2005).
- Légifrance. *Cour Administrative d'Appel de Versailles, 2ème Chambre, 29/03/2007, 06VE01147, Inédit au recueil Lebon.*, (2007).
- Légifrance. *Cour administrative d'appel de Lyon, 1ère chambre - formation à 3, 12/11/2013, 13LY00584, Inédit au recueil Lebon.*, (2013).
- Mas, J.-P., & Calmels, L. (2007, June). Unité foncière, droit de construire et démembrement de propriété. *Construction Urbanisme*.

# Etude de la norme LADM, potentiel modèle pour le cadastre suisse et français



*PFE présenté par :* **Jean Lou Combe**  
*Société d'accueil :* *Direction de l'Information du Territoire du canton de Genève*  
*Directeur de PFE :* *Laurent Niggeler*  
*Correcteur :* *Jacques Ledig*  
*Encadrant :* *Mayeul Gaillet*

---

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

La norme ISO:19152, parue en décembre 2012, introduit le Land Administration Domain Model (L.A.D.M.) ou Modèle du domaine de l'administration des terres en français. Elle a été élaborée par le comité technique ISO/TC 211, qui gère le domaine de l'information géographique/géomatique. Cette norme concerne les informations relatives à la gestion du territoire et fournit un modèle conceptuel de leur administration. Le LADM n'a pas pour but de remplacer les systèmes existants, mais plutôt de les décrire dans un langage formel pour avoir une meilleure idée des similitudes et différences des systèmes d'administration des terres dans le monde. Il s'agit donc d'une norme descriptive, et non pas normative.

Le canton de Genève a pour particularité d'être très proche géographiquement de la France et partage avec elle près de 95% de ses frontières. L'attractivité de la ville et de la région font que beaucoup de Français viennent y travailler. Le canton connaît donc un climat d'échanges transfrontaliers très fréquents. La Direction de l'Information du Territoire du canton de Genève (D.I.T.) s'est donc associée avec Géofoncier, société de l'Ordre des Géomètres Experts qui gère le portail éponyme pour mener l'étude de la norme LADM sur la base des données suisses et françaises et la mettre en pratique sur une zone pilote transfrontalière.

Les objectifs de ce projet sont d'évaluer les avantages et inconvénients de la norme pour les systèmes actuels, notamment pour une mise à jour permanente. L'étude du contenu de l'ISO:19152, afin d'en comprendre les concepts et les applications, est la base de ce projet qui consistera à dresser un état de l'art des expériences réalisées sur la norme en Suisse et en France ainsi qu'à l'étranger, mais également à réaliser un prototype d'un modèle de gestion des terres respectant la norme LADM avec les données disponibles en France et en Suisse, puis de le mettre en ligne sur la plateforme ESRI du canton de Genève et sur le portail Géofoncier. C'est à travers la réalisation de ces étapes que l'évaluation des concepts de la norme et de leur compatibilité avec les systèmes existants s'effectuera et permettra de développer une réflexion sur les points clés de la norme qui pourraient être réutilisés et sur les lacunes ou incompatibilités, et les solutions qui pourraient être envisagées.

## 2. Présentation de la norme

La norme LADM se concentre sur une partie du vaste domaine qu'est l'administration des terres, à savoir la gestion des droits, restrictions et responsabilités (appelés RRR dans la norme pour "Right, Restriction et Responsibility") associés à la terre, ainsi que l'association des aspects administratifs aux composants géométriques, tels que les entités spatiales, en deux ou trois dimensions, les lignes et les points. La norme a pour objectifs d'offrir une base évolutive de développement et d'amélioration de systèmes d'administrations des terres ainsi que de permettre à des parties impliquées de communiquer, qu'elles soient issues d'un même pays ou non, à travers le modèle grâce à un vocabulaire commun, c'est-à-dire une ontologie. Le développement de la norme s'est axé sur le respect de plusieurs points : couvrir les aspects communs de l'administration des terres par le monde, rester aussi simple que possible pour être utile dans la pratique, respecter les

concepts déjà émis par le comité technique ISO/TC 211 et s'appuyer sur le cadre du document « Cadastre 2014 », [Kaufmann & Steudler, 1998], émis par la FIG, Fédération Internationale des Géomètres.

L'ISO:19152 fournit un modèle conceptuel pour un modèle d'administration des terres à travers quatre paquetages relatifs aux :

- Parties, c'est-à-dire l'ensemble des individus ou organisation jouant un rôle dans une transaction relative aux droits.
- Unités administratives, c'est-à-dire les RRR mentionnés plus haut, les sources administratives, et les unités administratives de base, appelées BAunit, qui correspondent à une entité administrative sur laquelle s'applique les mêmes droits, responsabilités ou restrictions et qui fait l'objet d'un enregistrement par la loi ou d'une publication.
- Unités spatiales comprenant les parcelles, ainsi que les espaces juridiques des bâtiments ou des réseaux
- Sources spatiales et représentations spatiales, c'est-à-dire les points, lignes, mais également les documents finaux comme des plans, ou tous documents associés à un relevé, tels que les listings de calculs ou de points qui sont considérés dans la norme comme des sources spatiales et font partie intégrante du système d'administration des terres.

Chacun de ces paquetages est composé des classes destinées à accueillir les différentes entités du système d'administration des terres. Ces entités seront caractérisées par des attributs définis par la norme, certains étant obligatoires, d'autres facultatifs, et encore d'autres étant associés à des valeurs prédéfinies par des listes de codes. Ci-dessous un schéma au format UML (Unified Modeling Language) représentant les 4 paquetages du modèle ainsi que les classes les composant et les liens entre les classes, avec la cardinalité de la relation :

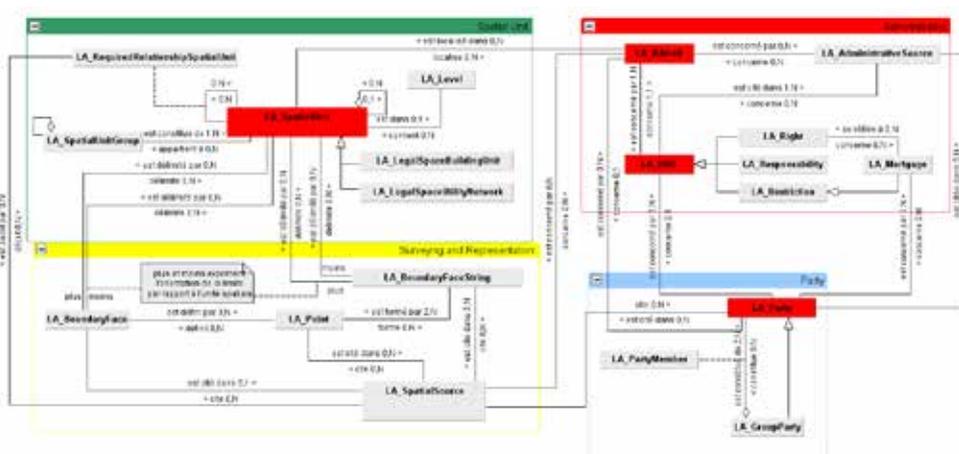


Figure 1 : Schéma UML du LADM décrit dans la norme

Les classes représentées en rouge sont les classes les plus importantes des paquetages, qui sont au cœur des relations et donc sont les premières à mettre en place dans le modèle.

La norme a également pour objectif de développer des « profils LADM » de pays, qui décrivent les procédures et caractéristiques spécifiques en matière de gestion administrative des terres du pays pour inclure ces fonctionnements et descriptions au cœur de la norme et donc permettre la communication avec d'autres pays. Un certain nombre de profils sont déjà intégrés au texte paru dans la première édition de la norme en décembre 2012.

### 3. Etat des expériences déjà réalisées

En France, les traces des travaux sur le LADM se limitent à un document confidentiel fourni au début du stage, traitant d'une méthodologie vers l'établissement d'un profil LADM de la France. Ce document n'était toutefois pas fini et il n'a pas été possible d'identifier les auteurs de ce document, malgré des recherches parmi les contacts d'acteurs du projet au sein de l'OGE et du cadastre du département de la Haute-Savoie.

Du côté de la Suisse, une initiative a été menée en 2015 au sein de l'Office Fédéral de Topographie, Swisstopo en partenariat avec une société privée pour développer un modèle LADM utilisant le langage INTERLIS, qui est un langage formel de description permettant l'échange de données et de modèles de données, utilisé au niveau fédéral pour mettre en commun les données produites dans tous les cantons de la Suisse. Ce projet avait pour but d'accélérer la mise en place du LADM, comme mentionné dans [Germann et al., 2015]. Cette étude a vu la création de données LADM au format INTERLIS pour deux cantons de la Suisse. Cependant, après prise de contact avec Swisstopo et récupération du modèle de données ainsi que des données LADM, il n'a pas été possible d'exploiter ces travaux. L'étude de [Germann et al., 2015] précise que le développement d'un profil LADM de la Suisse devrait être envisagé pour les futurs travaux, mais ce développement n'a jamais eu lieu. Il n'y a donc de profil LADM ni en France ni en Suisse.

La norme LADM a néanmoins suscité un intérêt dans plusieurs pays, avec des études ayant généralement été menées en collaboration avec des membres de l'ISO/TC 211 ayant participé à la création de la norme. Ainsi, on peut constater que l'Afrique du Sud, Chypre, la Grèce, la Pologne ont lancé des études pour le développement d'un profil LADM de leur pays. [Jenni et al., 2017] présentent également une démarche utilisant le langage INTERLIS pour l'élaboration d'un modèle LADM mis en place en Colombie, à la suite des études faites en Suisse et en Grèce. Le point négatif qui ressort majoritairement des recherches effectuées est la difficulté et le manque d'implémentation physique du LADM. L'impossibilité d'exploiter les données LADM/INTERLIS de la Suisse a cependant conduit à laisser ces pistes de côtés, et il a été décidé de créer un modèle de données sous ArcGis reprenant les principes de la norme.

### 4. Création d'un prototype LADM

La création d'un modèle LADM a été entreprise sous ArcGis pro car l'outil est très utilisé au sein de la DIT et donc les compétences sont disponibles pour mettre au point ce modèle. L'emploi de ce logiciel a de plus été privilégié pour faciliter la mise en ligne du prototype sur la plateforme ESRI (société qui développe ArcGis) du canton de Genève. La démarche retenue était de créer une base de données contenant les classes définies dans la norme LADM ainsi que leurs attributs, en se concentrant sur les classes les plus importantes pour une question de temps. Afin de tester le système et de l'améliorer, il a été décidé de rapidement choisir une zone d'étude raisonnable pour le modèle. La zone retenue concerne les communes limitrophes de Ferney-Voltaire en France et Grand-Saconnex en Suisse, avec l'aéroport de Genève à la frontière, car elle est assez riche en termes de restrictions de droit public. La question de la projection à choisir pour le projet s'est vite posée du fait de la différence des sources spatiales, il a donc été décidé de choisir la projection ETRS89 -UTM32 selon les recommandations de [Detraz, 2009].

Pour alimenter le modèle en données, le choix s'est porté sur le logiciel F.M.E. (Feature Manipulation Engine), qui est un outil d'extraction, de transformation et de chargement (ETL) de données géographiques. En effet, le logiciel est très complet et permet d'injecter directement les données provenant de différentes sources et sous différents formats dans la base de données créée, ou de modifier les données pour correspondre au format d'attribut attendu dans la base de données cible. Le modèle est alimenté de données OpenData, en France sous la forme de données cadastrales du département de l'Ain au format EDIGEO et de données au format shape provenant du géoportail de l'urbanisme, édité par l'IGN. Du côté Suisse, toutes les données proviennent du SITG (Système d'Information du Territoire Genevois), Portail géographique du canton fonctionnant sur une infrastructure ESRI. Les données proviennent de l'extracteur de données du SITG ou directement des bases de données en réseau de la DIT. En Suisse, les données sont plus ouvertes et les noms des propriétaires d'une parcelle sont en OpenData, récupérables sur des extraits du registre foncier consultables depuis le SITG, ce qui permet d'avoir un modèle bien plus riche.



# Intégration de données juridiques de copropriété et de division en volumes dans une maquette BIM avec suivi des modificatifs

PFE présenté par : **Guillaume Gibert**  
Société d'accueil : **RENFER & VENANT**  
Directeur de PFE : **Hervé CRANCE**  
Correcteur : **Jacques LEDIG**



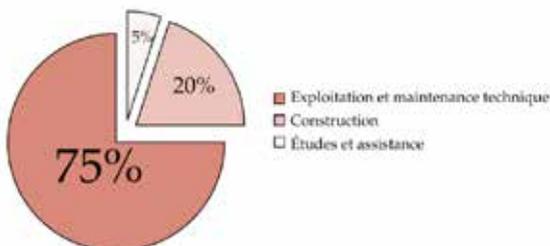
## 1. Introduction et contexte

Le Building Information Modeling (BIM) francisé en « Bâtiment et Informations Modélisés » est un outil collaboratif de conception et de gestion d'ouvrage. Son objectif principal est de créer et de travailler sur un modèle en 3D intelligent, la maquette numérique. Le BIM est en plein développement dans le monde, en particulier en France, où depuis 2014, plusieurs dispositions législatives semblent encourager son utilisation, sans toutefois l'imposer de façon systématique. La France a en effet suivi les directives du législateur Européen, en permettant aux acheteurs publics d'imposer le recours d'outils électroniques tels que le BIM.

Cependant, ce processus n'est encore utilisé que dans une minorité de chantier. En effet il reste compliqué de fédérer l'ensemble des intervenants d'un même projet, toutes les entreprises n'ayant pas encore acquis les compétences suffisantes pour s'atteler à un tel processus.

La maquette numérique est l'élément central de ce processus. Outre les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, elle se présente également comme le support d'informations de natures diverses sur le projet, qui lui sont attachées. Elle est souvent utilisée dans les phases de planification, de conception et de construction, mais son usage peut être étendu à l'ensemble de la vie du bâtiment, notamment à travers les multiples informations qu'elle présente, étant un outil très complet pour la gestion d'un ensemble immobilier.

Si le gain apporté par l'usage du BIM au coût général d'une opération pour une utilisation jusqu'à la phase de construction, peut s'élever jusqu'à 20 %, la grande partie des économies pourrait cependant être réalisée durant la phase d'exploitation de l'ensemble immobilier concerné, que l'on peut estimer de 30 à 50 ans. On voit clairement en Figure 1 que la grande majorité des coûts pour un bâtiment interviennent après la construction, au cours de son exploitation.



**Figure 1 - Répartition moyenne des coûts sur le cycle de vie d'un bâtiment tertiaire - hors foncier et frais financiers (Source : "Ouvrages publics & coût global" - MIQCP, janvier 2006)**

Tout cela est dépendant bien sûr, de la quantité d'informations ajoutées à la maquette numérique, et de leur qualité (particulièrement la mise à jour de ces dernières).

Finalement, ce sont également aux différents acteurs de la construction de se donner les capacités de s'investir dans le processus BIM. En particulier, le Géomètre Expert se présente comme un acteur important, en tant que professionnel de la mesure. On peut penser premièrement aux relevés et dessin d'un modèle « tel que construit », le géomètre étant en effet régulièrement amené à fournir une maquette à la suite de mesurage (scan ou levé conventionnel), d'un bâtiment existant. On peut également penser plus loin, avec, en plus de l'intégration de ces données géométriques, l'inclusion des données propres au métier d'Expert, à savoir les limites de propriétés, les servitudes, et les données issues de mises en copropriété et divisions en volumes ...

C'est dans cet aspect que le cabinet RENERFER & VENANT souhaite développer ses compétences de gestion de données juridiques au sein de maquettes numériques. Ce cabinet d'une vingtaine de personnes réparties sur deux sites, situés en région Parisienne, possède déjà des compétences dans le levé ainsi que dans la création de maquettes 3D sous le logiciel REVIT, en vue d'une utilisation pour un processus BIM. Cependant, le cabinet ne possède pas encore les moyens d'inclure les données nécessaires à la mise en copropriété, ni les informations en résultant (Matérialisation des lots, charges...). Il est également important pour les différents acteurs intervenant sur la maquette, de s'approprier les outils proposés et disponibles, afin de profiter pleinement des avantages offerts par ce type de processus. Une étude a déjà été réalisée sur la modélisation d'informations permettant de réaliser une division en volumes, qui sera complétée dans ce mémoire. Ce travail est mené sur le logiciel REVIT, utilisé par le cabinet RENERFER & VENANT et leader dans le domaine du BIM.

## 2. Mise en copropriété

La mise en copropriété a occupé une part importante de mon travail au cours de ce projet. Avant de se plonger dans l'intégration des informations résultantes d'une mise en copropriété (grille de charges par exemple), il est nécessaire de définir une méthode d'intégration efficace des données nécessaires aux calculs de mise en copropriété, et d'une méthode intéressante pour les réaliser.

### Intégration des données nécessaires à la mise en copropriété :

La première partie de mes recherches s'est concentrée sur les possibilités d'intégration de données permettant l'établissement d'un état descriptif de division. L'important ici est de pouvoir traiter des lots représentant les parties privatives, décomposés en surfaces pouvant être de nature et de situation différentes. C'est la modélisation de ces surfaces composant les lots privatifs qu'il est important de définir.

Plusieurs outils existent sur REVIT, et j'ai d'abord pensé à la modélisation de ces surfaces par des « volumes in situ ». Il est néanmoins quelque peu surprenant de vouloir représenter des surfaces 2D par des volumes, et c'est ce qui m'a amené à invalider ce mode de représentation. Cependant les « volumes in situ » dans REVIT, en plus de posséder un attribut de surface au sol, présentent l'avantage de pouvoir être modélisés librement par l'utilisateur, contrairement aux autres outils de dessin de surface, plus rigides.

J'ai finalement sélectionné l'outil « Pièce » pour l'intégration de ces éléments. Cette famille permet de matérialiser au sein de la maquette des surfaces. Leur dessin est, comme relevé précédemment, plus rigide que pour le « volume in situ ». En effet, dans le premier cas, l'utilisateur peut dessiner à sa guise la base de son volume, alors que pour l'outil « Pièce », la surface est créée automatiquement, entre le nu intérieur des murs et portes qui l'entourent. Cependant, les surfaces utilisées pour le calcul des charges et des tantièmes de parties communes générales ne correspondent pas toujours à cette surface. En effet, la pièce créée va compter par exemple des escaliers, et un problème se pose pour les surfaces extérieures telles que les jardins, ne possédant pas de limites matérialisées au sein de la maquette. Ces problèmes peuvent cependant être contournés à l'aide de l'outil « séparation de pièce », qui permet à l'utilisateur d'ajouter des contraintes supplémentaires à la forme créée automatiquement. Il lui est également possible, pour les surfaces extérieures, de dessiner préalablement les contours avec cet outil, et la pièce créée prendra automatiquement les formes dessinées par les contours.

Une fois les pièces placées dans le dessin, il est nécessaire d'affecter les différents attributs utiles au calcul. Premièrement, toutes les pièces dessinées possèdent déjà un nom, qui sera utilisé

pour la désignation de la surface et donc pour l'attribution de son coefficient de nature. Deux autres attributs importants sont renseignés automatiquement par REVIT, à savoir le niveau (correspondant à l'un des niveaux définis préalablement dans la maquette), et la surface. La pièce possède également une hauteur, que l'on pourra utiliser pour détecter les surfaces possédant une hauteur inférieure à 1.80 m.

Il est également possible de rajouter des attributs personnalisés à la famille de « Pièce » présente dans le dessin. J'ai donc permis à l'utilisateur de renseigner le numéro de lot auquel la pièce appartient, ainsi que son bâtiment si jamais il y en a plusieurs au sein de la copropriété. L'ensemble de ces attributs peuvent ensuite être listés et triés avec l'outil de création de nomenclature de REVIT. Cet aspect base de données se montre très intéressant, et est une plus-value par rapport au travail habituel du cabinet.

Pour terminer, d'autres informations, non spécifiques à chaque pièce mais plutôt au lot entier, sont à renseigner, à savoir, le numéro de porte et de cage d'escalier et la désignation du lot. Ces attributs sont ajoutés à tous les éléments de la famille pièce de dessin, mais l'utilisateur n'a besoin de les renseigner que pour une pièce par lot. Le choix de cette dernière se fera avec attention, car c'est l'étage de cette pièce qui servira à attribuer, pour chaque élément du lot, le coefficient d'étage lors du calcul des charges d'escalier et d'ascenseur. En effet, il se peut qu'un lot s'étende sur plusieurs étages, mais dans le cas du calcul de ces charges, on prendra en compte pour toutes les pièces du lot, le niveau de la porte d'entrée. Il est ensuite possible d'exporter ces nomenclatures des pièces, et d'utiliser les méthodes de calculs déjà mises en place au sein du cabinet (macros Excel).

Cependant, dans la mesure du possible il paraît très intéressant de trouver une méthode pour effectuer ces calculs tout en restant dans REVIT. Cela permettra également de plus facilement intégrer les informations résultantes. C'est là que l'outil de programmation intervient. En effet, un plugin développé par Autodesk, intitulé « Dynamo », permet à l'utilisateur de créer des scripts dans un environnement de programmation visuelle. Tout un ensemble de nœuds est donc disponible au sein du plugin et permet à l'utilisateur de facilement récupérer et traiter des informations attachées aux entités présentes au sein de la maquette. Cet outil est donc très intéressant, mais aucun nœud ne permet à l'utilisateur de mettre en place des méthodes de calculs adéquates pour ce que nous voulons faire. Cependant, Dynamo permet d'intégrer dans son environnement des nœuds particuliers destinés à recevoir des scripts en Python. A partir de là, j'ai donc pu me lancer dans la programmation d'un algorithme destiné à effectuer les différents calculs nécessaires lors d'une mise en copropriété.

La première partie de mon programme utilise des nœuds Dynamo afin de récupérer l'ensemble des attributs listés précédemment, et de les introduire en entrée au sein d'un script python. Ce dernier permet ensuite de regrouper et de classer ces informations par bâtiment et par lot, puis lance une première fenêtre permettant à l'utilisateur de sélectionner, pour le calcul des quotes-parts de parties communes générales, les paramètres souhaités. L'utilisateur peut donc choisir des coefficients de nature parmi ceux proposés dans la fenêtre, en rajouter de nouveaux en fonction des désignations de pièces entrées dans le programme, choisir ses coefficients de niveaux et la base du calcul.

Une deuxième fenêtre s'ouvre concernant cette fois-ci le calcul des charges (et des parties communes spéciales). L'utilisateur peut en créer autant que souhaité, les différents coefficients saisis dans la fenêtre précédente (y compris les nouveaux) sont automatiquement reportés pour chaque charge, restant bien sûr, modifiables. L'utilisateur peut ensuite, à l'aide d'une liste déroulante, sélectionner les lots (automatiquement détectés dans la maquette), qu'il souhaite intégrer à sa charge. Un compteur de lot associé à la liste lui permet de contrôler, pendant la saisie, le nombre de lots sélectionnés.

Une fois les deux fenêtres entièrement renseignées, le calcul s'effectue, l'utilisateur sélectionne un répertoire où enregistrer les fichiers résultat, et ces derniers sont finalement générés. On obtient donc un fichier texte comportant le résumé des différents lots et de leur composition, ainsi que leurs tantièmes de parties communes générales, et deux tableaux Excel, l'un contenant les tantièmes de parties communes générales, et l'autre le résumé des tantièmes de charges pour chaque lot. Ces exports sont calqués sur ceux obtenus par les macros Excel déjà utilisées par le cabinet.

Une dimension importante de ce programme est le contrôle apporté par celui-ci. En effet, avant de lancer le calcul, ce dernier va vérifier si, au sein de la maquette, toutes les informations ont bien été remplies. Les attributs de chaque pièce sont donc contrôlés et pendant le calcul, il est vérifié qu'à chacune d'elle est attribué un coefficient de nature. En cas de problème, le logiciel avertit l'utilisateur et lui en donne l'origine. Un message indicatif est également affiché, comme contrôle, si des lots au RDC sont sélectionnés pour un calcul de charge d'ascenseur ou d'escalier. Seuls les coefficients de nature et d'étage sont considérés dans le programme, car le cabinet n'utilise, dans la très grande majorité des cas, que ces deux derniers. La structure du programme permettrait cependant facilement d'en rajouter d'autres (ensoleillement...).

### 3. Division en Volumes

Dans le cas d'une division en volumes, le support de la maquette 3D semble bien plus adapté. Ici, c'est bien l'outil de dessin « Volume in situ » que nous allons utiliser pour modéliser les différentes parties nécessaires à l'établissement de l'état descriptif de division. Comme on l'a déjà évoqué, cet outil permet à l'utilisateur beaucoup plus de libertés dans le dessin que la commande « Pièce », et permet également de superposer des parties d'éléments différents.

Ici, outre les volumes issus de la division, il est également nécessaire de présenter les différentes servitudes au sein de la maquette. Tout cela est possible avec le même outil, en ajoutant des propriétés de transparence et d'hachurage pour bien différencier les deux types d'espaces.

Pour la suite, on utilise la même procédure que pour la copropriété, à savoir l'ajout de paramètres personnalisés à la famille existante de volume. On peut ainsi créer des attributs pouvant contenir le numéro et la fraction du volume, sa désignation, les niveaux auxquels il est présent, sa surface de base, les servitudes, ses cotes NGF inférieure et supérieure. Pour ces deux dernières ainsi que pour les niveaux, il est bien sûr possible de créer un petit script dynamo permettant de renseigner automatiquement ces valeurs.

Finalement, les nomenclatures permettent de récupérer toutes ces informations et de les exporter, pour ensuite pouvoir rédiger l'état descriptif de division. On se rapportera ici au mémoire pour plus de précisions.

### 4. Conclusion

La maquette numérique, de par la visualisation qu'elle offre et les informations qu'elle contient et qu'elle permet de gérer, est un outil très puissant, et qui, s'il est bien maîtrisé peut apporter beaucoup au Géomètre.

Premièrement, pour la copropriété, l'aspect base de données avec les nomenclatures regroupant toutes les informations nécessaires est très intéressant, notamment avec la possibilité de récupérer toutes ses informations au sein d'un environnement de programmation. On évite ainsi toutes les erreurs de saisies qui pouvaient être commises auparavant, notamment pour les surfaces des pièces, et la possibilité de récupérer automatiquement ces informations est un vrai gain de temps par rapport aux méthodes actuelles du cabinet.

Le programme de calcul automatisé présente aussi des fonctions très intéressantes, de contrôle notamment, permettant à l'utilisateur de s'assurer à chaque étape que son calcul est bien exécuté. On peut notamment citer la détection des erreurs de remplissage d'attributs (oubli de saisie d'un attribut de pièce ou information de lot manquante...), mais également la vérification d'attribution de coefficient d'étage. Le jeu d'échange entre la maquette et le programme est aussi très utile, pour la détection des niveaux de la maquette, ou l'établissement de la liste des désignations de pièces non présentes dans la base de données du programme.

La division en volumes bénéficie également des avantages liés au regroupement d'informations par les nomenclatures. La visualisation apportée par la maquette est aussi un outil très intéressant, notamment durant le processus de réflexion autour de la création des volumes. La possibilité d'automatisation de renseignement d'attributs permet en outre un gain de temps non négligeable pour l'utilisateur.

# Monitoring par photogrammétrie : surveillance automatisée

PFE présenté par : **Muhi Aldin ALRASLAN**  
Société d'accueil : **SITES SAS**  
Directeur de PFE : **M. Pierre CARREAUD**  
Correcteur : **Dr. Pierre GRUSSENMEYER**



## 1 Contexte de l'étude :

Le parc de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) comporte 52 portes d'écluses adaptées au grand gabarit, dont la moitié est âgée de plus de 50 ans, sachant que la limite de calcul donnée par les normes de référence est basée sur une durée d'utilisation maximale de 70 ans.

La CNR est donc confrontée aujourd'hui à la problématique d'atteinte de « vie mature » d'un nombre significatif de ses portes d'écluses.

En conséquence, elle souhaite se doter de systèmes de surveillance, pour ces équipements, avec comme objectif d'estimer le vieillissement des structures métalliques des portes, par le contrôle en temps réel et 24h/24h, de l'évolution de la déformation (flèche), de la tôle de bordée soumise à chargement/déchargement hydrostatique cyclique à chaque éclusé.

Dans ce contexte, la société SITES participe à la surveillance des déformations de la porte aval de l'écluse d'Avignon. Ce suivi est réalisé actuellement par une station totale robotisée qui vise une quinzaine de prisms installés sur la porte. La présence de l'eau sur la porte empêche parfois les mesures des prisms par la station totale. D'ailleurs, les stations totales robotisées sont assez onéreuses, difficile à installer pour avoir une vue globale sur l'ouvrage.



*Figure 1: porte d'écluse d'Avignon*

## 2 Objectifs de l'étude :

Le but du présent travail est de concevoir un système de surveillance photogrammétrique composé d'un ensemble de 2 à 5 caméras industrielles qui regardent la même scène, et seraient positionnées dans des boîtiers protégés par des vitres et casquettes afin d'atteindre les objectifs suivants :

- La mesure simultanée de plusieurs dizaines de points, avec des coordonnées en quasi-temps réel et à une fréquence élevée ;
- La diminution du coût ;

- Des installations moins invasives et plus aisées ;
- Diffuser les données sur internet sur la plateforme de la société (SIMON-E) qui permet de visualiser les déplacements de la structure en temps réel ;

### 3 Les choix retenus pour la réalisation du projet :

Pour réaliser l'acquisition des données photogrammétriques, on a choisi d'utiliser les moyens déjà existants dans l'entreprise. On a choisi d'utiliser des cibles réfléchissantes parce que l'utilisation de ces cibles permet de réaliser des filtres et traitements d'images robustes afin de déterminer le centre de chacune des cibles. On a réalisé nos tests avec des caméras Canon. Les caméras sont couplées à des flashes et d'un filtre afin de s'affranchir des effets changeants de la lumière extérieure. On a également réalisé des tests avec des caméras de surveillance IP équipées avec des leds infrarouge.

## 4 Tests et installation

### 4.1 Taille de cibles :

Pour détecter le centre des cibles avec haute précision, une cible doit occuper un certain nombre de pixels sur l'image. Le nombre de pixels d'une cible présente sur l'image dépend de la distance de prise de vue, de la distance focale utilisée, de l'angle d'incidence, de la taille de la cible et de la résolution du capteur. Pour choisir la taille des cibles, on a fait plusieurs tests :

#### Test n°1 pour vérifier à quel angle on peut viser la cible par le tachéomètre

Puisque on veut utiliser le tachéomètre robotisé déjà installé sur la porte d'écluse, on a essayé de trouver une solution adaptée pour notre système photogrammétrique et aussi pour le tachéomètre robotisé. Pour cela, on a mesuré par le tachéomètre des cibles réfléchissantes de différentes tailles et à différentes distances. On a trouvé que plus la taille de la cible augmente plus on peut viser la cible avec une grande incidence. Cependant, plus la distance augmente plus l'incidence possible diminue.

#### Test n°2 : pour vérifier à quel angle d'incidence on peut voir la cible sur l'image

On a utilisé pour ce test la caméra Canon Eos 500D la caméra est couplée à un flash de puissance. On a fait le même test que précédemment avec des cibles de différentes tailles et différents angles d'incidence et à différentes distances. On peut voir une cible de diamètre 10 cm sur l'image avec un angle d'incidence 70 grade.

Enfin, on a choisi d'utiliser des cibles de diamètre 5 cm, puisque on peut les voir sur l'image à une distance 20 m avec un angle d'incidence 50 grade.

#### Test n°3 d'éclairage

L'éclairage nécessaire pour bien détecter les cibles réfléchissantes dépend de la distance entre l'objectif et le flash, de la puissance de flash, du type d'éclairage (continu, pulsé), de la distance de prise de vue et des conditions atmosphériques (soleil). Plus la distance entre le centre de l'objectif et le centre du flash est grand, moins on a de retour. A partir de 40 cm, il n'y plus du tout de retour.

On a étudié la possibilité d'utiliser des caméras de surveillance IP puisque ces caméras sont beaucoup moins chères et plus faciles à installer. On a réalisé nos tests par une caméra de résolutions 4000\*3000 pixel équipée avec 6 leds infrarouge permettant d'éclairer les cibles à une distance maximum de 30 m quand le mode nuit est activé.

Pour cela, on a installé une dizaine de cibles réfléchissantes sur un mur à l'atelier, on a installé la caméra IP à une distance 8 m, on a pris plusieurs séries d'images. On obtenu des photos avec des cibles bien éclairées, on a pu détecter le centre des cibles par notre code Python avec la précision de 0.01 pixel. Cependant, quand on réalisé la même expérience à l'extérieur, le retour est beaucoup plus faible à cause de l'effet de la lumière extérieur.

## 4.2 Modélisation du centre de la cible réfléchissante

Pour pouvoir détecter le centre, il faut estimer le centre d'une ellipse. Différents algorithmes existent :

- Centroïde du niveau de gris ou moyenne pondérée (moyenne des coordonnées de chaque pixel (u.v.), pondérées par leurs niveaux de gris respectifs)
- Hough Circle Transform (Bibliothèque OpenCV) ;
- Estimateur d'ellipses duales d'Ouellet (Convergence des lignes colinéaires d'une image)

Pour nos expériences, nous avons développé en python les méthodes : barycentre, barycentre pondéré.

**Le principe du code** : on fait une fenêtre carrée autour de chaque cible et on fait la moyenne des coordonnées de chaque pixel (u.v.) présente dans cette fenêtre, pondérées par leurs niveaux de gris respectifs, on choisit la taille de fenêtre adaptée figure (2).

Pour évaluer la précision de cette méthode, on a installé une dizaine de cibles réfléchissantes sur une mur à l'atelier, on a fixé la caméra sur un trépied et on a pris plusieurs séries d'images. Un déclencheur sans fil a été utilisé pour ne surtout pas toucher à la caméra. On a trouvé qu'on a une précision de 0.01 pixel sur les X,Y, sachant que 200 pixels présents sur la cible de diamètre 5 cm dans l'image.

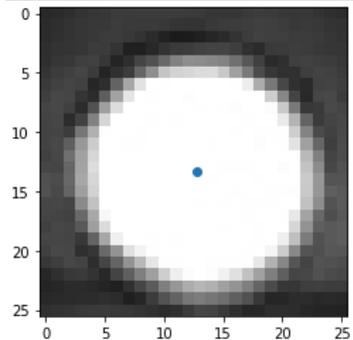


Figure 2: la fenêtre carrée autour de chaque cible

## 4.3 Caméra calibration :

Le travail de haute précision nécessite une caméra bien calibrée. La distorsion est un phénomène lié aux éléments physiques de l'appareil, qui se traduit par une déformation de la géométrie réelle des objets, pour une focale et une mise au point donnée. C'est ce que fait Photomodeler en déterminant les coefficients de distorsion, ainsi que d'autres paramètres comme la focale, la position du point principal de symétrie (PPS) et du point principal d'autocollimation (PPA).

Les caméras ont été calibrées à l'aide de Photomodeler. L'illustration de la configuration simple du champ de test est montrée sur la figure 2, où 50 cibles codées imprimées sur un mur dans l'atelier. La caméra a été installée à 8 m du mur, les images prises à partir de plusieurs positions différentes avec des images très convergentes.

Le processus de capture d'image a été effectué dans des conditions environnementales stables afin de minimiser les effets de tout changement climatique sur les performances de mesure.



Figure 2 : Les cibles codées utilisées lors de la calibration des caméras

#### 4.4 Installation des cibles sur la porte d'écluse

Comme il y a de l'eau et de la mousse sur la porte, on a fabriqué des boîtes de protection en 3D pour protéger les cibles. Ces boîtes nous permettent d'orienter la cible avec différents angles. Pour chaque cible, on a calculé l'angle horizontal, angle vertical et la distance depuis le tachéomètre, les caméras qu'on va installer sur la rive gauche, et les caméras qu'on va installer sur la rive droite. On a orienté les cibles de manière qu'elles soient mesurées par le tachéomètre et les appareils photos suivants leurs angles d'incidence maximaux respectifs.



Figure 3: les cibles installées sur la porte d'écluse d'Avignon  
(A : photo en couleur, B : photo en noire et les cibles blanches)

#### 5 Acquisitions et résultats :

Pour les premières acquisitions, on a fixé quatre caméras : deux caméras rive droite et deux caméras rive gauche. Lors du passage d'un bateau, une fois la porte fermée, on a commencé à prendre des photos synchronisées à une fréquence 30 secondes par un déclencheur à distance. (26 déclenchements au total).

Lors de traitements sous Photomodeller, on a calculé les paramètres d'orientation des caméras pour la première acquisition et puis on les a réutilisé pour les autres acquisitions. A chaque acquisition, les coordonnées XYZ des cibles sont recalées sur les coordonnées des cibles à l'état initial (début de mesures)

On note des déformations de l'ordre de 8 mm sur l'axe Y sur les cibles installées au centre de la porte.

La précision des mesure est +/-0.12 mm. Cette précision a été calculée à partir des 4 dernières acquisitions portes stabilisée. Cela signifie que le système est capable de détecter des déformations de plus de 0.3 mm.

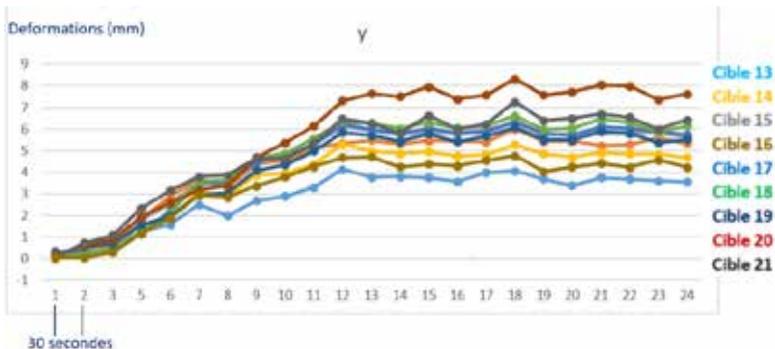
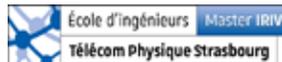


Figure (4) : Les déformations sur la porte d'écluse d'Avignon (centre de la porte)

# Mise en place d'un protocole semi-automatisé pour la cartographie des morphologies glaciaires



PFE présenté par : **Aneesha Cunthen**  
Société d'accueil : **Département de Géosciences,  
Le Mans Université**  
Directeurs de PFE : **Paul Bessin & Edouard Ravier**  
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Durant les périodes de réchauffement climatique, les calottes glaciaires perdent de la masse par une accélération de leur fonte et une production d'icebergs, qui s'accroît via l'augmentation de la vitesse d'écoulement de la glace. Des études récentes sur les modèles de vitesse des calottes glaciaires ont révélé la présence de couloirs de glace aux vitesses d'écoulement élevées. Ces couloirs, appelés *ice streams* sont aujourd'hui les principaux moteurs de la perte de masse de ces calottes et sont donc naturellement très étudiés par la communauté scientifique. Les processus contrôlant la dynamique de ces *ice streams* se déroulent sous plusieurs centaines de mètres de glace, à l'interface entre la calotte et son substrat, rendant leur observation directe impossible. De ce fait, les études réalisées sur les morphologies glaciaires formées sous d'anciens *ice streams* se sont développées car elles permettent de mieux étudier et de contraindre les processus régissant leurs dynamiques, notamment lors de périodes de changement climatique.

Malgré les récents progrès réalisés en matière de collecte de données et de logiciels d'analyse, la cartographie manuelle de ces morphologies glaciaires reste largement employée chez les géologues/géomorphologues. Aujourd'hui, la cartographie manuelle consiste à digitaliser à l'écran ces reliefs en exploitant les images satellitaires et/ou les MNT et les outils des SIG, tel que l'illumination. Cependant, cette méthode présente aussi des limites, notamment le fait qu'elle soit relativement lente et potentiellement subjective. La cartographie des morphologies glaciaires bénéficierait donc du développement de techniques semi-automatiques capables de cartographier rapidement et efficacement les morphologies présentes sur des vastes étendues anciennement recouvertes de glace.

L'objectif de ce projet de fin d'études s'intègre dans cette démarche et vise à développer un protocole semi-automatisé permettant la cartographie des morphologies formées sous la calotte glaciaire Laurentide recouvrant l'Amérique du Nord durant le Dernier Maximum Glaciaire, il y a environ 20 000 ans. Au vu des arguments compilés dans l'étude bibliographique, la méthode OBIA (*Object-Based Image Analysis*) ou GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*) a été favorisée. Elle consiste à segmenter d'abord le raster puis de classifier ces segments selon une approche supervisée, non-supervisée ou avec la logique floue. La cartographie produite permettra d'alimenter le second objectif de ce PFE, qui est d'analyser l'organisation spatiale (i.e. l'alignement préférentiel, la distribution, etc.) et les paramètres morphométriques (i.e. pente, courbure, relief, allongement, etc.) des morphologies glaciaires afin de retracer la dynamique passée des *ice streams*.

Nous avons recensé 10 études déjà réalisées sur les morphologies glaciaires et qui adoptent la méthode OBIA. Parmi les algorithmes de segmentation utilisés pour détecter les morphologies glaciaires, les algorithmes tels que Otsu (Lewington et al., 2019), *Multi-Resolution Segmentation* (Saha et al., 2011 ; Eisank et al., 2014), *Multithreshold segmentation* (Middleton et al., 2020) et *Mean Shift* (Robb et al., 2015) sont retrouvés. Ces segments sont ensuite classifiés, en se basant sur les caractéristiques extraites, grâce à des algorithmes de clustering ("regroupement") hiérarchique (Robb et al., 2015 ; Yu et al., 2015). Récemment, (Middleton et al. 2020) ont réalisé une classification supervisée en utilisant la régression logistique.

## 2. Les morphologies sous-glaciaires : marqueurs paléo-glaciologiques

Les "morphologies sous-glaciaires" désignent de manière générale l'éventail des différentes formes de reliefs, longitudinales et transversales, produites à la base des glaciers par l'écoulement de la glace. Dans ce projet nous analyserons principalement cinq morphologies (cf. Figure 1) : les *drumlins*, les *Mega-Scale Glacial Lineations (MSGL)*, les *ribbed moraines*, les *hummocks* et les *eskers*.

Les *drumlins* et les *Mega-Scale Glacial Lineations (MSGL)* sont des structures morphologiques longitudinales allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres de long, disposés parallèlement à l'écoulement de la glace. Ces structures linéaires sont communément appelées linéations glaciaires et se retrouvent principalement dans les zones où la glace s'écoule rapidement (de l'ordre de plusieurs km/an). Les *ribbed moraines* sont des formes sous glaciaires se différenciant par un axe d'allongement principal transverse à la direction de l'écoulement glaciaire. La mise en place de ces structures semble indiquer des vitesses d'écoulement moins élevées. Les *hummocky terrains* sont des terrains très légèrement vallonnés constitués d'une multitude de petits reliefs pseudo circulaires convexes et concaves isolés ou faiblement connectés appelés *hummocks*. Un *esker* est une construction sédimentaire d'origine alluviale composé de gravier et de sable qui s'est formée durant le retrait glaciaire à la suite du dépôt de sédiments charriés par de l'eau de fonte circulant dans des tunnels de glace à la base des calottes.

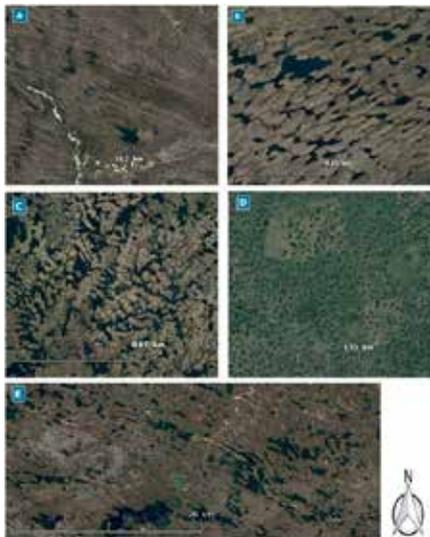


Figure 1 : Quelques morphologies glaciaires issues des images Landsat (© Google Earth) formées sous l'ancienne calottes glaciaire Laurentide (A : MSGL à côté de Dubawni Lake, B : Drumlins à côté de la Baie d'Hudson, C : Ribbed moraines près de Snowbird.

## 3. Développement de la méthodologie sur eCognition

### 3.1 La zone d'étude

Bien que la calotte Laurentide recouvrant une partie de l'Amérique du nord ait disparu, les morphologies glaciaires issues des *ice streams* peuvent toujours être observées. Plusieurs études ont été réalisées sur cette calotte, dont Margold et al. (2015) qui recensent certains *ice streams* qui font l'objet de notre étude, tels que Haldene ice streams, Dubawnt Lake et ceux situés dans la province d'Alberta. Nous disposons de modèles numériques de terrain (MNT) raster pour chacune de ces zones, issus de la base de données MNS Arctique (ArcticDEM en anglais) et d'autres MNT générés à partir de données LiDAR, mis à disposition par le Service Géologique d'Alberta au Canada.

### 3.2 Les *land surface parameters*

De nombreux dérivés peuvent être produits à partir du MNT, tels que la pente, la courbure, la rugosité, la texture, la convexité, entre autres. Ces dérivés, appelés *Land Surface Parameters (LSP)* dans la littérature anglophone, sont des mesures quantitatives qui permettent de décrire la surface terrestre. Ils sont essentiels à l'identification des morphologies que ce soit pour la cartographie manuelle ou automatique. Il en résulte un raster de valeurs de cellules à la même résolution que le MNT d'origine. Pour notre étude, nous avons choisi de générer le relief résiduel avec différentes fenêtres, la pente et la courbure générale sur le logiciel SAGA GIS qui est en accès-libre.

### 3.3 La carte de référence

Nous disposons d'une cartographie de référence (cf. Figure 2), réalisée directement sur le MNT des *ice streams* situés à Dubawnt Lake. Cette cartographie a été digitalisée en utilisant le MNT raster, l'ombrage, la pente et la courbure. Une zone de confiance a été identifiée, qui représente la zone où toutes les morphologies ont été détectées et cartographiées plus aisément. Nous allons utiliser cette zone, délimitée en bleue sur la figure 2, pour calculer les matrices de confusion. Un total de 725 *drumlins*, 62 *eskers*, 1076 *hummocks*, 45 *MSSL*, et 1150 *ribbed moraines* ont été cartographiés dans cette zone de confiance.

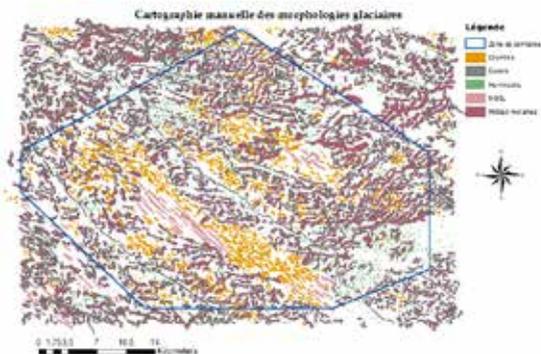


Figure 2 : La cartographie manuelle utilisée comme donnée de référence.

### 3.4 La segmentation

Nous avons réalisé deux segmentations pour répondre à deux types de problématiques. La première segmentation consiste à obtenir les différentes morphologies en se focalisant aux morphologies rasant le sol. La seconde segmentation est une amélioration de la première et prend en considération la superposition des morphologies, telle que les drumlins sur les moraines. Cette situation est récurrente aux endroits où il y a un changement dans la vitesse des *ice streams*. Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme *Threshold Segmentation* d'eCognition. Cet algorithme permet de segmenter ou même de classifier les pixels en se basant sur un seuil.

Pour la première segmentation nous avons utilisé le relief résiduel créé avec les fenêtres 3x3 et 29x29, ainsi que la pente et la rugosité. Les morphologies ont été très bien segmentées (pas de sous-segmentation ou sur-segmentation) comme l'illustre les captures d'écran de la figure 3.

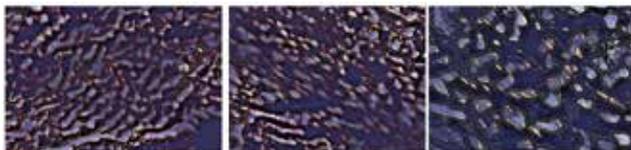


Figure 3 : La segmentation des *ribbed moraines*, *drumlins* et les *drumlins* superposés avec le *Multi-Threshold segmentation* sur eCognition.

Afin de détecter les drumlins superposés, eCognition propose de travailler à différents niveaux. Ainsi, en assignant la première segmentation au premier niveau et en générant la deuxième segmentation au second niveau, le logiciel se base sur la première segmentation pour générer les autres segments. De plus, nous avons aussi utilisé le relief résiduel avec les fenêtres 3x3 et 6x6 pour les morphologies en hauteur. Finalement, les drumlins superposés sont filtrés en fonction de leur forme.

### 3.5 La classification

Plusieurs classifications ont été testées afin de déterminer le meilleur algorithme. eCognition propose deux techniques principales de classification : la classification supervisée et la classification par la logique floue. Nous avons testé trois algorithmes pour la classification supervisée, à savoir le plus proche voisin (PPV), *Mean Shift* (MS) et *Random Forest* (RF). Il est nécessaire de choisir des échantillons d'apprentissage, ainsi que des caractéristiques qui pourraient différencier les

morphologies. La classification par logique floue s'appuie sur la définition des classes en termes de fonction d'appartenance.

### 3.6 Évaluation des méthodes de classification

Bien que l'objectif de base est de créer une cartographie avec les cinq morphologies, nous avons dû réaliser plusieurs classifications :

- Trois classes : linéations, Moraines & eskers et Hummocks ;
- Quatre classes : linéations, Moraines, eskers et Hummocks ;
- Quatre classes : Drumlins, MSGL, Moraines & eskers et Hummocks ;
- Cinq classes : Drumlins, MSGL, Moraines, eskers et Hummocks ;
- Cinq classes avec les drumlins superposés.

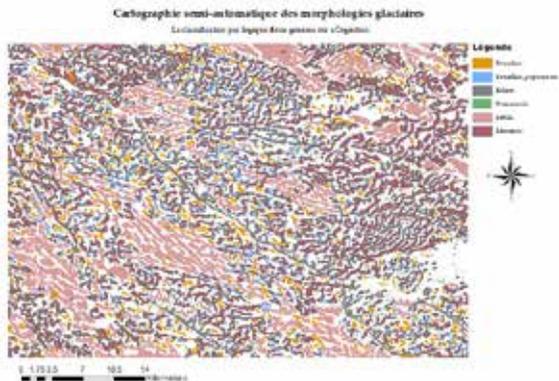


Figure 4 : La cartographie semi-automatique des morphologies glaciaires réalisée avec la classification par logique floue (exactitude de 64,3%).

Nous observons un meilleur résultat avec la classification des 3 morphologies avec une exactitude de 72,6% avec l'algorithme RF, 71,0% avec SVM et 70,0% avec PPV. Nous obtenons 62,9% pour les 5 morphologies avec SVM et 60% avec RF et PPV. La classification par logique floue a produit une meilleure exactitude pour la cartographie des 5 morphologies, soit 68,6%, et une exactitude de 64,3% pour la cartographie des 5 morphologies avec les drumlins superposés (c.f Figure 4).

## 4. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis d'automatiser la cartographie des morphologies glaciaires à partir d'un MNT. La même méthodologie pourrait être appliquée à un MNS (modèle numérique de surface) mais des étapes préliminaires devront être introduites pour traiter le MNT. Par exemple, un filtre passe bande sera utile pour éliminer les objets impertinents à l'étude, tels que les bâtiments, les arbres, etc. Notre méthode propose notamment la bonne segmentation de nos morphologies, étape qui est primordiale à la classification pour l'OBIA. Nous avons aussi testé plusieurs algorithmes et nous avons obtenu une exactitude qui peut être améliorée par d'autres tests que nous comptons réaliser. Bien que le logiciel eCognition de Trimble est coûteux, il est très utile pour l'OBIA et propose plusieurs avantages. Nous pensons tester les mêmes algorithmes avec la boîte à outils Orfeo Toolbox afin de proposer une solution en accès-libre.

## 5. Bibliographie

- Eisank, C., Smith, M. et Hillier, J. (2014). Assessment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models. *Geomorphology*.
- Lewington, E., Livingstone, S., Sole, A., Clark, C. et Ng, F. (2019). An automated method for mapping geomorphological expressions of former subglacial meltwater pathways (hummock corridors) from high resolution digital elevation data. *Geomorphology*, 339:70–86.
- Margold, M., Stokes, C. R. et Clark, C. D. (2015). Ice streams in the Laurentide ice sheet: Identification, characteristics and comparison to modern ice sheets. *Earth- Science Reviews*, 143:117–146.
- Middleton, M., Nevalainen, P., Hyvonen, E., Heikkonen, J. et Sutinen, R. (2020). Pattern recognition of LiDAR data and sediment anisotropy advocate a polygenetic subglacial mass-flow origin for the Kemijarvi hummocky moraine field in northern Finland. *Geomorphology*.
- Robb, C., Willis, I., Arnold, N. et Gudmundsson, S. (2015). A semi-automated method for mapping glacial geomorphology tested at Breiðamerkurjökull, Iceland. *Remote Sensing of Environment*, 163:80–90.
- Saha, K., Wells, N. A. et Munro-Stasiuk, M. (2011). An object-oriented approach to automated landform mapping: A case study of drumlins. *Computer and Geosciences*, 37(9):1324–1336.
- Yu, P., Eyles, N. et Sookhan, S. (2015). Automated drumlin shape and volume estimation using high resolution LiDAR imagery (Curvature Based Relief Separation): A test from the Wadena Drumlin Field, Minnesota. *Geomorphology*, 246:589–601.

# Développement d'une méthodologie de calibration fine de la camera panoramique utilisée en mobile mapping et valorisation de la donnée photogrammétrique acquise

PFE présenté par : **Geoffrey Piranda**  
Société d'accueil : **GEOFIT**  
Directeur de PFE : **Nicolas END**  
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**



## 1. Introduction

### Contexte

Depuis près d'une décennie, la cartographie dynamique représente une des activités principales de la société GEOFIT. En constant développement, ce processus d'acquisition rend possible la collecte d'un grand volume de données sur des linéaires considérables. GEOFIT l'emploie notamment dans le cadre de l'élaboration de Plans de Corps de Rues Simplifiés (PCRS), mais aussi pour d'autres projets, comme l'inspection de chaussées ou encore le contrôle de voies ferroviaires.

Alors que le temps d'acquisition d'une grande quantité de données est court, la chaîne de traitement et la production des livrables est chronophage. L'association des clichés capturés par la caméra avec le nuage de points LiDAR permet d'optimiser la phase de numérisation et de dessin. Le contrôle visuel est facilité et la détection des éléments qui doivent figurer sur le plan est simplifiée. Le chevauchement correct des photographies sur le nuage de points rend également possible la colorisation de ce dernier. De plus, les images et le nuage de points sont parfois exigés par le client pour la conception, par exemple, de maquettes numériques.



Figure 1 : Système StreetMapper IV monté sur véhicule

### Objectifs

L'objectif principal de ce Projet de Fin d'Études est donc d'améliorer la calibration de la caméra omnidirectionnelle afin de réduire au maximum les décalages constatés lors de la superposition des photographies sur le nuage de points. Minimiser les écarts implique plus particulièrement une meilleure estimation des paramètres externes de la caméra. Ces paramètres rendent compte de la position et de l'orientation des photographies acquises par rapport au système de positionnement. La caméra n'a pas fait l'objet de calibration précise post-fabrication alors que la calibration des scanners laser est maîtrisée et pratiquée régulièrement par GEOFIT.

La valorisation de la donnée photogrammétrique constitue également un objectif de ce projet. Le but est d'étudier différentes possibilités de valorisation afin de tirer d'avantage profit des images. La recherche d'applications faisant directement appel aux images constitue un axe de recherche intéressant en vue de l'amélioration des traitements actuels mais aussi pour le développement de nouveaux livrables.

## Moyens matériels

GEOFIT possède deux systèmes de cartographie mobile développés par 3D LaserMapping. Il s'agit du StreetMapper 360 et de leur dernier modèle, le StreetMapper IV.

Ces deux systèmes sont dotés de la caméra omnidirectionnelle Ladybug 5 développée par FLIR Systems. Il s'agit d'une caméra polydioptrique composée de six objectifs agencés de façon à ce que cinq d'entre eux forment un pentagone sur l'axe horizontal alors que le sixième est au zénith et orienté en direction du ciel. Actuellement, une application développée en interne utilise la caméra frontale n°1 pour réaliser la superposition des images. L'assemblage des images individuelles de chaque objectif permet de générer une image panoramique à 360°.



Figure 2 : Caméra omnidirectionnelle Ladybug5

## 2. Fusion des données

Le LiDAR et la caméra sont deux capteurs aux technologies très différentes qui fournissent des informations complémentaires sur l'environnement traversé. La séquence d'images obtenues grâce à la caméra apporte des renseignements sur l'apparence, la texture et la couleur. Le LiDAR quant à lui fournit un nuage de points qui permet de déterminer la position 3D des objets. Cependant, on constate parfois des décalages lors de la superposition des images sur le nuage de points. Plusieurs hypothèses peuvent alors expliquer ce phénomène :

Les paramètres de la calibration réalisée en usine ont pu évoluer au fil du temps, nécessitant un nouvel étalonnage post-fabrication. Bien qu'installée dans un boîtier robuste, les vibrations de la caméra dues aux imperfections de la route peuvent également en être la cause. De plus, la caméra a été démontée et remontée, et la détermination des paramètres externes a pu être réalisée de façon peu précise, ce qui peut aussi avoir un effet négatif. Cette dernière explication semble être, à ce jour, la plus plausible.

La superposition des images avec le nuage de points est possible via le module TerraPhoto de TerraSolid disponible sur Microstation et précède la procédure de calibration. Il est nécessaire de disposer des éléments suivants :

- Le fichier de calibration de la caméra
- La trajectoire de la caméra
- Les images horodatées et les fichiers de synchronisation
- Le nuage de points

On retrouve dans le fichier de calibration l'ensemble des données relatives à la caméra utilisée (image individuelle ou image panoramique) dont les paramètres externes utiles à l'orientation des images. Les données d'origine permettent de constater la présence de décalages entre l'image et le nuage de points. Elles seront affinées lors de la calibration. Le géo-référencement des images est réalisé en liant les fichiers de synchronisation des images qui associent à chaque image un temps GPS avec la trajectoire. L'information temporelle permet ainsi de déterminer la position de chaque image sur le roulage effectué. Le nuage de points brut peut être affiché selon la réflectance afin de faciliter la perception des différents éléments ou selon les différentes classes.

## 3. Calibration avec le module TerraPhoto

### Choix du site de calibration

Le choix du site où doit être réalisée la calibration est particulièrement important. On doit pouvoir identifier un grand nombre d'éléments caractéristiques facilement repérables sur les images tant sur le plan horizontal que vertical. On privilégiera alors une zone urbaine avec de grands bâtiments. Il est préférable de choisir un site dégagé, avec une faible circulation routière et la présence limitée de véhicules en stationnement pour éviter les obstacles. Les conditions météorologiques sont également un facteur à prendre en compte et un ciel dégagé avec une bonne luminosité présentent les meilleures garanties. A noter qu'une simple goutte d'eau sur l'un des objectifs de la caméra peut partiellement l'obstruer et masquer par la suite une partie des images capturées.

## Procédure de calibration

Les caméras frontales n°1 et panoramiques des deux systèmes d'acquisition dont dispose GEOFIT ont ainsi été calibrées au moyen de TerraPhoto. Le processus de calibration revient à estimer plus finement les paramètres externes, à savoir les 3 angles d'Euler, le bras de levier n'étant pas pris en compte dans le calcul itératif.

La première étape consiste à réaliser une orientation grossière de la caméra afin d'obtenir visuellement une superposition correcte de l'image sur le nuage de points. Cette méthode permet, d'après la documentation du logiciel, d'atteindre une précision d'environ 0,1 degré sur les valeurs des angles.

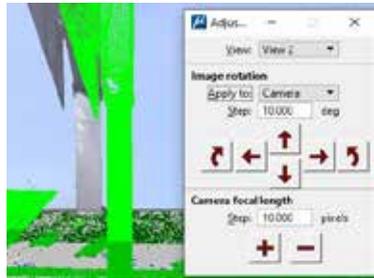


Figure 3 : Orientation grossière des images



Figure 4 : Saisie des "tie points" sur une image panoramique

La seconde étape consiste à saisir des points homologues au nuage de points et aux photographies appelés "tie points". Ces points permettent d'imposer des contraintes pour le calcul des angles d'Euler. D'abord sélectionnés sur des éléments caractéristiques du nuage de points, les points homologues doivent ensuite être placés manuellement sur les images (panoramiques ou individuelles).

La bonne répartition des "tie points" sur l'ensemble de l'image est primordiale pour une calibration efficace. Les points placés à proximité des bords de l'image fournissent un bon contrôle et il est déconseillé de les concentrer au centre de l'image. A noter que lorsque l'on s'éloigne du centre d'une image panoramique, il est plus difficile de placer les "tie points" précisément. Ces points sont cependant essentiels car ils permettent d'imposer une contrainte plus importante à la transformation. La calibration sera efficace uniquement si un nombre suffisant de "tie points" est saisi.

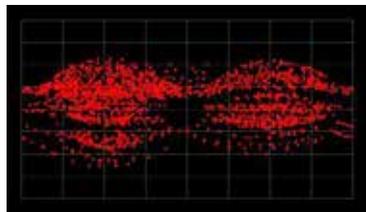


Figure 5 : Répartition des "tie points" sur une image panoramique « type »

L'estimation des paramètres est un procédé itératif. Pour chaque pixel sélectionné correspondant à un point du nuage, l'erreur de reprojection est précisée. C'est pourquoi il est nécessaire de positionner un grand nombre de "tie points" sur un maximum d'images afin d'anticiper la suppression des points dont la précision n'est pas assez fiable. TerraPhoto génère ainsi un rapport comprenant les nouvelles valeurs des paramètres et de nouveaux écarts. L'écart-type de la transformation est également fourni à chaque rapport en centimètre. Après quelques itérations suivies de l'élimination des points présentant les écarts les plus importants, les valeurs ont tendance à converger et le positionnement des images ne peut plus être amélioré. On peut alors appliquer directement les nouveaux paramètres au fichier de calibration .cal sélectionné et constater l'effet sur la superposition des images (panoramiques ou individuelles) sur le nuage de points.

La calibration peut facilement être contrôlée en chargeant le fichier de calibration avec un autre projet. Si la superposition des images avec le nuage de points est satisfaisante, les paramètres déterminés précédemment sont corrects.

## Analyse des résultats

Les résultats des 3 calibrations déjà réalisées montrent des variations significatives des paramètres. Le tableau ci-dessous compare les paramètres avant (en rouge) et post calibration (en bleu).

Caméra	Cap (°)	Δ Cap (°)	Roulis (°)	Δ Roulis (°)	Tangage (°)	Δ Tangage (°)
Panorama SM IV	-1.3541	0.3074	-0.2414	0.3856	-0.8510	0.019
Panorama SM IV	-1.6615		0.1442		-0.3320	
Caméra n°1 SM IV	356.9070	0.2332	-0.7814	0.7011	-2.1163	0.4575
Caméra n°1 SM IV	357.1402		-0.0803		-2.5738	
Caméra n°1 SM 360	37.07830	0.0239	-1.38260	0.4426	-1.24560	0.1544
Caméra n°1 SM 360	37.0544		-0.8994		-1.4395	

Figure 6 : Tableau comparatif des paramètres avant / post calibration

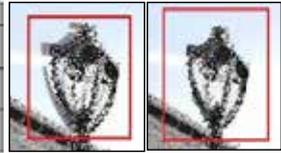


Figure 7 : Comparaison de la superposition des données avant / post calibration (caméra n°1 SM IV)

## 5. Valorisation de la donnée photogrammétrique

La cartographie mobile a la particularité d'acquérir de la donnée photogrammétrique sur des linéaires considérables. Ces images offrent de nombreuses possibilités dans une optique d'amélioration des traitements actuels (colorisation du nuage de points, base de données pour de la reconnaissance automatique d'objets) ou pour la création de nouveaux livrables (visite virtuelle panoramique, vidéo à 360°).

### Colorisation du nuage de points

Le chevauchement correct des photographies sur le nuage de points obtenu suite à la calibration rend à présent possible la colorisation de ce dernier. Celle-ci ne peut pas être réalisée si des décalages subsistent car la donnée colorimétrique serait mal appliquée et on constaterait encore une fois un décalage.

### Création d'une visite virtuelle panoramique

Les visites virtuelles panoramiques permettent de mettre en valeur des biens ou de promouvoir des lieux en proposant de les visiter virtuellement, à distance. On pourrait alors facilement imaginer mettre à profit les images panoramiques issues de l'acquisition MMS pour mettre en valeur un centre-ville historique, une rue commerçante ou encore faire la promotion d'une commune à travers une visite virtuelle diffusée sur son site internet. La plateforme en ligne Klapyt m'a permis de réaliser une visite virtuelle du centre-ville de la commune de Saint-Mars-la-Réorthe. Il est ainsi possible de découvrir le centre de cette commune et d'obtenir des informations pratiques sur les horaires d'ouverture des commerces ou encore des renseignements sur l'histoire de son église.

### Création d'une vidéo à 360°

Particulièrement efficace pour la promotion d'un lieu ou pour la présentation d'un site inaccessible au public, la vidéo à 360° prend la forme d'une visite guidée. Accessible depuis de très nombreux supports, on pourrait ainsi imaginer proposer la vidéo au client en plus du plan topographique et des images. Ce type de livrable peut s'avérer également être utile pour les activités de gestion (voirie, réseaux, mobilier urbain, ...). A partir des images panoramiques issues de l'acquisition MMS, une vidéo à 360° du passage du Gois, route submersible reliant Noirmoutier au continent a pu être montée.

## 4. Conclusion et perspectives

L'amélioration de la fusion des données photogrammétriques et lasergrammétriques est essentielle pour faciliter la phase de numérisation et de contrôle. Ce projet a permis de mettre en œuvre une méthode efficace de calibration de la caméra omnidirectionnelle utilisée en mobile mapping. Les paramètres de la caméra ont été affinés et la superposition des images sur le nuage de points optimisée. D'autres solutions sont encore à l'étude afin de pouvoir comparer ces résultats.

La donnée photogrammétrique offre des possibilités aussi nombreuses que variées que ce projet a pu mettre en lumière. Les recherches en cours devraient permettre de dégager d'autres pistes de valorisation.

# Détermination conjointe des inondations et du type d'eau au moyen de l'imagerie multi-spectrale



*PFE présenté par :* **Sabrina Amzil**  
*Société d'accueil :* *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales*  
*Directeurs de PFE :* *Frédéric Frappart et Fabien Blarel*  
*Correctrice :* *Tania Landes*  
*Encadrants :* *Frédéric Frappart et Fabien Blarel*

---

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans de nombreuses régions du monde, les régimes saisonniers de précipitations deviennent plus irréguliers, ce qui a de fortes répercussions sur l'agriculture et la sécurité alimentaire, ainsi que sur les moyens de subsistance de millions de personnes. L'eau, trop rare, entraîne des situations de pénurie, de désertification, d'exode de populations mais quand elle est trop abondante, elle cause des inondations catastrophiques difficiles à gérer. De plus, l'aménagement du territoire a un impact sur la qualité de l'eau soumise de plus en plus aux déséquilibres des écosystèmes aquatiques liés aux pollutions d'origine humaine. En effet, un grand nombre de problèmes de santé est directement lié à l'eau douce. Les vecteurs de maladies tels que le paludisme sont en fonction des habitats des moustiques, qui, à leur tour, sont directement liés à l'extension et à la nature des eaux.

L'Amazonie, en Amérique du Sud, où les eaux de surface occupent de vastes superficies, fait partie des régions qui fait face à ces problématiques. Les eaux amazoniennes se caractérisent non seulement par leurs grandes étendues mais également par la diversité des couleurs de ses fleuves et affluents (Figure 1).

Les enjeux que présentent la variabilité et le changement climatique aujourd'hui poussent tous les pays à intensifier leurs efforts sur des actions climatiques qui préservent l'environnement et assurent un avenir plus prospère pour les futures générations. Les organisations mondiales mettent l'accent sur la nécessité d'améliorer la surveillance et la prévision hydrologique pour qu'elles servent de fondement à des politiques efficaces de gestion de l'eau et à des services d'alerte précoce en cas d'inondations ou de sécheresses.



Figure 1 : Zone de mélange d'eaux (Amazonie)  
Source : Landsat / Copernicus, 2020 Google Earth

L'objectif de ce projet de fin d'études est d'estimer conjointement l'extension des inondations et les types d'eaux (eaux claires, laiteuses, noires, ...) par analyse de séries temporelles d'images multi-spectrales acquises par les capteurs MODIS Aqua et Terra. Ces deux approches sont toujours découplées et les produits obtenus sont rarement disponibles simultanément et sur la même zone en dépit de la complémentarité de ces deux informations pour des enjeux sanitaires. La détection des eaux de surface à moyenne et haute résolution peut se réaliser par imagerie optique ou SAR mais seule la première fournit des informations sur la qualité des eaux. Pour cette raison, notre projet traitera des données acquises par imagerie multi-spectrale.

## 2. Étude bibliographique

L'imagerie multi-spectrale est couramment utilisée pour la détection des inondations par des méthodes basées sur le seuillage d'indices spectraux ou au moyen d'approches de classification.

Les méthodes basées sur l'application de seuils pour la détection des surfaces d'eau sont développées de façon différente :

- La première technique consiste à définir un seuil sur une seule bande spectrale.
- La deuxième technique, la plus répandue, utilise des indices spectraux correspondant à un rapport entre plusieurs bandes (NDVI, NDWI, EWI, SWI, AWEI, ...). En général, ces indices sont plus ou moins adaptés à la détection de l'eau selon les caractéristiques propres à chaque terrain d'étude.
- La troisième technique consiste à combiner des indices après avoir appliqué des seuils pour distinguer les pixels qui réfléchissent le rayonnement électromagnétique, et ceux qui ne la réfléchissent pas.

Les méthodes de classification identifient les classes auxquelles appartiennent des objets à partir de caractéristiques descriptives. On distingue deux principaux types de classification : supervisée (méthode des k plus proches voisins, arbres de décision, réseaux de neurones, machines à support de vecteurs ou SVM) et non supervisée (méthode des k-means, classification hiérarchique, ...).

Néanmoins lors de la détection des inondations, l'imagerie multi-spectrale doit faire face aux problèmes liés aux capteurs : couverture nuageuse, végétation, angles d'élévation du soleil, etc. La détection de l'eau est souvent limitée à des conditions claires, ce qui réduit le nombre d'images exploitables.

Cette étude traite également la problématique de l'évaluation de la qualité d'eau. Pendant des années, les recherches en sédimentologie et hydrologie reposaient uniquement sur l'analyse de données in situ collectées grâce aux campagnes d'échantillonnage. Même si ces mesures sont précises pour un point dans le temps et dans l'espace, elles ne donnent pas la vision spatiale ou temporelle de la qualité d'eau nécessaire pour une évaluation ou une gestion précise des masses d'eau.

Les données spatiales représentent un moyen très efficace et complémentaire aux données in situ pour le suivi du contrôle hydrologique et biogéochimique de l'érosion et des transferts de matières. Les techniques de la télédétection optique ont largement été exploitées pour montrer la corrélation entre la réflectance et les concentrations des paramètres qualitatifs des masses d'eau notamment les sédiments en suspension, la matière organique dissoute colorée (MOD), la chlorophylle et les polluants. En effet, la réflectance dans le PIF et dans le visible est très affectée par le type d'eau. Dans le bassin amazonien, l'eau est généralement classée en fonction de l'état nutritionnel des plaines d'inondation en eaux blanches, noires et claires.

## 2. Travaux antérieurs

Dans la continuité des projets menés par les équipes des laboratoires LEGOS et ESPACE-DEV, le projet de fin d'études a été proposé dans le cadre d'un projet CNES TOSCA du service d'observation CTOH sur la détermination des inondations par télédétection multi-satellitaire. Deux méthodes de détection d'inondations ont déjà été implémentées. Une de ces méthodes a été développée pendant la thèse d'Alexandre Wiefels<sup>1</sup> soutenue en 2016 et intitulée "Étude des relations entre la luminosité de l'eau et le paludisme dans l'État d'Amazonas en Amazonie brésilienne". Cette thèse avait comme objectif d'évaluer les corrélations entre la dynamique saisonnière de la luminosité des eaux et l'incidence parasitaire du paludisme sur différentes zones de l'État d'Amazonas afin de comprendre l'influence de la couleur des eaux sur la présence du moustique vecteur et donc la transmission du paludisme. Parmi les travaux effectués, Wiefels (2016) a développé une méthode pour suivre les variations de la couleur de l'eau au pas de temps mensuel sur une période de 11 ans dans l'État d'Amazonas à partir d'un indice original de luminosité de l'eau.

Afin de suivre les étendues d'eau chaque mois, un processus de classification du masque eau/non eau a été développé d'après l'équation suivante :

$$\text{Eau} = (\text{SWIb} \times \text{NDVI} > -0.556 \text{ OR } \text{AWEI} > -0.04) \text{ AND } \text{AWEI} > -0.4$$

Avec NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), indice de végétation. AWEI (Automated Water Extraction Index) est utilisé pour déterminer automatiquement les surfaces inondées. SWIb est une modification importante de l'indice SWI (Superfine Water Index) qui est utilisé pour classer les eaux de tout le globe terrestre à partir d'images MODIS. Ces indices varient entre les valeurs -1 et 1.

Ce projet de fin d'études a été proposé afin de redévelopper sa méthode et proposer une troisième méthode innovante qui fournira simultanément l'extension des inondations et une information sur la couleur de l'eau.

<sup>1</sup> Wiefels, A. (2016) "Étude des relations entre la luminosité de l'eau et le paludisme dans l'État d'Amazonas en Amazonie brésilienne", *Thesis*, Université de Montpellier.

### 3. Zones d'étude et données

La zone d'étude doit prendre en compte des plaines d'inondation et des fleuves de caractéristiques différentes. Nous avons donc choisi d'étudier la zone de confluence entre le fleuve Amazone et un de ses principaux affluents, le fleuve Madeira avec les deux plaines d'inondation : Lago Canaçari et Lago Miratuba (Figure 1).

Dans cette étude, nous traitons principalement les indices spectraux de l'année 2017 et l'indice d'inondation « Sakamoto » développé par [Normandin et al. 2019]<sup>2</sup> pour la détermination des inondations. Les données de l'année 2017 comprennent 47 dates basées sur les mesures de réflectance issues du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) avec une résolution spatiale de 250 m. Le capteur MODIS fonctionne sur deux orbites journalières (satellite TERRA à 10:30 am et satellite AQUA à 1:30 pm) et propose une quarantaine de produits différents parmi lesquels les produits Q1 ne comportent que deux canaux 1 et 2. La répétitivité quotidienne de l'acquisition d'images MODIS a permis de s'affranchir de la plupart des nuages et ombres de nuages des scènes en réalisant des images composées des meilleurs pixels sur une période de 8 jours.

### 4. Travaux réalisés

- Analyse spatio-temporelle

Une analyse de sensibilité d'indices spectraux (NDVI, AWEI et SWIb) a été réalisée afin de déterminer les seuils optimaux permettant d'extraire les eaux de surface. Un seuillage a été réalisé sur chaque indice. Ensuite, ces indices ont été combinés avec les opérateurs logiques AND, OR ou les deux. Les premiers tests, réalisés sur plusieurs régions, nous ont permis d'obtenir des résultats corrects visuellement. Nous avons décidé de garder la combinaison la plus simple avec des opérateurs OR pour garder tous les pixels représentant l'eau. Ces étapes ont été appliquées sur les 47 images montrant les étendues minimales et maximales des eaux pendant l'année 2017.

La formule finale utilisée pour la détection des eaux est :

$$(-0.55 < \text{NDVI} < 0) \text{ OR } (-0.77 < \text{AWEI} < -0.49) \text{ OR } (0.05 < \text{SWIb} < 0.70)$$

- Validation des résultats

Afin de valider nos résultats sur les 47 dates, nous avons comparé nos classifications (figure 2a) ainsi que les classifications réalisées suivant la méthode de Wiefels (figure 2b) avec les indices d'inondation « Sakamoto ». Cette classification sépare les pixels en zones inondées (valeur 1), mixtes (valeur 2) et non inondées (valeur 3) (figure 2c).

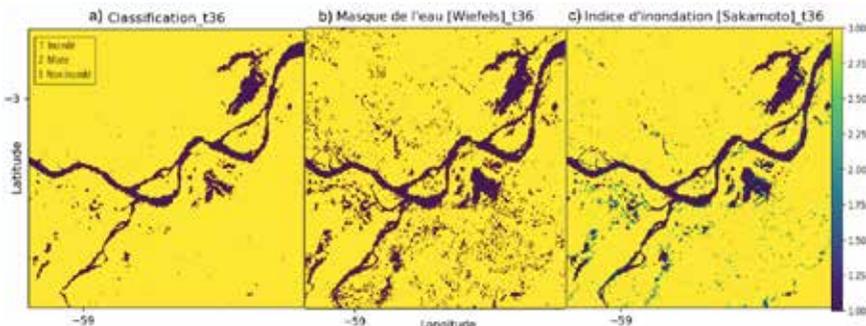


Figure 2 : Résultats des masques eau/non eau (a et b) et indice d'inondation de la date 36 à partie des données MODIS Terra

Après avoir calculé les matrices de confusion, nous obtenons une exactitude totale de 88% sur l'année 2017 comme le montre le tableau 1. L'exactitude utilisateur représente le nombre de pixels correctement identifiés pour une classe donnée sur le nombre de pixels total attribués à cette classe. Nous remarquons que les images avec de faibles précisions correspondent aux dates où la couverture nuageuse est forte.

<sup>2</sup> Normandin, C. (2019) "Apport de la télédétection spatiale à haute résolution pour l'étude des cycles des eaux de surface et des matières particulaires en suspension le long du continuum bassin versant - océan côtier", *Thesis*, Université de Bordeaux.

Notre classification avec [Sakamoto]	Classe	eau	non eau	[Wiefels, 2016] avec [Sakamoto]	Classe	eau	non eau
	Exactitude Utilisateur		0,88		0,88	Exactitude Utilisateur	0,38
	Erreur d'excédent	0,12	0,12		Erreur d'excédent	0,62	0,04
	<b>Exactitude totale</b>		<b>0,88</b>		<b>Exactitude totale</b>		<b>0,76</b>

Tableau 1 : Évaluation des résultats à l'aide des matrices de confusion

- Carte d'extension d'eau maximale

Les classifications que nous avons obtenues précédemment ont été utilisées pour produire la carte d'extension d'eau maximale en superposant toutes celles en période de crue. Ce résultat nous permettra, par la suite, d'estimer la durée et les surfaces d'inondation. La classification obtenue pour l'heure est présentée ci-joint.

Les zones en couleurs uniques représentent des régions qui ne changent pas généralement de forme avec le temps tandis que les zones avec des pixels de couleurs différentes montrent les régions où les extensions d'eau ont variées. Le bruit peut être réduit en appliquant des corrections atmosphériques ou des opérateurs morphologiques de fermeture et d'ouverture alternatives avec un élément structurant. Cette dernière solution doit être adaptée à chaque image.

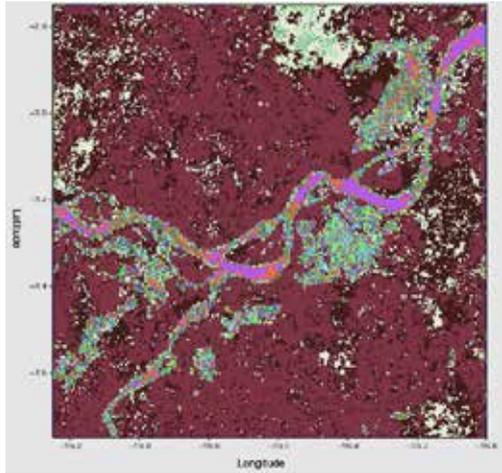


Figure 3 : Carte d'inondation en Amazonie pendant la période de crue

- Corrections atmosphériques

Le bassin amazonien est une zone compliquée à étudier à cause de la densité de la végétation et de la couverture nuageuse limitant les produits de certains capteurs. Avant de procéder à la validation de la carte ci-dessus, il est important de vérifier l'état des nuages et d'appliquer une correction en fonction de leur apparition sur les images afin d'obtenir une classification plus correcte. Il est également intéressant de tester et d'appliquer les autres corrections atmosphériques (présence d'ombre de nuages, feu, neige...) afin de sélectionner celles qui améliorent considérablement notre résultat. Par contre, les inconvénients de cette étape sont la perte d'informations et la réduction du nombre d'images d'entrée.

## 5. Conclusions et perspectives

Mon projet de fin d'études vise à développer une méthode d'estimation d'inondations au niveau du bassin amazonien où les plaines d'inondation sont particulièrement nombreuses mais peu étudiées. En plus, cette étude permettra de déterminer les types d'eau en se basant uniquement sur l'imagerie multi-spectrale. La validation de ce modèle nous permettra de mieux comprendre le bilan hydrologique et sédimentaire des zones d'inondation et fleuves amazoniens.

Les premiers résultats basés sur le seuillage des indices spectraux permettent de classer les données en deux catégories : « eau » et « non eau » mais ne distinguent pas encore les pixels mélangés et donc la fraction d'eau représentée dans chaque pixel mixte. Afin de valider les résultats donnés par MODIS, nous comparons notre carte d'inondation finale avec une classification issue des données Sentinel 1 avec une résolution spatiale de 10 m et avec une classification dans la bande L (1-2 GHz) issue du capteur Palsar-2. Le choix d'utilisation de cette bande est motivé par sa possibilité de pénétrer le couvert végétal quelle que soit sa densité. Des images de meilleure résolution spatiale devraient permettre de faire des estimations beaucoup plus détaillées et avec plus de précision. Cela nous aidera également à évaluer l'influence du type de capteurs sur les applications hydrologiques.

La validation de notre méthode et de nos cartes nous permettra par la suite de classer les eaux de surface en fonction de leurs couleurs. Ce qui nous apportera des informations sur la qualité des eaux de surfaces. Ces futurs résultats seront disponibles en mémoire. Après validation de ce modèle, notre technique pourrait être généralisée en l'adaptant à différentes grandes régions bioclimatiques.

# Analyse automatique du couvert végétal pour la gestion du risque végétation en milieu ferroviaire à partir d'imagerie aérienne

*PFE présenté par :* **Hélène Rouillon**  
*Société d'accueil :* **Altametr**  
*Directeur de PFE :* **M. Luc Perrin**  
*Correcteurs :* **M. Emmanuel Alby et Mme. Tania Landes**  
*Encadrant :* **M. Luc Perrin**

---



## 1. Contexte de l'étude

Altametr est une filiale de SNCF (Société Nationale des Chemins de fer Français) Réseau. L'entreprise collecte des données pour des fins de topographie, surveillance, inspection, etc. et réalise leur traitement pour ses clients partenaires dans un but d'optimisation de la gestion de leurs actifs.

Le suivi et la maîtrise de la végétation constituent le deuxième poste de dépenses pour SNCF Réseau, soit 120 millions d'euros chaque année. Cette tâche de gestion du « risque végétation » doit permettre de limiter le risque d'incidents (chutes d'arbres, patinage de train, incendies, etc.) liés à la présence de végétation à proximité du Réseau Ferré National (RFN). De nombreux enjeux sont liés à une gestion adéquate du couvert végétal : la sécurité, l'état des installations, l'écologie, des enjeux financiers et des enjeux sociaux et sociétaux. Pour y répondre et pour mieux connaître les risques que peut représenter la végétation, SNCF Réseau et Altametr ont mis en place plusieurs méthodes d'analyse de la végétation. Aujourd'hui, la principale méthode utilisée pour connaître le « risque végétation » aux abords des voies ferrées consiste en des tournées pédestres de reconnaissance. Elles permettent à terme de fournir et planifier un entretien le plus adapté possible à la situation et ainsi budgétiser les travaux d'entretien de la végétation.

Ces méthodes sont fiables. Toutefois, elles sont chronophages, et donc coûteuses pour SNCF Réseau. Altametr souhaite donc optimiser la reconnaissance de la végétation sur de grandes ampleurs à partir de solutions innovantes. Ce PFE a pour objectif la mise en place d'une solution permettant de connaître la position et l'étendue de la végétation en général, avec une vue aérienne, dans des orthophotographies RVB (Rouge, Vert, Bleu) et avec un intérêt plus particulier pour la végétation arborée. Elle peut en effet présenter un risque direct. Par ailleurs, notons que l'emploi d'orthophotographies géoréférencées a été choisi car ce sujet s'inscrit dans une perspective de cartographie du couvert végétal. Ainsi, le rendu visuel final envisagé est une image segmentée et classifiée, comportant des masques colorés distinguant chacune des classes identifiées dans l'image.

L'étude de l'état de l'art nous a permis de prendre connaissance des différentes approches de classification d'objets, et plus particulièrement de la végétation, dans des images aériennes RVB. Cette étude nous a amenés à choisir une approche basée sur les réseaux de neurones car elle présente les résultats les plus convaincants pour une automatisation et généralisation du processus de classification d'images.

## 2. La méthode utilisée : les réseaux de neurones

Avant les réseaux de neurones, dans le domaine du traitement d'images, les caractéristiques de celles-ci étaient extraites manuellement. Les réseaux comportent eux des couches spécifiques qui vont extraire ces caractéristiques automatiquement. Ensuite a lieu une phase de reconnaissance à partir de ces caractéristiques. Si l'utilisation des réseaux de neurones semble être en première approche très avantageuse et efficace dans le cadre de ce projet, le travail nécessaire en amont est conséquent et demande de l'expérience. Afin de mieux comprendre la partie pratique du PFE, il est important de connaître quelques éléments théoriques, synthétisés ci-dessous, relatifs aux réseaux de neurones.

Un réseau de neurones est composé de plusieurs couches, elles-mêmes constituées de plusieurs neurones. Les neurones d'une couche à l'autre sont reliés par des connexions auxquelles sont associés des poids. Ceux-ci sont les paramètres du réseau. L'entraînement du réseau va consister à ajuster ces poids pour qu'il apprenne à résoudre la problématique posée. Pour faire cet apprentissage, un grand nombre d'images préalablement annotées (considérées comme vérité terrain), vont lui être données et passées à travers chaque couche. Puis le réseau va ajuster les poids de ses connexions de façon à diminuer l'erreur entre la vérité terrain et la prédiction. Une fois l'entraînement terminé, le réseau sera capable de faire des prédictions pour les nouvelles images qui lui seront présentées.

Différents types de réseaux de neurones existent. Certains permettent de faire de la classification d'image, d'autres de la détection d'objets ou encore de la segmentation sémantique. Ces différentes notions sont illustrées en Figure 1. Dans notre cas nous souhaitons indiquer à quel endroit se trouve la classe dans l'image, et quelle étendue elle occupe, de façon à avoir une représentation du couvert végétal. Cela revient à faire (dans le cadre des réseaux de neurones) de la segmentation sémantique, c'est-à-dire à attribuer une classe à chaque pixel. Chaque classe correspondant à une couleur, en sortie l'image obtenue comporte des « masques colorés » associés aux différentes classes. J'ai choisi d'utiliser un réseau SegNet. Cette architecture possède l'avantage d'avoir un bon équilibre entre exactitude et temps de calcul.

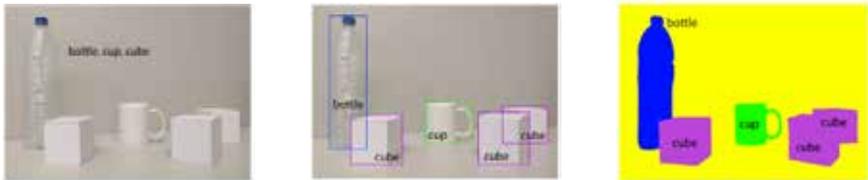


Figure 1 : De gauche à droite : classification, détection, segmentation sémantique [Garcia-Garcia, Orts-Escolano et al., 2018, modifié]

### 3. Mise en œuvre de la solution retenue

Pour le développement de la solution, un code déjà créé initialement pour l'analyse d'images d'observation de la Terre (Audebert, Le Saux et al., 2018) et employant le réseau SegNet a été choisi. Cela permet d'avoir une première base de travail, avec une suggestion sur le paramétrage du réseau (par exemple le nombre d'époques d'entraînement ou la taille d'un lot d'images passé en une fois dans le réseau) et la quantité de données nécessaire pour obtenir des résultats quantifiables et suffisants pour répondre aux besoins d'Altametrus. De plus, la segmentation sémantique des images inclue entre autres deux classes relatives à la végétation. Aussi, la résolution des orthophotographies utilisées pour l'entraînement est très haute (9 cm), ce qui est intéressant car nous avons des données possédant également une résolution très élevée (2 cm). Cela a permis d'avoir un aperçu des résultats possibles avec ce réseau, bien qu'il faille l'entraîner de nouveau avec les données de l'entreprise pour répondre à la problématique.

La base de données d'entraînement est un élément fondamental. Elle doit être suffisamment grande et diversifiée pour permettre au réseau de généraliser au mieux, c'est-à-dire ici pouvoir faire une segmentation sémantique de n'importe quelle nouvelle image qu'il rencontrera de façon la plus exacte possible. Par ailleurs, plus l'annotation (ou labellisation) de cette base de données est bien réalisée, plus on pourra espérer obtenir de bons résultats. Le choix des classes et de leur nombre est aussi un point important.

Quelques tests préliminaires à ceux présentés ci-après ont été réalisés. Ils ont permis d'appréhender la complexité de labellisation de la végétation. Les images d'entrées ont été labellisées en prenant en compte trois classes :

- la classe « arbres » : elle comporte tous les arbres ;
- la classe « reste de la végétation » : elle contient les arbustes, buissons, haies, plantes herbacées qui ne sont pas au ras du sol et éventuellement invasives ;

- la classe « non-végétation » : elle comprend tous les éléments qui ne sont pas de la végétation (rails, bâtiments, routes, chemins, mobilier urbain, etc.) et l'herbe rase, sèche ou clairsemée, qui ne présente aucun risque.

Pour la labellisation en elle-même, il était indispensable de trouver un outil pratique, qui permette une labellisation efficace : rapide et qualitative. L'outil *Pixel Annotation Tool* (Breheret, 2017), qui répond à ces deux critères, a donc été mis en œuvre. En effet, il suffit seulement d'annoter la frontière entre deux classes (dans le cas de la végétation), et l'opérateur est ensuite aidé par un algorithme qui va automatiquement propager la couleur des classes sur le reste de l'image. En outre, les jeux de données évoqués par la suite ont été constitués de façon à comporter de la végétation diversifiée : végétation verte, jaune-orangée, sèche, sans feuilles, etc.



Figure 2 : Pour une détection de chat (classe positive) dans une image, le chat encadré est une détection exacte (vrai positif), le chat oublié (non-encadré) est un faux négatif, le chien détecté est un faux positif, les autres animaux non-détectés sont exacts (vrais négatifs) [Saniterpen - Club des Partenaires, 2018, modifié]

Pour étudier la qualité des résultats obtenus, différentes métriques peuvent être utilisées. Dans ce résumé, nous utilisons l'exactitude, le rappel et la précision et considérons que la classe positive est la classe d'intérêt tandis que l'ensemble des autres classes correspond à la classe négative. L'exactitude correspond, pour toutes les classes, au pourcentage de pixels bien classifiés (par rapport à la labellisation) parmi l'ensemble des pixels à classifier. Le rappel permet pour une classe donnée d'avoir une idée de la quantité de faux négatifs, tandis que la précision permet d'avoir une idée de la quantité de faux positifs. Le rappel et la précision prennent une valeur comprise entre 0 et 1. Lorsqu'ils valent 1, pour une classe donnée, cela signifie qu'il n'y a pas de faux négatif et pas de faux positif. La Figure 2 illustre notamment ces notions de faux positifs et faux négatifs.

Le premier test (test A) réalisé avait pour but d'estimer le degré de finesse de la labellisation suffisant pour optimiser la durée d'annotation, tâche qui peut être très chronophage. Les performances du réseau ont donc été comparées pour un entraînement sur une quantité restreinte d'images très finement labellisées (environ 2h pour une image) et pour un autre entraînement sur ces mêmes images mais plus efficacement labellisées (moins d'1h par image). L'exactitude du réseau est passée de 87,0% à 82,7%. Cet écart est assez faible compte tenu du gain de temps apporté pour la labellisation. Nous avons donc retenu la deuxième approche pour créer la base de données complète, limitant ainsi de plusieurs dizaines d'heures le temps de labellisation. De plus, le rapport temps de labellisation nécessaire/qualité est intéressant car il permet d'avoir une plus grande quantité de données qui restent relativement bien labellisées.

Un deuxième test (test B) a été fait pour évaluer les performances du réseau sur une base de données complète ainsi labellisée. Les résultats du test sont présentés dans le Tableau 1. L'exactitude du réseau a augmenté en passant à 91,1% et le réseau est plus robuste que dans le test A. On constate une valeur de rappel très satisfaisante pour la classe « arbres » et au contraire un rappel assez faible pour la classe « reste de la végétation ». Cela s'explique notamment par le fait que cette classe contient de la végétation de types très divers (haies, petits buissons, grandes étendues de végétation herbacée envahissante...). Cependant, cela n'est pas péjorant pour notre problématique, car cette classe ne présente pas un risque majeur pour SNCF Réseau. Par ailleurs, pour ce qui est de la précision, la proportion de faux positifs est légèrement plus élevée que celle de faux négatifs pour la classe « arbres » mais cela n'est guère contraignant étant donné qu'on s'intéresse au « risque végétation ». On souhaite en effet essentiellement éviter les faux négatifs, c'est-à-dire les oublis de végétation. Pour la classe « reste de la végétation », la précision est près de deux fois plus importante que le rappel. D'un point de vue qualitatif, les résultats sont très satisfaisants pour ce qui est de la classe « arbres » et de manière générale pour la segmentation végétation/autre. Un exemple de résultat de prédiction est présenté en Figure 3.

	Arbres	Reste de la végétation	Non-végétation
Exactitude	91,1 %		
Rappel	0,93	0,18	0,95
Précision	0,90	0,32	0,94

Tableau 1 : Performances du réseau pour le test B



Figure 3 : Exemple de prédiction sur une nouvelle image pour le test B, à gauche la labellisation (vérité terrain) et à droite la prédiction

Au vu de la difficulté pour le réseau à classer correctement les pixels de la classe « reste de la végétation » et de l'intérêt plus particulier d'Altametrus pour les arbres, deux solutions peuvent être envisagées et mèneront à d'autres tests dans les semaines à venir. D'une part, il paraît pertinent de tester les performances du réseau avec une classification binaire : classe « arbres » et classe « autres ». D'autre part, un test pourra consister à garder les trois classes mais à les pondérer (un poids peut être attribué aux classes selon leur importance) différemment pour tenter d'améliorer les prédictions si l'on souhaite tout de même conserver la classe « reste de la végétation ». Par ailleurs, pour des raisons de performances de l'ordinateur à disposition, il faut noter que le paramétrage utilisé pour les tests ci-dessus n'est pas forcément le plus optimal. Dans les semaines qui suivent, d'autres tests vont être conduits pour tenter de l'améliorer et ainsi encore optimiser le réseau de neurones à notre problématique.

Les résultats obtenus jusqu'ici restent toutefois relativement concluants, avec une exactitude globale élevée et un rappel supérieur à 0,9 pour la classe « arbres ». Par ailleurs, différentes perspectives sont envisagées pour le traitement et l'exploitation des images classifiées en sortie du réseau de neurones. En fonction des résultats, des opérations morphologiques (traitement d'images) pourront être envisagées sur les images classifiées afin de les améliorer. Un code informatique pourrait permettre l'extraction des différents polygones des classes pour obtenir une couche vectorisée intégrable dans un SIG (Système d'Information Géographique) pour les classes qui intéressent l'entreprise. Cela pourra conduire à l'avenir à la réalisation d'une cartographie.

## Conclusion

Dans le cadre du suivi et de la maîtrise du « risque végétation », les expérimentations menées permettent de connaître la position et l'étendue de la végétation arborée de façon relativement fiable. Cela permettra à Altametrus de gagner du temps dans son processus de traitement et d'analyse des données pour fournir une cartographie à SNCF Réseau. Ce projet va être complété dans les semaines à venir. S'il possède encore des limites, il offrira toutefois la possibilité à SNCF Réseau d'enrichir sa base de données relative à la végétation et potentiellement de diminuer la durée des tournées de terrain, qui pourront être plus ciblées sur les zones à risque.

## BIBLIOGRAPHIE

- Audebert, N., Le Saux, B. et Lefèvre, S. (2018) « Beyond RGB : Very High Resolution Urban Remote Sensing With Multimodal Deep Networks », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140, p. 20-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.011>.
- Breheret, A. (2017) *Pixel Annotation Tool*. Disponible sur: <https://github.com/abreheret/PixelAnnotationTool> (Consulté le: 26 juin 2020).
- García-García, A., Orts-Escolano, S., Oprea, S., Villena-Martinez, V., Martinez-Gonzalez, P. et Garcia-Rodriguez, J. (2018) « A survey on deep learning techniques for image and video semantic segmentation », *Applied Soft Computing Journal*. Elsevier B.V., 70, p. 41-65. doi: 10.1016/j.asoc.2018.05.018.
- Saniterpen - Club des Partenaires (2018) *Saniterpen*. Disponible sur: <https://www.saniterpen.fr/club-des-partenaires.html> (Consulté le: 30 juin 2020).

# Création d'une visite virtuelle de la tour Hans Von Altheimsturm des Ponts-Couverts de Strasbourg par intégration d'un modèle 3D dans un moteur de jeu

*PFE présenté par :* **Florian DURIEUX**  
*Société d'accueil :* **DRAC Grand-Est**  
*Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,*  
*Équipe TRIO, INSA Groupe PAGE*  
*Directeur de PFE :* **Maxime WERLÉ**  
*Encadrante :* **Hélène MACHER**  
*Correctrices :* **Hélène MACHER & Tania LANDES**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

La tour Hans Von Altheimsturm est une des quatre tours encore existantes des Ponts-Couverts de Strasbourg. Une cinquième tour ayant disparu depuis, suite à un incendie. De plus, il existe une certaine méconnaissance au sujet de ces tours. En effet, elles n'ont jamais fait l'objet d'études détaillées, d'un point de vue archéologique ou historique. On sait seulement qu'elles ont été construites entre 1230 et 1250. Elles ont tout d'abord eu des fonctions de tour de défenses, puis, elles ont été réaménagées en prison, avant d'être désaffectées. Enfin, la tour Hans Von Altheimsturm a bénéficié d'une restauration des bois intérieurs vers 1690.



Figure 1 : Photographie de la tour Hans Von Altheimsturm

Pour des raisons de sécurité et de préservation du bâtiment, ces tours sont fermées au public. Il devient donc intéressant de s'intéresser à ces tours et de proposer une visite virtuelle pour le grand public. C'est la tour Hans Von Altheimsturm qui va inaugurer ces travaux mis en œuvre par la DRAC Grand-Est (Direction Régionale des Affaires Culturelles). Les autres tours feront elles aussi l'objet d'un PRT et PFE pour les prochaines années.

Le but de ce projet de fin d'études (PFE) est de créer un modèle 3D virtuel de la tour Hans Von Altheimsturm. Celui-ci sert de base à l'élaboration d'une documentation graphique de la tour, destinée aux archéologues et historiens. Ce modèle 3D est également utilisé dans la création de la visite virtuelle, pour faire découvrir la tour au grand public. Pour cela, il a fallu reprendre le travail d'acquisition et de modélisation effectué lors du projet de recherche technologique (PRT) de 2019, mené par Jean-Lou COMBE et Florian DURIEUX.

## 2. Modélisation 3D

Le PRT de 2019 a été l'occasion de faire l'acquisition de l'intérieur et de l'extérieur de la tour avec un scanner Laser. Des premiers essais de modélisation ont aussi été réalisés durant le PRT. À l'occasion de ce PFE, la chaîne de traitements pour la modélisation a été améliorée afin d'obtenir le modèle le plus réaliste possible.

## 2.1 Modélisation intérieure

Il a été décidé de combiner maillages et primitives géométriques pour la maquette intérieure. L'intérêt du modèle hybride est de fournir un niveau de détail adapté à chacune des zones de la tour. De plus, le modèle se révèle plus léger qu'un maillage intégral.

Le projet intérieur a été repris depuis l'étape des nuages de points du scanner Laser consolidés. Une nouvelle colorisation des points a été effectuée, à partir du traitement « Laser Illuminated HDR » du logiciel Scene de Faro. Elle se base sur les photos sphériques acquises par le scanner Laser et l'intensité Laser des points. Cette fonction améliore alors grandement la qualité de la colorisation, par rapport à un traitement classique. L'étape suivante consiste à segmenter les points indésirables et/ou trop sombres (dus à un manque d'éclairage). Un script permettant de supprimer les points les plus sombres entre deux nuages de points a été développé sous MATLAB. Cependant, son exécution est bien trop longue pour qu'il soit exploité dans le cadre de ce projet. Malgré tout, la méthodologie est validée et le script pourra être repris dans d'autres travaux. La segmentation a donc été menée manuellement dans 3DReshaper et suivie d'une génération des maillages, par étage, à partir de nuages de points non ré-échantillonnés. Ensuite, les maillages des différents étages ont été assemblés entre eux afin de former un modèle maillé intérieur. Enfin, une étape d'amélioration du maillage a permis de supprimer les triangles indésirables et de reboucher les trous.

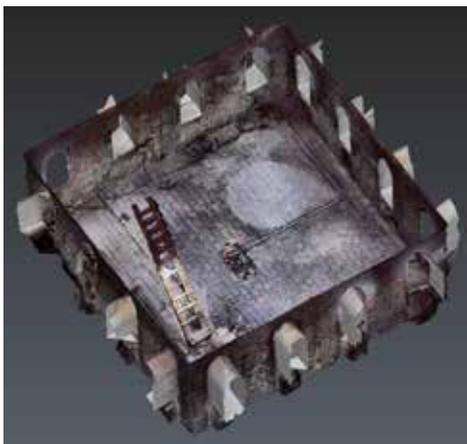


Figure 2 : Maillage texturé du 5<sup>ème</sup> étage de la tour

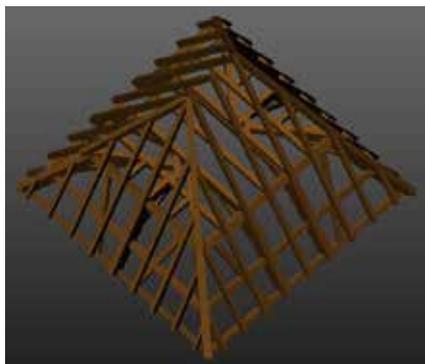


Figure 3 : Modèle géométrique de la charpente de la tour

En parallèle, la charpente et les escaliers ont été modélisés par primitives géométriques, à partir des nuages de points, avec le logiciel Trimble RealWorks. Une tentative de modélisation automatisée de la charpente par le programme HERACLES, fonctionnant sous MATLAB, n'a pas permis de modéliser correctement la charpente. Il s'ensuit un export au format OBJ des éléments géométriques. Puis, à l'aide de Meshlab, une couleur marron foncée a été appliquée. À la suite de cela, les primitives sont intégrées dans le projet intérieur, sous 3DReshaper, dans le but de fusionner le maillage principal avec la charpente et les escaliers.

Enfin, le texturage du maillage intérieur a été effectué à partir du nuage de points colorisé, dans 3DReshaper.

## 2.2 Modélisation extérieure

Le maillage extérieur conçu lors du PRT a été conservé. Cependant, sa texture ne sera pas gardée, car elle a été obtenue par le nuage de points colorisé et comporte des défauts. Pour cela, une campagne photo (comprenant 130 photos) a été menée avec un Canon EOS 5DS R. Des retouches photographiques ont permis de réduire les ombres et faire ressortir les détails. Des masques ont également été créés afin d'ignorer certaines zones sur les images.

Enfin, l'emploi des méthodes photogrammétriques et du logiciel Metashape a permis l'orientation des photos et l'application d'une texture photo-réaliste sur le maillage importé. Un relevé tachéométrique effectué lors du PRT de 2019 a été repris dans le travail d'orientation des images.

### 2.3 Modèle global

Avant d'intégrer le modèle 3D dans le moteur de jeu, il est nécessaire de regrouper tous les éléments de la maquette numérique. Pour cela, il faut réaliser la jonction entre le maillage intérieur et les escaliers et la charpente. Enfin, il faut joindre les maillages intérieur et extérieur entre eux. Ces jonctions sont faites par la création de maillages à la main et qui appartiennent au maillage intérieur. Enfin, un allègement du modèle 3D a été réalisé, par réduction du nombre de triangles des maillages, via le logiciel Meshlab.

Concernant les formats de fichier des éléments en 3D, c'est le FBX de Autodesk qui a été retenu. Ce format est parmi les plus légers disponible et il offre une bonne compatibilité entre les logiciels. Le format OBJ est également utilisé, mais seulement comme format intermédiaire, pour les échanges entre les logiciels.

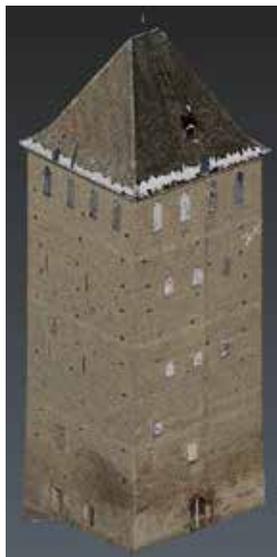


Figure 4 : Modèle extérieur maillé et texturé de la tour

## 3. Mise en place d'une visite virtuelle dans un moteur de jeu

L'expérience de visite virtuelle se fait sous la forme d'un jeu vidéo, avec une dimension éducative. Ce type de jeu porte le nom de Serious Game. Pour cela, le développement s'effectue dans un moteur de jeu. Son intérêt est de faciliter et rendre plus facile la création d'un jeu vidéo par la prise en charge de certaines fonctionnalités comme la physique du jeu, le rendu 3D ou encore l'intelligence artificielle. Il permet donc de se concentrer sur le contenu du jeu et non sur la programmation.

### 3.1 Choix du moteur de jeu et de la plateforme

Une liste des principaux moteurs de jeu a été établie selon leurs popularités. Il s'agit de Unreal Engine 4 (abrégié par UE4), Unity, CryEngine et Blender. Ce dernier est un peu en retrait au niveau des performances par rapport aux concurrents précédemment cités. De plus, il se révèle plus complexe à prendre en main. Concernant CryEngine, ses performances sont très bonnes, mais il est plus orienté vers le développement des jeux de type FPS (tire à la première personne). Enfin, UE4 et Unity sont très proches l'un de l'autre. Seul le langage de programmation permet de différencier réellement les deux concurrents. Quand UE4 propose une programmation visuelle avec le Blueprint, Unity repose sur le langage C# (prononcé C-Sharp). Cependant, dans le cadre de ce projet, c'est Unity qui a offert la meilleure compatibilité avec les modèles texturés importés, UE4 posant des problèmes à ce sujet.

Concernant la plateforme d'exécution de la visite virtuelle, il a été décidé de développer l'expérience pour Windows. En effet, ce système d'exploitation est très répandu. De plus, il repose sur des configurations matérielles plus puissantes que la plupart des smartphones et tablettes. Le stockage est également plus important. En outre, pour des raisons de diffusion, la combinaison clavier/souris a été retenue pour le contrôle du personnage virtuel. La visite sera affichée sur un écran. Cette solution technique est moins onéreuse que la Réalité Virtuelle (VR) qui impose un casque et des accessoires spécifiques.

### 3.2 Principaux aspects de la visite virtuelle

De nombreux points sont intégrés dans la visite afin de rendre l'expérience la plus réaliste possible. Il est possible de choisir entre plusieurs personnages de taille différente. Les collisions entre le personnage virtuel et les éléments physiques (murs, rambardes, etc.) sont prises en compte dans l'expérience. Un éclairage ambiant est placé devant les fenêtres dans le but d'imiter la lumière naturelle. Une chaîne de traitement des rendus a été élaborée, pour améliorer les graphismes. Toujours dans ce même but, l'anti-aliasing (anticrénelage) est pris en charge. Un effet de poussière est aussi ajouté. Le réalisme passe aussi par la partie audio, en intégrant le son produit par les pas du personnage.

L'utilisateur peut se contenter de simplement découvrir le bâtiment ou alors, se documenter au travers du contenu historique et archéologique intégré au modèle 3D. Les objets d'intérêt ont été choisis par Maxime WERLÉ, ingénieur d'études à la DRAC Grand-Est. Pour interroger ces objets, l'interaction se fait sous la forme de boutons. Un panneau s'ouvre alors et présente une description à l'aide de textes et d'images. Avec cet apport en connaissances, les utilisations deviennent plus nombreuses et touchent un public plus important.

### 3.3 Optimisation des performances

Pour alléger le jeu vidéo, en terme de stockage mémoire, une compression des maillages et images de texture a été réalisée. Une translation du modèle 3D avait été faite avant son intégration dans Unity. Le géoréférencement est donc perdu, mais se révèle inutile dans cette application. De plus, pour permettre une navigation fluide dans la maquette numérique, les calculs liés à l'éclairage et à la chaîne de rendu sont effectués en post-traitement et non en temps-réel. De cette façon, ils sont exécutés une seule fois, au lieu d'être répétés.

### 3.4 Animation de la tour Hans Von Altheimsturm

Enfin, une animation vidéo a été réalisée sous 3DReshaper et iMovie. Il s'agit d'un second moyen de visiter la tour. Elle est notamment plus accessible que le programme de visite virtuelle. D'une part, elle peut être consultable instantanément sur Internet, sans avoir une bonne connexion. D'autre part, elle ne requiert pas de connaissances particulières pour être consultée. Elle est aussi consultable sur un smartphone ou une tablette, en plus du traditionnel ordinateur. Il devient alors possible d'avoir un aperçu de l'intérieur de la tour, directement sur place, aux Ponts-Couverts. Cette vidéo sera notamment disponible sur YouTube. Enfin, il est envisageable qu'un QR-code soit présent à proximité de la tour, pour accéder à la vidéo en ligne.

## 4. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis d'achever la modélisation 3D et la texture de la tour Hans Von Altheimsturm. Sur cette base, une documentation graphique est venue compléter les études archéologiques actuellement menées par la DRAC Grand-Est. De plus, ce PFE bénéficie au grand public, grâce à la visite virtuelle et à l'animation vidéo qui permettent de découvrir la tour bien qu'elle soit fermée au public. Elles prennent également un sens dans une situation de confinement. Tout cela permet donc de contribuer à la sauvegarde du patrimoine. En outre, la visite virtuelle peut être exploitée comme outil pédagogique accessible aux élèves.

Parmi les perspectives envisageables, on peut citer la programmation d'un outil de segmentation automatique des points sombres, dans un autre langage que MATLAB. Le but est d'obtenir de meilleures performances et de réduire grandement le temps d'exécution. La visite virtuelle pourrait également être rendue compatible avec la Réalité Virtuelle (VR), afin d'offrir une expérience encore plus immersive pour ceux qui sont équipés du matériel nécessaire. Une description vocale des contenus archéologiques et historiques pourrait aussi venir compléter le texte.

# Étude sur l'exploitation de mesures de nuages de points pour le domaine de l'auscultation automatique.

*PFE présenté par :* Ariala ANDRIAMIHAJA  
*Société d'accueil :* Sixense Soldata  
*Directeur de PFE :* Remi FEJOZ  
*Correcteur :* Gilbert FERHAT



## 1. Contexte

Lors de travaux en souterrain et dans un milieu urbain, il est indispensable de procéder à l'auscultation des ouvrages environnants. L'auscultation constitue la première étape de l'instrumentation d'un site. Elle permet l'examen régulier du site au moyen de capteurs de mesure, qu'ils soient à lecture directe (visuelle sur site) ou automatique (par un appareillage à enregistrement de données sur site). Ce contrôle effectué de manière régulière fournit des informations précises sur l'évolution de l'instabilité. La société Sixense Soldata est spécialisée dans l'auscultation et la surveillance des risques liés au sol et aux structures. Actuellement, elle utilise deux systèmes de traitement liés à l'utilisation des stations totales : Cyclops et Centaure. Le système Cyclops utilise un système de topographie automatique. Des cibles sont fixées sur les bâtiments à surveiller et, par un calcul de compensation en bloc, leurs coordonnées sont calculées à intervalle de temps fixe. Le système Centaure permet de réaliser des mesures de nivellement de surface et permet de suivre la déformation d'une surface sans qu'il soit nécessaire d'y installer des prismes. Cela consiste à viser toujours la même zone. En pratique, l'instrument mesure des angles horizontaux et verticaux fixes. Ainsi, pour un point, même si les XY peuvent varier sensiblement, on ne suivra que le Z du point visé.

Or, la mise en place de prismes s'inscrit dans une procédure présentant plusieurs défauts. D'une part, elle est couteuse et intrusive car nécessitant un perçage. Elle est également risquée, car les bâtiments peuvent présenter de l'amiante. D'autre part, elle peut gêner le propriétaire du bâtiment, une autorisation est d'ailleurs nécessaire. Ainsi Sixense cherche à développer une méthode permettant de réduire l'usage de ces prismes.

L'utilisation de nuages de points serait très pertinente. Il s'agit d'une technologie déjà bien utilisée, permettant d'acquérir des bâtiments entiers et ce, sans contact ni pose de prisme. De ce fait, exploiter les nuages de points pour le domaine de l'auscultation pourrait permettre d'améliorer voire de substituer une partie des traitements actuellement mis en place.

Les deux systèmes de traitement, Cyclops et Centaure, utilisent les données issues de stations totales. Plusieurs de ces stations possèdent une option « mesure de nuages de points ». Ces nuages de points sont moins denses que ceux issus de scanner laser terrestre mais pourraient permettre d'apporter un complément aux systèmes de traitement actuellement utilisés.

## 2. Parti pris et objectif

L'objectif du projet de Recherche & Développement est d'utiliser les capacités de mesures type scanner des stations du parc pour l'intégrer au système de traitement Cyclops actuellement mise en place afin de

- Réduire les installations physiques de prismes d'auscultation
- Couvrir des surfaces plus grandes et non plus des points
- Couvrir des zones n'étant pas accessibles par la méthode actuelle

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans cette optique et a pour objectif de

- Etudier la qualité et la précision du nuage de points extrait.
- Etudier les paramètres influençant sur la qualité du nuage de points extrait.
- Fournir les conditions optimales de l'utilisation de l'appareil.

### 3. La station totale Trimble S7

Le facteur financier est primordial. L'idéal serait de ne pas avoir à investir dans un appareil dans l'immédiat, de ce fait SIXENSE souhaiterait exploiter les capacités de mesure des stations totales déjà acquises. Parmi les stations totales utilisées, le Trimble S7 est déjà largement diffusé sur les chantiers. Ainsi, il a été décidé que c'est sur les capacités de cet appareil que nous nous focaliserions. Une fois cette étape franchie, il pourra être envisagé, en fonction du marché, d'exploiter des données issues de multi stations et/ou de scanners laser terrestres. Le tableau suivant résume les principales caractéristiques du S7 annoncées par le constructeur.



Figure 1 : Trimble S7

Caractéristiques du tachéomètre	
Précision angulaire ; EMQ	1' (0.3 mgon)
Mesures de distances ; EMQ	Avec prisme : 1mm + 2ppm Méthode Centaure : 2,0 mm + 2 ppm
Portée max	5500m
Caractéristique du mode de numérisation	
Portée maximale	250m
Vitesse d'acquisition	15pts/s
Fenêtre de scan	1 fenêtre
Vitesse	15 points par seconde
Résolution minimale	10 mm*
Ecart Types	1,5mm à <50m
Précision à point 3D unique -Répétabilité des mesures -	10mm à <150m

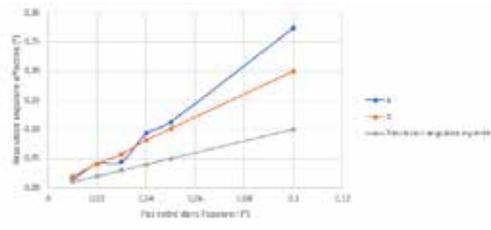
\*dans la documentation, la résolution minimale n'est associée à aucune distance.

Tableau 1 : Données constructeur, source : Trimble.

On constate que cette station totale est pourvue d'une option *scanning*. Cependant ce n'est pas la fonction principale de ces instruments mais plutôt une option complémentaire à la station totale permettant d'effectuer des tâches de *scanning* "sélectives". [Trimble 2015] L'objectif ici sera d'étudier l'apport de cette fonctionnalité sur les systèmes de traitement Centaure et Cyclops actuellement utilisés.

### 4. Paramètres influençant sur la qualité du nuage de points extrait

L'intégration de la fonction « scanning » dans le système de mesure actuel est réalisé en parallèle à ce projet de fin d'étude. Par conséquent, c'est avec une application test que les données sont extraites. Cela permet de corriger les éventuels défauts. L'utilisateur entre une fenêtre horizontale et verticale ainsi qu'un pas angulaire. Cette application permet l'export des données au format suivant : Coordonnées X, Y, Z, Luminance, Distance qui suppose que les coordonnées de la station soient en (0,0,0). Le premier constat qui a été fait, est que le nuage de points produit n'était pas régulier. Pour chaque balayage laser et pour un même pas angulaire, trois espacements entre les points sont mesurés : a, b et c. On mesure l'espacement entre les points, et on retrouve ainsi la résolution effective. A 35 mètres, on a le graphique suivant. De ce fait, en fonction de la distance à l'appareil et pour augmenter la précision il conviendra de ne pas sélectionner un pas trop grand. De plus, afin d'éviter la perte d'information sur l'objet, on privilégiera les objets plans.



**Figure 2 :** Distances a, b et c mesurées, résolution angulaire effective

Lors de ces tests, on a pu également chiffrer la vitesse d'acquisition de l'appareil. La vitesse d'acquisition annoncée par le constructeur est de 15 points par seconde. Pour une surface scannée de 6 mètres par 2 mètres, une distance station totale-objet allant jusqu'à 100 mètres, on trouve une vitesse d'acquisition moyenne de 9 points par seconde. Le Trimble S7 possède une vitesse d'acquisition bien inférieure aux scanners laser terrestres sur le marché. En effet, le TX8 annonce 1 million de points par seconde. Pour pallier cette contrainte, il faudra adapter la zone de levé et veiller à ce que l'acquisition ne soit pas trop longue.

Distance entre la station totale et l'objet, en intérieur	Pts/sec
10 m	8,1
23 m	9,5
48 m	9,6
96 m	9,5

**Tableau 2 :** Test de vitesse d'acquisition de l'appareil en fonction de la distance station totale - objet.

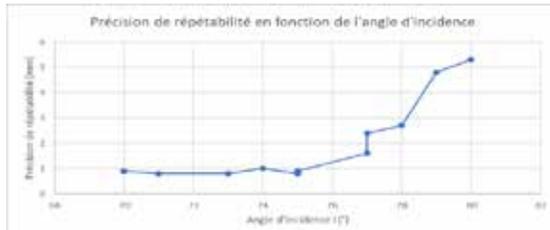
Des tests de répétabilité ont été réalisés afin de savoir si oui ou non une auscultation était possible. De ce fait, on compare la position des points de différents nuages successifs d'un même ouvrage. Un mode opératoire a été mis en place consistant à effectuer le balayage laser cinq fois de suite sur un objet plan, et ce en conservant les mêmes conditions. Ce mode opératoire correspond aux procédés de mesures automatiques habituels. Les paramètres tels que la distance, l'angle d'inclinaison, la matière et la couleur de l'objet surveillé sont pris en compte afin de déduire les conditions optimales d'utilisation. Les tests ont été réalisés en intérieur et en extérieur.

Plusieurs modes de comparaison sont possibles. L'export des données permet d'avoir la distance entre le point et la station. La fenêtre de sélection se fait selon deux angles horizontaux et verticaux, de ce fait, la zone mesurée est la même. De plus, les points étant systématiquement mesurés dans le même ordre, il est possible de comparer directement les distances entre elles. On calcule ensuite l'écart-type de chaque distance entre les 5 mesures, puis on calcule la moyenne des écarts types de ces distances ce qui permet d'obtenir la répétabilité. Une autre méthode consiste à utiliser Cloud Compare via le calcul de distance. Celle-ci permet de chiffrer les écarts obtenus entre les différents nuages de points. Dans les deux cas, en comparaison aux méthodes habituelles Cyclops et Centaure, le calcul de précision est concluant. Le tableau suivant utilise les résultats suivant la première méthode.

Distance entre la station totale et l'objet, en extérieur.	Précision de répétabilité.
35 m	1,2 mm
58 m	1,3 mm
74 m	1,3 mm
195 m	2,5 mm

**Tableau 3 :** Précision de répétabilité en fonction de la distance station totale – objet

Au vu des précisions obtenues, la répétabilité de la mesure d'un point pour les auscultations futures d'ouvrages est donc tout à fait envisageable. Comparer directement les nuages en utilisant le fichier brut issu de l'appareil, sans approximation et sans modélisation permet de quantifier les écarts très rapidement. On étudie par la suite l'inclinaison du plan mesuré par rapport à la position de la station. Le paramètre étudié est l'angle incident. On le définit comme étant l'angle formé par le rayon incident avec la normale à une surface rencontrée. De la même manière que vu précédemment, on réalise 5 balayages laser de la même surface afin d'en déduire sa précision de répétabilité.



**Figure 3** : Précision de répétabilité en fonction de la distance station totale - objet.

Le dernier facteur influe sur la qualité du nuage de points est la matière et la couleur de l'objet numérisé. Dans le cas où l'objet est de couleur sombre, on observe un bruit de mesure. Des tests de répétabilité sont réalisés sur un bâtiment de couleur sombre ainsi que sur la route. Dans les deux cas, on trouve une répétabilité supérieure à 5mm.

### 5. Processus d'auscultation

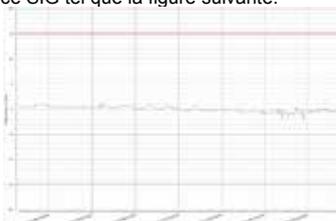
Afin de pallier ce bruit de mesure, on réalise un algorithme permettant de filtrer les points aberrants. Le principe est le suivant ; à partir des points scannés on approxime un plan passant par ces points en suivant le principe des moindres carrés. Le programme permet d'effectuer plusieurs itérations du calcul des coordonnées (A, B, C) du plan jusqu'à ce que les distances orthogonales entre tous les points et le plan soient minimales.

Ensuite, on calcule de nouvelles coordonnées projetées sur le plan afin d'obtenir finalement la distance orthogonale entre chaque point et le plan. Puis, les points possédant une distance supérieure à un seuil choisi sont filtrés. On obtient un nouveau nuage de points à traiter. Ce programme est réalisé en langage python. En entrée on a le nuage de points au format .csv (X, Y, Z, D, L), et en sortie le nuage de points filtré ainsi que les coordonnées du vecteur normal.

On compare les distances du fichier de sortie entre chaque nuage de points, et également la moyenne des écarts-types de ces distances. Si cette valeur se révèle être supérieure à la précision de répétabilité, on peut déduire que l'ouvrage aura localement subi un mouvement. En utilisant les vecteurs normaux, il sera possible de déterminer les angles de rotations entre les deux états.

### 6. Conclusion et perspective

La réalisation de ce projet est possible, la précision de l'appareil utilisé permet d'apporter un complément aux mesures Cyclops et Centaure actuellement réalisées. La société Sixense étant spécialisée dans l'auscultation d'ouvrage, elle a développé un SIG en ligne nommé Geoscope. Cette plateforme permet de visualiser les déplacements et l'évolution de données de différents capteurs et d'envoyer un signal d'alerte lorsqu'un seuil est dépassé. L'objectif final est d'intégrer les mesures issues du balayage laser dans ce SIG tel que la figure suivante.



**Figure 4** : Graphique de déplacement en Z d'un prisme observé par mesure tachéométrique sur Geoscope

# Optimisation des solutions de positionnement GNSS pour les opérations offshore d'Exploration Production de Total.

PFE présenté par : **Gautier JOLAIN**  
Société d'accueil : **Total**  
Directeur de PFE : **Frédéric AUGER**  
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



## 1. Contexte de l'étude et introduction

Le GNSS est actuellement le moyen privilégié pour le positionnement absolu offshore. Afin de localiser avec une précision suffisante les structures en mer, il est nécessaire d'utiliser des corrections. Actuellement ces corrections sont majoritairement de type PPP (Precise Point Positioning) et permettent d'atteindre une précision allant jusqu'à 5 cm ( $2\sigma$ ) en temps réel cinématique.

Ces corrections sont calculées et fournies par des entreprises commerciales spécialisées comme Oceanering (ex C&C), Veripos (Hexagone), Fugro ou Trimble. La fourniture de ces corrections, ainsi que des récepteurs et des antennes, représente pour Total un coût moyen de 100k€ par an et par bateau.

En parallèle de ces fournisseurs commerciaux, certaines organisations proposent des corrections PPP gratuites. On peut citer le « Real Time Service » de l'IGS (International GNSS Service) qui propose, principalement à des fins scientifiques, des corrections pour les satellites GPS et GLONASS ou le futur « High Accuracy Service » (HAS) de Galileo. Le but de cette étude est de proposer des scénarios dans lesquels le HAS pourrait remplacer ou compléter les services commerciaux actuellement utilisés afin d'optimiser le coût du positionnement GNSS offshore.

Pour mener à bien le projet, j'ai étudié les données issues des filiales Anglaise, Congolaise et Nigérienne de Total. L'étude se limite à trois types de supports navals qui sont les FPSO<sup>1</sup> (Figure 1 (b)), les FSV<sup>2</sup> (Figure 1 (c)) et les RIG de forage (Figure 1 (a)). Le tableau 1 explicite le rôle de chacun de ces supports.



Figure 1 : (a) Rig de forage Rowan Renaissance. (b) FPSO Pazflor. (c) FSV Far Sleipner

Tableau 1 : Description des supports navals étudiés dans le cadre de l'étude

Support	Description
FPSO	Plateforme flottante de production et de stockage utilisée dans les champs en eau profonde/très profonde.
FSV	Bateau de support et d'intervention réalisant de nombreuses opérations sous-marines tout au long de la vie du champ.
RIG	Bateau de forage, utilisé pour forer les puits d'exploration (recherche d'hydrocarbures) et de développement/production (extraction des hydrocarbures).

<sup>1</sup> Floating Production Storage and Offloading

<sup>2</sup> Field Support Vessel

## 2. Spécifications, utilisations et besoins GNSS offshore

La première partie de mon travail a été de confronter les spécifications générales de Total sur le positionnement GNSS aux solutions actuellement utilisées et aux besoins opérationnels réels.

Sur les supports navals étudiés, le GNSS fait partie du lot de positionnement de surface. Il est associé à d'autres capteurs (gyrocompas et centrales inertielles entre autres). Le but du lot de navigation de surface est de connaître la position absolue du support afin de géoréférencer des infrastructures sous-marines et/ou de surveiller les mouvements des plateformes.

### Spécifications minimales exigées

De manière générale, Total demande à ses sous-traitants de pouvoir fournir, en temps réel, la position du point de référence (CRP) de ses bateaux avec une précision minimale de 1m ( $2\sigma$ ).

De plus le système de navigation doit être 100% redondant avec deux solutions calculées de manière indépendante. En termes d'équipement GNSS, cette redondance se traduit par la mobilisation de 2 couples récepteur/antenne distincts. De plus, chaque couple doit utiliser des corrections calculées grâce à deux réseaux de référence distincts et transmises par des satellites géostationnaires différents.

### Utilisation actuelle

Pour répondre aux exigences de Total en matière de positionnement de surface, deux solutions sont actuellement mises en place. La première consiste à faire appel à un sous-traitant de service de positionnement qui fournit le matériel et les corrections PPP. Les corrections utilisées permettent d'avoir une précision décimétrique ( $2\sigma$ ) au niveau des antennes. Cette solution est systématiquement utilisée à bord des RIG et des FSV, on la retrouve aussi sur quelques FPSO. Le coût de la fourniture des deux couples récepteur/antenne + corrections varie en fonction des sous-traitants et des filiales mais représente en moyenne 100k\$ par an et par support.

La deuxième solution, présente uniquement sur certains FPSO, est l'utilisation de matériel acheté par Total. On retrouve souvent un récepteur monofréquence GPS qui ne bénéficie pas de corrections. Cet équipement ne permet plus de répondre correctement aux attentes en termes de positionnement mais a l'avantage d'être gratuit.

Lorsque l'on compare les spécifications générales et l'utilisation actuelle du GNSS sur les bateaux de Total, on se rend compte que les spécifications générales ne sont pas toujours respectées, en particulier sur les FPSO, que ce soit en termes de précision ou de redondance des équipements.

### Besoins réels

Après m'être rendu compte que les solutions techniques employées ne répondaient pas toujours aux spécifications exigées par Total, j'ai essayé d'expliquer les besoins de chaque support en fonction du type d'opérations qu'ils effectuent. Le tableau 2 résume ces besoins.

**Tableau 2 : Précision suffisante pour le positionnement GNSS en fonction des supports étudiés et leurs opérations types.**

Support	Besoins	Précision suffisante ( $2\sigma$ )
FPSO	Détecter les ruptures d'ancrage	1,5 m
	Monitorer la position	
FSV	Positionnement de ROV <sup>3</sup>	1,0 m
	Calibration du système acoustique	0,1 m
RIG	Positionner les têtes de puit au plus proche de la position théorique	1,0 m
	Calculer la position finale des têtes de puit	0,1 m

Pour ce qui concerne le positionnement sous-marin, des instruments de positionnement acoustique sont utilisés en parallèle du GNSS. L'erreur de mesure des systèmes acoustiques est dépendante de la profondeur à laquelle la mesure est réalisée. En eau profonde, l'influence du GNSS sur le bilan d'erreur global est très faible. Par exemple<sup>4</sup>, à 1500m de profondeur l'utilisation de

<sup>3</sup> « *Remotely Operated underwater Vehicle* »

<sup>4</sup> Cas d'un positionnement « *Ultra Sort BaseLine* » (USBL) (précision de l'ordre de 0.5% de la hauteur d'eau) en supposant les bras de levier entre le système USBL et l'antenne GNSS parfaitement connu.

corrections GNSS donnant une précision de 20 cm au lieu de 10 cm provoquera une dégradation sur la précision planimétrique d'un point sous-marin de l'ordre du millimètre. Pour la majeure partie des opérations des FSV, il peut donc être acceptable d'utiliser des corrections moins performantes que ce qui est actuellement utilisé.

### 3. Galileo « High Accuracy Service »

La base des optimisations envisagées, dans le cadre de cette étude, est l'utilisation du service de haute précision de Galileo. Ce service n'est pas encore disponible et des détails techniques sont encore en cours de discussion à la Commission européenne. Afin d'obtenir le maximum d'information sur ce que sera ce service, j'ai été en contact avec des ingénieurs du CNES qui sont impliqués dans le développement du HAS.

Le HAS sera un service PPP qui a pour but de proposer, à terme, des corrections permettant un positionnement 2D précis à 20 cm ( $2\sigma$ ). Les corrections seront calculées grâce à un réseau de stations de référence au sol qui sera spécialement développé pour ce service. Les corrections seront transmises aux utilisateurs directement via la fréquence E6 des satellites Galileo, et seront accessibles gratuitement à tout utilisateur possédant un récepteur capable de recevoir et démoduler ce signal. L'originalité d'une diffusion de corrections directement via les satellites de navigation rend le HAS particulièrement robuste au niveau des moyens de réception. En effet chaque satellite Galileo devrait diffuser des corrections pour augmenter les données de navigation de tous les satellites Galileo et GPS. Initialement prévu pour 2020, ce service ne sera probablement pas disponible avant fin 2021 dans sa version initiale (~ 50 cm 2D), et pas avant 2022 pour le service totalement opérationnel.

Sur le plan technique, le HAS permettra d'augmenter à minima les données de navigation des satellites GPS et Galileo mais il n'est pas exclu que ce service augmente aussi les données des satellites GLONASS et BeiDou. Ces corrections devraient se baser sur une version compressée de format RTCM SSR<sup>5</sup>.

Actuellement, le plus gros frein au développement de ce service est le déploiement du réseau des stations de référence au sol. Pour proposer des corrections globalement disponibles, un service PPP doit disposer au minimum d'une vingtaine de stations réparties à la surface de la Terre. Cependant, pour assurer une bonne redondance des observations et obtenir des corrections fiables et robustes, il est préférable d'avoir un minimum de 80 à 100 stations. Galileo étant un programme étatique sous le contrôle de la Commission européenne (la gestion quotidienne du système Galileo est déléguée à la GSA<sup>6</sup>) les stations ne peuvent, actuellement pas être installées hors d'un territoire européen, pour des raisons de sécurité. Cela limite énormément les possibilités d'implantation des stations de référence, retardant par là même le lancement du service.

D'un point de vue « opérationnel », l'agence GNSS européenne ne proposera aucune garantie contractuelle quant à la continuité de service du HAS. Il sera de la responsabilité de l'utilisateur final d'estimer les risques et les conséquences d'une coupure de service sur son activité, et de trouver les moyens de mitigation adéquats. J'ai eu l'occasion de me prêter à l'exercice d'analyse de risque afin de proposer des optimisations adaptées aux besoins de chaque support en termes de continuité de service.

### 4. Optimisations envisagées

Une fois les besoins établis et les solutions de positionnement gratuites connues, on peut commencer à se pencher sur l'optimisation. Deux grandes tendances d'optimisation ont été étudiées : la première est l'utilisation de corrections PPP mixtes Galileo/Commercial, et la seconde est une solution 100% Galileo HAS.

#### Solution mixte

Un moyen d'optimisation envisagé est l'utilisation d'une solution mixte entre un service commercial et le HAS de Galileo. Pour pouvoir être mise en place, il faut que les fournisseurs traditionnels soient prêts à proposer une offre utilisant le HAS. Le matériel serait fourni par le sous-traitant ainsi que les corrections. Le fait d'utiliser des corrections propriétaires et des corrections gratuites devrait permettre de faire diminuer le coût journalier du service tout en conservant deux systèmes 100% indépendants à bord. Après discussion avec les fournisseurs de corrections (Fugro,

<sup>5</sup> Radio Technical Commission for Marine services State Space Representation.

<sup>6</sup> European GNSS Agency

Oceaneering et Veripos), il apparaît que deux fournisseurs sur trois ne sont pas encore prêts à proposer de telles offres. Le HAS n'étant pas encore disponible, ils n'ont, à l'heure actuelle, prévu aucune modification de leur « *business model* » et ne pensent pas que ce service aura un impact significatif sur l'utilisation du GNSS dans le monde de « *l'Oil & Gas* ». Pour l'instant, il est donc encore difficile d'estimer les économies que pourrait représenter un package mixte sur le prix du positionnement GNSS mais elles n'excéderaient pas 50% du tarif journalier actuel. Si de telles solutions venaient à exister, elles seraient parfaitement adaptées aux RIG sur lesquels la redondance, l'indépendance et la continuité de service du GNSS sont aussi importants que la précision de positionnement.

### **Package 100% HAS**

La deuxième solution d'optimisation, qui à terme sera probablement mise en place sur les FPSO, est l'utilisation d'une solution GNSS avec des corrections PPP provenant uniquement du HAS. Cette solution nécessitera le renouvellement du matériel à bord. Les récepteurs et les antennes devront être compatibles avec la fréquence E6 de Galileo et posséder un « *firmware* » permettant de décrypter ses messages. Le lot récepteur et deux antennes compatibles avec le HAS ont actuellement un prix variant de 19 à 30k\$. Les corrections étant gratuites, on peut estimer une économie moyenne sur le coût du GNSS à bord de 80% la première année, et de 100% les années suivantes. En plus des économies directement liées au prix des corrections, de nouvelles applications qui permettront de réduire les coûts pourront être développées grâce à l'amélioration du positionnement GNSS. Par exemple, sur les FPSO, il est important de connaître en temps réel la tension exercée sur les lignes d'ancrage. Cette tâche est actuellement effectuée grâce à des capteurs posés directement sur les lignes. Ces capteurs doivent régulièrement être changés, ce qui nécessite la mobilisation d'un bateau et de plongeurs pour un coût avoisinant 500k\$ par opération. Des solutions existent pour connaître la tension dans les lignes d'ancre grâce aux changements de position et à des algorithmes d'intelligence artificielle. Améliorer le positionnement des FPSO permettrait de s'affranchir de ces capteurs coûteux à l'entretien, et donc d'économiser le coût lié à leur remplacement et/ou leur maintenance.

D'autre part, les fournisseurs de matériel annoncent actuellement des précisions de positionnement en mode naturel (observations bi-fréquence L1/L2), avec les récepteurs compatibles E6 de l'ordre de 1.2 m ( $1\sigma$ ). Avec le nombre croissant de satellites GNSS disponibles, l'apparition de nouveaux signaux plus performants et l'amélioration des récepteurs, on espère d'ici quelques années pouvoir atteindre un positionnement ponctuel à 1m ( $2\sigma$ ). Cela permettrait d'envisager l'utilisation d'un package 100% HAS sur les FSV également.

## **5. Conclusions et perspectives**

Ce projet a permis de réaliser un état de l'art et d'avancement complet des constellations et des méthodes de positionnement GNSS ainsi que des services d'augmentation gratuits. Cet état de l'art a confirmé, qu'à l'heure actuelle, le PPP reste le meilleur moyen de se positionner en mer avec la précision requise pour les opérations d'exploration et de production pétrolière. Certains organismes mettent gratuitement à disposition des corrections PPP qui proposent des performances suffisantes pour que la question de leur utilisation soit étudiée par les industriels.

La collecte et l'étude des données, sur le coût et l'utilisation du GNSS dans différentes filiales et sur différents supports, a permis de révéler des dépenses superflues. Sont aussi apparus des problèmes dans le positionnement de certains navires, et ce malgré l'utilisation de matériel et de corrections dont le coût peut atteindre presque 200k\$ par an et par bateau.

L'étude montre que le futur service d'augmentation PPP de Galileo (HAS) pourrait permettre de réaliser des économies non négligeables sur le positionnement GNSS offshore des supports navals de Total.

Facilement intégrables sur les plateformes de production fixes, et permettant de réduire le coût du positionnement mais aussi d'éviter des dépenses par le développement de nouvelles applications, le HAS sera très probablement intégré sur les FPSO. Pour les autres supports visés dans cette étude, le service offert par Galileo pourrait permettre de diminuer les dépenses mais l'arrêt définitif des corrections commerciales semble, à l'heure actuelle, difficilement envisageable. Lorsque le service sera disponible et totalement opérationnel, il sera nécessaire de le tester afin de vérifier qu'il répond bien aux besoins en termes de précision et de disponibilité du service, afin d'éventuellement étendre son utilisation à d'autres supports navals.

PFE présenté par : **Hugo SALGUES**

Société d'accueil : VALORIS Expert

Directeur de PFE : M. Etienne SAINT-AUBIN

Professeur encadrant : M. Mathieu KOEHL



### 1. Contexte et objectifs de l'étude

La conjoncture actuelle voit la population mondiale augmenter grandement depuis de nombreuses années. De ce fait, l'aménagement du territoire devient un défi très important. Il doit être fait de manière sensée et réfléchie étant donné que la place sur Terre est de plus en plus rare. Également, le contexte de réchauffement climatique fait que l'aménagement se doit obligatoirement d'être couplé à une prise en compte de l'environnement pour notamment diminuer voire cesser l'imperméabilisation des sols. Ceci crée alors des contraintes importantes mais néanmoins nécessaires.

Depuis quelques années, de nombreuses lois ont vu le jour afin d'augmenter la prise en compte de l'environnement dans l'aménagement du territoire. Le Géomètre-Expert, acteur majeur de l'aménagement du territoire en France, du fait de sa dualité de compétences techniques et juridiques lui offrant une vision transversale de l'aménagement et lui conférant la légitimité de mandataire d'équipes pluridisciplinaires a donc été directement impacté par ces nouvelles lois et s'est vu conférer de nouvelles missions dont il n'avait pas pour habitude la réalisation. Certaines de ces missions, relatives au volet environnemental sont difficilement compatibles avec les compétences du Géomètre-Expert. Ce dernier n'est alors pas en mesure de les réaliser directement lui-même.

Il est alors intéressant d'évaluer l'impact de la modification des nouvelles réglementations visant à prendre en compte l'environnement dans le domaine de l'aménagement du territoire sur la profession du Géomètre-Expert ainsi qu'identifier les réactions possibles du Géomètre-Expert face à cela et voir comment celui-ci peut tirer profit de ces changements législatifs.

Le cabinet VALORIS Expert dans lequel j'ai effectué mon PFE a choisi de rebondir à la suite de ces nouvelles lois en engageant des profils compétents permettant la création d'un « service environnement » au sein de son cabinet.

L'objectif de ce PFE est alors d'encadrer la mise en place de ce « service environnement » dans le cabinet VALORIS ainsi que comprendre les raisons de son élaboration. L'accompagnement de la création de ce service doit se faire en identifiant les profils adéquats requis, en contrôlant la rentabilité de ce modèle plutôt que d'autres types de services, en analysant les avantages et les inconvénients par synthèse d'avis reçus de professionnels et en contrôlant la pérennité et la cohérence de ce nouveau mode de fonctionnement. Mon travail permettra alors de mieux connaître l'ensemble de la réglementation au sujet de la prise en compte de l'environnement dans une opération d'aménagement, de mettre en place des outils d'analyse internes et de réfléchir à la structuration et à l'organisation du service environnement.

### 2. L'évolution des projets d'aménagement

Selon l'Article L.300-1 du Code de l'Urbanisme : « Les actions ou opérations d'aménagement ont pour objets de mettre en œuvre un projet urbain, une politique locale de l'habitat, d'organiser le maintien, l'extension ou l'accueil des activités économiques, de favoriser le développement des loisirs et du tourisme, de réaliser des équipements collectifs ou des locaux de recherche ou d'enseignement supérieur, de lutter contre l'insalubrité et l'habitat indigne ou dangereux, de permettre le renouvellement urbain, de sauvegarder ou de mettre en valeur le patrimoine bâti ou non bâti et les espaces naturels ».

**Mise en place d'un service environnement dans un cabinet de Géomètre-Expert**

Un projet d'aménagement est une opération complexe faisant intervenir des acteurs variés selon un phasage précis. Il peut être urbain : création de lotissements, aménagements publics, opérations hydrauliques et d'assainissement ou rural : Aménagement Foncier Agricole, Forestier et Environnemental (AFAFE) visant notamment à améliorer les conditions d'exploitation des propriétés rurales agricoles ou forestières, assurer la mise en valeur des espaces naturels ruraux et contribuer à l'aménagement du territoire communal ou intercommunal défini dans les documents d'urbanisme.

La loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature a, la première, imposé dans le cadre des procédures d'autorisation préalable à la réalisation de certains travaux ou ouvrages la réalisation d'une étude d'impact. Ces obligations ont ensuite été reprises au niveau du droit européen.

Depuis quelques années, étant donné les contextes présentés précédemment, la prise en compte de l'environnement sur les projets d'aménagement a fait apparaître de nouvelles réglementations obligeant les porteurs de projets à réaliser de nouvelles missions à propos de sujets divers et précis :

Mission environnementale	Consistance de la mission
<b>Evaluation Environnementale</b> (Etude d'impact) Evolution Systématique Examen au Cas par Cas	L'évaluation environnementale est un processus visant à intégrer l'environnement dans l'élaboration d'un projet et ce dès les phases amont de réflexions. Elle sert à éclairer à la fois le porteur de projet et l'administration sur les suites à donner au projet au regard des enjeux environnementaux. L'évaluation environnementale peut être sous la forme d'un examen au cas par cas ou de manière systématique selon les projets. La liste des catégories de projets, plans et programmes, qui doivent faire l'objet d'une « évaluation environnementale » systématique, ou après « examen au cas par cas » sont l'objet respectivement, du tableau annexé à l'article R.122-2 et de l'article R.122-17 du code de l'environnement.
<b>Compensation Agricole</b>	L'article 28 de la loi du 13 octobre 2014 d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt introduit à l'article L.112-1-3 du code rural et de la pêche maritime l'obligation de produire une étude préalable sur un projet d'aménagement susceptible d'avoir des conséquences négatives importantes sur l'économie agricole. Au-delà d'un certain seuil, le projet est soumis à Compensation Agricole, à l'agré de mettre en place des mesures pour compenser les impacts qui n'ont pas pu être évités. Ces mesures doivent permettre à l'activité agricole de retrouver le potentiel de production perdu.
<b>Etudes hydrauliques</b>	Les études hydrauliques représentent la partie « maître d'œuvre » qu'un Géomètre-Expert est susceptible de réaliser lors d'un projet d'aménagement. Les études hydrauliques ont plusieurs buts dont le montage d'un dossier de Déclaration ou Autorisation : « Loi sur l'Eau » (article R.214-1 du code de l'environnement) traitant la gestion des eaux sur le projet à différents niveaux : prélèvement, rejets, impacts sur le milieu aquatique/marin, calcul d'ouvrages pluviaux et d'assainissement eaux usées, calcul pour risques d'inondations, élaboration de fiches « OTR », aide instruction PC/PA avec communes sur le volet « eaux pluviales » et « diagnostic hydrologique communal » ; études des causes et de la gestion des inondations à l'échelle d'un quartier.
<b>Zones Humides</b>	Selon les articles L.311-3 et R.211-108 du code de l'environnement, les zones humides sont des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, où croît la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hydrophiles pendant au moins une partie de l'année ». Chaque projet en présence d'une ou plusieurs zones humides nécessite la réalisation d'un dossier préalable d'identification/délimitation de ces zones afin d'en vérifier la présence sur le projet. Si cela est le cas, un autre dossier est réalisé et est joint au dossier Loi sur l'Eau afin d'évaluer l'impact du projet sur les zones humides identifiées et les mesures mises en œuvre pour éviter, réduire ou bien compenser les effets du projet sur ces zones.
<b>Défrichement</b>	Selon l'article L.341-3 du code forestier, le défrichement est une opération volontaire ou à pour effet de retirer l'état boisé à un terrain et, en modifier l'usage en mettant fin à sa destination forestière. Les articles L.342-1 et L.342-3 du code forestier remplissent l'autorisation certains défrichements selon différents critères qu'il précises. Le porteur du projet peut alors élaborer un dossier de demande d'autorisation de défrichement à la Préfecture.
<b>Espaces protégés</b>	L'article L.411-1 du code de l'environnement fixe les principes de protection des espèces et prévoit notamment l'établissement de listes d'espèces protégées. Le porteur de projet doit déterminer si des espèces protégées sont présentes sur ou à proximité de l'emprise du projet et déterminer si son projet portera atteinte à ces espèces protégées. Le cas échéant, des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation sont à prévoir et un dossier de demande de dérogation au titre de la destruction d'espèces protégées est à élaborer.
<b>Information/Participation du public</b>	La participation du public en matière d'environnement est un principe ayant valeur constitutionnelle, puisqu'elle est fondée sur l'article 7 de la Charte de l'environnement, consacrée par la loi constitutionnelle du 1 <sup>er</sup> mars 2005. Ce principe a une importance toute particulière dans le cadre de projets d'aménagement puisque ceux-ci peuvent affecter l'environnement sur la zone du projet et ses alentours ainsi que les conditions de vie des habitants sur les territoires concernés. La loi du 7 <sup>er</sup> décembre 2012 relative à la mise en œuvre du principe de participation du public défini à l'article 7 de la Charte de l'environnement prévoit de nombreux outils destinés afin de garantir l'information et la participation du public.

Figure 1 : Liste des missions environnementales nouvellement liées aux projets d'aménagement

De plus, chacune des missions présentées ci-dessus se doit de respecter la séquence ERC. La séquence « éviter, réduire, compenser » a pour objectif d'éviter les atteintes à l'environnement, de réduire celles qui n'ont pu être suffisamment évitées et, si possible, de compenser les effets notables qui n'ont pu être ni évités, ni suffisamment réduits. Elle vise également à l'élaboration de méthodes de suivi et d'accompagnement de ces mesures. Elle intervient au cours de chaque constitution de dossier durant lesquelles des « mesures ERC » sont élaborées en réaction aux impacts du projet sur l'environnement afin que les autorités environnementales valident l'instruction de ces dossiers. Les missions précédentes sont à la charge du Maître d'Ouvrage. Le Géomètre-Expert pouvant avoir le rôle d'Assistant au Maître d'Ouvrage se trouve alors directement impacté par ces modifications et se doit alors de réaliser ces missions.

*Note* : Tous les projets d'aménagement ne sont pas soumis aux missions énoncées précédemment. En effet, les conditions d'application de celles-ci sont énoncées dans les articles les définissant (mentionnés dans le tableau).

### Mise en place d'un service environnement dans un cabinet de Géomètre-Expert

### 3. Impacts observés sur la profession de Géomètre-Expert et besoins créés

Toutes ces nouvelles réglementations ont eu un réel impact sur la profession du Géomètre-Expert. Chaque nouvelle mission environnementale génère des besoins nouveaux, variés et ciblés. Le Géomètre-Expert, pourtant acteur important de l'aménagement du territoire, n'est pas disposé directement à réaliser la plupart de ces travaux.

Les besoins identifiés pour chaque mission sont alors les suivants :

Mission environnementale	Besoin administratif créé (Profils nécessaires pour la réalisation de chaque mission)	Besoin économique créé (Salaires bruts en début de carrière)	Coût de la mission
Evaluation Environnementale <i>Etude d'Impact</i> <i>Examen au Cas par Cas</i>	Ingenieur Environnement	35 000 € annuel	3 000 à 12 000 € 1 500 à 2 000 €
	Ingenieur ecologiste	32 500 € annuel	
	Chargé d'études naturaliste	20 000 € annuel	
Compensation Agricole	Conseiller agricole	20 000 € annuel	5 000 à 9 000 €
Zones Humides	Ingenieur Environnement	35 000 € annuel	5 000 à 5 000 €
	Hydrologue/Géologue	35 000 € annuel	
Etudes hydrauliques	Hydrologue	35 000 € annuel	10 000 à 15 000 €
	Géologue	35 000 € annuel	
Défrichement	Ingenieur Environnement	35 000 € annuel	1 500 à 2 000 €
Espèces protégées	Chargé d'études environnement	27 500 € annuel	5 000 € environ
	Chargé d'études naturaliste	20 000 € annuel	

Figure 2 : Besoins créés par les nouvelles missions environnementales

Ces besoins sont alors conséquents et nécessitent la formation d'une équipe complète et pluridisciplinaire. Cependant, le Géomètre-Expert est libre de choisir les missions dont il veut la réalisation. Ceci se fait alors tout d'abord selon ses envies car tout Géomètre-Expert ne désire pas forcément se spécialiser dans la partie environnementale. En plus, cela passe aussi par une analyse des avantages/inconvénients qui pourraient être créés et de la rentabilité au vu des salaires engagés et du prix des missions à la sous-traitance. Un grand nombre de possibilités s'offre donc au Géomètre-Expert.

### 4. Mise en place d'un service environnement

Pour répondre aux nouveaux besoins exposés précédemment, le Géomètre-Expert peut se placer dans une démarche homologue à la séquence ERC présentée précédemment. En effet, en restant dans la même lignée, il peut choisir d'éviter, de réduire ou de compenser les moyens et le temps mis à disposition sur chaque projet comportant des missions environnementales. En restant dans cette comparaison, on pourrait alors résumer les possibilités et lister les réactions comme ceci :

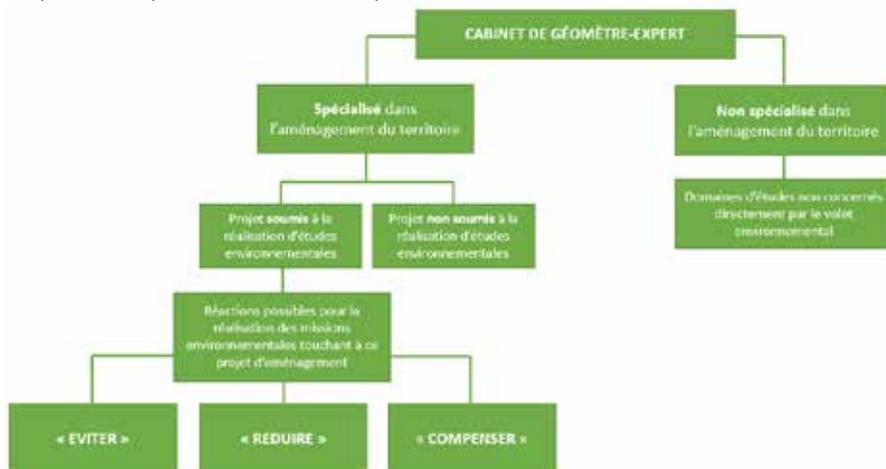


Figure 3 : Organigramme des possibilités de réaction d'un Géomètre-Expert relatives à un projet d'aménagement

#### Mise en place d'un service environnement dans un cabinet de Géomètre-Expert

- **EVITER** : Cette position vise à ne pas se placer sur les projets d'aménagement de territoire comprenant une dimension environnementale. Cependant, aujourd'hui, peu de projets d'aménagements sont exemptés de ce volet. Par exemple, chaque projet dont le bassin versant relatif possède une surface supérieure à 1 ha est soumis à un dossier de déclaration « Loi sur l'Eau », ce qui est très souvent le cas. Cela demande donc des profils compétents tels que des hydrologues/géologues dans le cabinet. Alors, bien souvent, les cabinets qui choisissent la position « Eviter » sont ceux qui ne souhaitent pas gérer le volet environnemental.
- **REDUIRE** : Cette position vise à réaliser toutes les missions relevant des compétences du Géomètre-Expert et de ses collaborateurs en interne et de sous-traiter tout ce qui n'est pas réalisable directement au sein du cabinet. Ceci est une solution mais elle ne permet pas de garder la main mise sur chacune des missions et alors il n'y a pas d'indépendance du Géomètre-Expert qui doit faire appel à des bureaux d'études externes.
- **COMPENSER** : Cette position vise au recrutement de nouveaux profils au sein du cabinet de Géomètre-Expert afin de réaliser la quasi-totalité voire la totalité des missions environnementales en interne compte tenu des compétences des profils engagés. Ceci permet alors au Géomètre-Expert d'avoir une vision totale du projet et de garder la main mise sur chacune des missions. Il est donc ici question de compenser le manque de compétences requises sur le volet environnemental par la création d'un « service environnement » au sein du cabinet.

Chaque Géomètre spécialisé dans l'aménagement du territoire possède le choix de se placer sur une de ces trois positions. Le cabinet VALORIS Expert, dans lequel j'ai effectué mon PFE, a tout d'abord choisi la méthode de réduction mais est aujourd'hui désormais de plus en plus dans une démarche de compensation avec la volonté de gérer le plus de choses possibles en interne. Le récent recrutement d'une ingénieure environnement au sein du cabinet en plus de profils spécialisés déjà présents a permis d'élargir le champ d'activités de VALORIS et de créer des avantages conséquents explicités dans mon mémoire.

## 5. Conclusions et perspectives

Le « service environnement » en est donc à sa genèse au sein du cabinet VALORIS Expert. Il est néanmoins possible d'en tirer des premières conclusions avec l'apparition de nets avantages. En effet, sur les premiers projets réalisés à l'aide de ce service, on remarque qu'il permet d'établir un lien direct entre la maîtrise d'ouvrage (le porteur du projet accompagné du Géomètre-Expert) et les contraintes environnementales. Les solutions mises en place pour limiter les incidences du projet sur son environnement sont alors pragmatiques et vont dans le sens des intéressés tout en respectant la réglementation. Bien que quelques parties soient encore sous-traitées, notamment les diagnostics naturalistes (étude de la faune et de la flore présentes sur la zone du projet demandant un grand nombre de spécialistes), le Géomètre-Expert peut avoir la main mise sur l'élaboration de dossiers d'études d'impacts. Le service environnement et les professionnels qu'il comporte permet d'établir un lien entre le Géomètre-Expert et les Bureaux d'Etudes Environnement très spécialisés. Ce lien est ensuite fait avec les aménageurs présents sur chaque projet afin de leur présenter en détails les enjeux et les impacts du projet sur son environnement. Il est alors possible pour chacun de bien comprendre les problèmes notifiés sur la zone et d'établir ainsi des solutions précises, viables et réfléchies. De plus, pour ce qui est de la rentabilité, ce service présente des avantages non négligeables. L'ensemble des résultats est présenté en détails dans mon mémoire.

Il est possible de pousser ce concept encore plus loin afin de réaliser l'ensemble des missions environnementales et ne plus avoir recours à la sous-traitance. Ceci est une perspective possible pour le cabinet VALORIS Expert et les géomètres. Ceci nécessite un « service environnement » complet et de nombreux profils très spécialisés. Ce n'est pour l'instant pas la volonté du cabinet et la rentabilité de ce modèle n'a pas été étudiée.

Au-delà de l'accompagnement de la mise en place de ce « service environnement » dans le cabinet VALORIS Expert, ce PFE a permis l'apprentissage de toute la réglementation en matière d'environnement sur les projets d'aménagement. Il m'a aussi aidé à la création d'outils d'analyses internes avec notamment : une base de données des projets d'aménagement réalisés par le cabinet et quelques projets dans les alentours, une grille d'analyse multicritères permettant de prendre en compte un grand nombre d'enjeux en amont des projets, l'élaboration de fiches ERC et l'aide à l'élaboration de la structure de différents dossiers relatifs aux missions environnementales vues précédemment.

***Mise en place d'un service environnement dans un cabinet de Géomètre-Expert***

# Étude et analyse des outils de modélisation semi-automatique et comparaison avec les outils classiques.



PFE présenté par : **Lucas Domange**  
Société d'accueil : **GEOSAT**  
Directeur de PFE : **Bertrand Chatin**  
Correctrice : **Hélène Macher**  
Encadrant : **Philippe Fabre**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de fin d'études porte sur l'analyse de la création de maquettes numériques à partir d'un nuage de points. Le BIM est un processus collaboratif qui va permettre aux acteurs d'un projet de construction de mieux communiquer ensemble à travers un support qui est la maquette numérique 3D. Cette maquette est dite intelligente car elle permet d'associer l'information au modèle 3D. C'est une véritable base de données qui va pouvoir être enrichie tout au long du cycle de vie du bâtiment, de la phase conception à la phase maintenance voir même jusqu'à sa démolition. La maquette numérique est une représentation géométrique d'un ensemble d'objets servant à modéliser tridimensionnellement un bâtiment entier. Celle-ci permet d'analyser, de contrôler et de simuler certains comportements du bâtiment.

GEOSAT est une société spécialisée dans le domaine de la modélisation tridimensionnelle ; elle souhaite trouver les meilleures méthodes pour répondre à son besoin qui est : la modélisation précise et efficace d'un bâtiment existant. La démocratisation des maquettes 3D s'explique à cause de l'évolution des scanners lasers terrestres et des outils de traitement. Ces nouvelles technologies permettent de répondre plus facilement à la demande de maquettes numériques. Cette modélisation se faisant, dans la majorité des cas, de manière manuelle, demande une part importante de temps. Cette étape est également très répétitive ; c'est pourquoi GEOSAT cherche aujourd'hui à l'automatiser. Des solutions permettant d'automatiser certaines étapes du passage du nuage de points à une maquette 3D commencent à être proposées par certains logiciels et plugins. Les constructeurs de scanners lasers, ayant compris le potentiel de ce marché, développent eux-mêmes des outils de modélisation semi-automatique. Cependant, on ne connaît pas exactement la précision qu'ils permettent d'atteindre ni le gain de temps qu'ils permettent d'obtenir. Ces informations sont cruciales afin de savoir si leur utilisation peut être bénéfique ou non à l'entreprise. Il sera donc légitime de se demander : quelle est la pertinence de l'utilisation des méthodes de modélisation semi-automatique ?

Afin de connaître la performance des différents logiciels, il sera question d'évaluer la précision qu'ils permettent d'obtenir lors de la création d'une maquette numérique. L'étude s'effectuera sur différents objets et matériaux. Cette étude permettra également d'appliquer la modélisation adéquate en fonction de la nature du chantier afin de répondre au mieux à la contrainte du client. Une étude financière sera également nécessaire afin de connaître quel logiciel permet d'allier une modélisation rapide et un faible coût. Il sera également nécessaire d'étudier l'interopérabilité, l'ergonomie (qui est associée au temps de prise en main du logiciel) et les capacités des différents logiciels et plugins.

Le but de ces recherches est d'obtenir des informations sur la création semi-automatique de maquettes 3D. Ainsi, Geosat pourrait, dans certaines situations, alléger le workflow du processus de modélisation et ainsi gagner en productivité. La suppression ou la diminution de ce travail permettrait au pôle 2D/3D de Geosat de gagner du temps et ainsi de pouvoir obtenir de nouveaux chantiers. Toutes ces avancées permettraient à l'entreprise de prospérer financièrement. De plus, les outils de modélisation semi-automatique permettent bien souvent d'effectuer une modélisation directement à partir d'une vue 3D (sans passer par le processus de création de coupes) ; cela nécessite donc moins de qualifications de la part du dessinateur.

## 2. Jeux de données permettant de mener à bien l'analyse des écarts.

Il s'agira d'étudier la précision que permettent d'obtenir différents logiciels de modélisation pour la représentation de murs, de réseaux et d'éléments structurels métalliques. Ces nuages servent de support afin de réaliser une maquette numérique de ces derniers. Cette maquette sera ensuite comparée au nuage de points de départ afin d'obtenir la précision de la modélisation effectuée. Les expériences seront menées sur des nuages de points comportant de nombreux murs, réseaux et éléments structurels avec différentes orientations et différentes épaisseurs. Les nuages de points utilisés sont issus de numérisations réalisées à l'aide d'un scanner laser FARO FOCUS X330. L'assemblage est réalisé à l'aide du logiciel Scene et la segmentation est effectuée à l'aide du logiciel Recap pro. Ces nuages de points sont présentés à travers la figure 1.

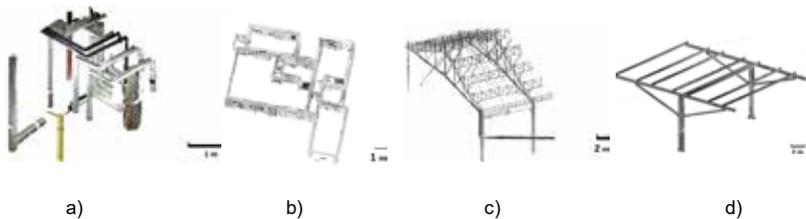


Figure 1 : Nuages de points servant à l'étude de précision des logiciels de modélisation.

Tous ces nuages seront échantillonnés afin de garder un point tous les 5mm. Cela permettra d'alléger le poids du nuage de points de départ ; ainsi, il pourra être plus aisément inséré dans le logiciel Revit, pour ensuite pouvoir réaliser une maquette 3D. De plus, un point tous les 5mm permettra de garder un niveau de détail assez satisfaisant pour l'étude à effectuer. Seul le nuage de points d) de la figure 1 ne sera pas segmenté afin de pouvoir savoir si le nombre de points présents sur la structure engendre une meilleure précision pour les logiciels de modélisation semi-automatique.

Une fois ces nuages de points intégrés et géoréférencés dans le logiciel Revit, la réalisation de maquettes numériques sera possible. La figure 2 montre un échantillon des maquettes numériques réalisées. Chacun des nuages de points sera modélisé premièrement de manière manuelle, ensuite à l'aide des plugins As-built et Cloudworx qui permettent une modélisation semi-automatique et enfin à l'aide du logiciel EdgeWise qui permet une modélisation automatique.



Figure 2 : Exemple de maquettes produites.

### 3. Analyse des écarts.

Une fois les différentes maquettes réalisées et exportées au format .stl, qui permet de conserver les formes et le géoréférencement, nous avons réalisé une analyse des écarts entre le nuage de points et nos maquettes. Cela a été réalisé à l'aide du logiciel Cloudcompare. Notre maquette ayant été géoréférencée directement sur le logiciel Revit, il suffira de l'insérer ainsi que notre nuage de points (au format e.57). La figure 3 présente cette étude de précision pour une modélisation manuelle de réseaux.

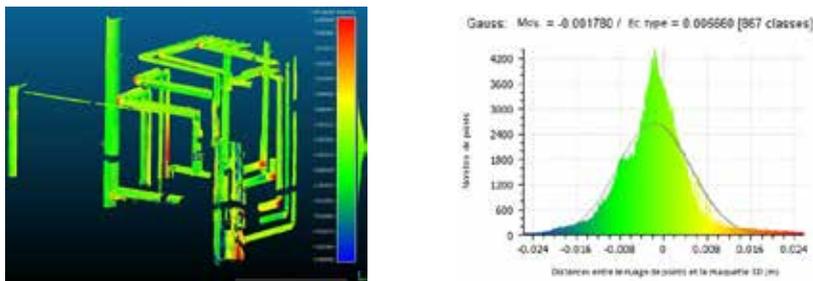


Figure 3 : Étude de la qualité d'une modélisation manuelle de réseaux.

Logiciels	Indicateurs de la qualité de la modélisation	Réseaux	Murs	Structure acier
<b>Modélisation manuelle</b>				
Revit	Ecart-type	0.007 m	0.030 m	0.044 m
	Moyenne des écarts	0.002 m	0.006 m	0.011 m
	Ecart maximum	0.039 m	0.155 m	0.340 m
<b>Modélisation semi-automatique</b>				
Leica CloudWorx	Ecart-type	0.006 m	0.025 m	X
	Moyenne des écarts	0.001 m	0.004 m	X
	Ecart maximum	0.055 m	0.110 m	X
As-built	Ecart-type	0.006 m	0.029 m	0.070 m
	Moyenne des écarts	0.001 m	0.008 m	0.028 m
	Ecart maximum	0.039 m	0.155 m	0.352 m
<b>Modélisation automatique</b>				
ClearEdge3D (EdgeWise)	Ecart-type	A définir	A définir	X
	Moyenne des écarts	A définir	A définir	X
	Ecart maximum	A définir	A définir	X

Tableau 1 : Indicateurs de la qualité de la modélisation en fonction des logiciels utilisés.

Le tableau 1 répertorie les résultats obtenus pour chacune des comparaisons effectuées. Cette étude nous montre que la qualité de la modélisation, qu'elle soit réalisée à l'aide de méthodes manuelle ou semi-automatique, diffère peu. On rappelle que la valeur définissant la précision est l'écart-type. Pour la modélisation de réseaux, on obtiendra une modélisation plus précise d'un millimètre en utilisant les méthodes semi-automatiques. Les méthodes de modélisation semi-automatiques sont plus précises de l'ordre de 5 millimètres pour la modélisation de murs avec Cloudworx et d'un millimètre avec As-built. Pour ce qui est de la modélisation d'éléments de structure métallique, la modélisation manuelle est plus précise de 2.6 centimètres. Si le nuage de points n'est pas assez dense, il est possible que les logiciels semi-automatiques ne détectent pas les éléments à modéliser.

Ainsi, on peut en déduire que la précision de modélisation est sensiblement égale selon les méthodes utilisées. Le choix de la méthode de modélisation se fera donc en fonction d'autres paramètres tels que le gain de temps, l'interopérabilité et le prix. C'est ce qui sera étudié dans les parties suivantes.

## 4. Étude de marché.

Pour réaliser cette étude de marché, il faut déterminer le temps passé pour effectuer les différentes modélisations. Le coût de ces logiciels sera également pris en compte. Nous allons arbitrairement fixer, pour une modélisation manuelle, un bénéfice de 20 euros par heure. Ainsi, il sera possible de tracer différentes droites représentant le gain qu'il est possible d'obtenir en fonction du temps passé pour chaque logiciel. Pour ce faire, on utilisera l'équation d'une droite de la forme :  $y = ax + b$  où  $a$  correspond au gain horaire et  $b$  au coût du logiciel. Cette étude sera menée pour la modélisation de réseaux (c'est ce que présente la figure 4), de murs, et de structures métalliques. Pour obtenir ses propres résultats, chacun pourra simplement modifier le gain horaire qu'il souhaite obtenir.

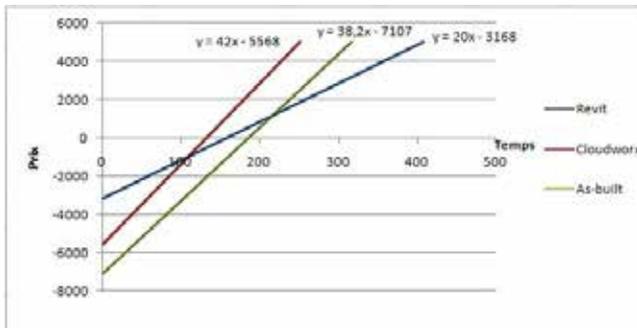


Figure 4 : Etude de marché pour la modélisation de réseaux.

Ainsi, avec ce gain horaire, il sera plus avantageux de modéliser des réseaux de manière semi-automatique au bout de 109 heures de modélisation avec Cloudworx et au bout de 216 heures avec As-built. Le plugin As-built est plus coûteux et ne permet pas un gain de temps supérieur à Cloudworx ; ainsi, le plugin Cloudworx sera plus avantageux d'un point de vue financier pour la modélisation de réseaux.

Pour la modélisation d'une maquette constituée principalement de murs, on passera le même temps en réalisant la modélisation manuellement ou avec Cloudworx. Il sera plus avantageux d'utiliser As-built que Cloudworx au bout de 462 heures de modélisation, et qu'une modélisation manuelle au bout de 1183 heures.

Pour la modélisation d'une maquette constituée principalement d'une structure métallique on ne prendra pas en compte la modélisation effectuée à l'aide de Cloudworx car cela demande un nuage de points trop parfait. Il sera plus avantageux d'utiliser As-built que d'utiliser une méthode classique de modélisation au bout de 1576 heures.

## 5. Conclusion et perspectives.

Cette étude nous permet d'affirmer que les méthodes de modélisation semi-automatiques peuvent être utiles mais ont toujours une grande marge de progression possible. On peut remarquer que la précision obtenue en les utilisant ne permet pas d'obtenir une plus grande précision que la modélisation manuelle pour des éléments structurels et que le gain de temps est très faible. Pour ce qui est de la modélisation de murs, on obtiendra des résultats légèrement plus précis mais là encore le gain de temps est négligeable. En outre, bien qu'ils permettent d'obtenir la même précision pour des scènes représentant des réseaux, leur utilisation permet un gain de temps élevé. Leur utilisation la plus avantageuse est donc pour la modélisation de réseaux.

La précision et le gain de temps sont directement liés à la qualité du nuage de points pour l'utilisation des méthodes semi-automatiques. Si le nuage de points est trop peu dense ou trop bruité, il est possible que ces méthodes soient inutilisables. Le test avec un nuage plus dense a été effectué pour la modélisation d'éléments structurels et une précision supérieure a pu être atteinte.

Ces méthodes sont très prometteuses et en constant développement ; ainsi, il serait nécessaire d'effectuer régulièrement des études sur ces dernières. Il est aujourd'hui possible d'acquérir un nuage de points tout en étant mobile, ce qui permet d'obtenir des données à l'échelle urbaine. Il serait ainsi intéressant d'étudier les méthodes d'automatisation non plus seulement à l'échelle d'un bâtiment mais d'une ville entière pour l'élaboration d'une maquette CIM.

# Détection et vectorisation automatique d'objets linéaires dans des nuages de points de voirie



*PFE présenté par :* **Étienne BARÇON**  
*Société d'accueil :* **TT Géomètres-Experts (Paris)**  
*Directeur de PFE :* **Guillaume BERSON**  
*Correctrice :* **Hélène MACHER**



## 1. Contexte et objectif de l'étude

Les techniques de cartographie mobile ont connu et connaissent un pic de popularité. Les instruments sont le plus souvent constitués d'un ou de plusieurs capteurs LIDAR et d'un dispositif effectuant des photographies. Une centrale inertielle et un récepteur GNSS combinés acquièrent les données nécessaires au géoréférencement des données. La précision et la qualité de tels relevés permettent d'obtenir des nuages de points constituant le "matériau de base", utilisé dans différents traitements ultérieurs et donnant lieu à des livrables distincts. Si ces techniques d'acquisition sont très rapides et permettent d'acquérir des quantités de données considérables en très peu de temps, les outils logiciels pour les traiter et notamment effectuer de la vectorisation automatique sont quant à eux peu nombreux. Par conséquent, une part importante de l'interprétation et de la modélisation des éléments présents dans un nuage de points est encore réalisée de manière manuelle.

Cette étude s'intéresse plus spécifiquement à la vectorisation automatique d'objets particuliers dans des nuages de points de voirie. La technique d'acquisition utilisant un dispositif LIDAR embarqué est souvent privilégiée dans un contexte routier pour sa rapidité et sa sécurité. En effet, un levé topographique conventionnel sur des voies rapides ou dans un environnement urbain présente des risques importants d'accidents et peut même être inenvisageable. Si la phase d'acquisition est automatisée et rapide, les traitements ultérieurs sont longs et fastidieux car les données acquises sont très importantes et non guidées par le topographe.

Cette étude consiste à proposer des outils permettant de remplacer l'important temps humain nécessaire à l'interprétation et à la digitalisation de nuages de points par du temps machine. Un précédent projet de fin d'étude réalisé par Arthur PICARD s'est focalisé sur la détection automatique des objets ponctuels. Le présent travail s'intéresse plus spécifiquement aux objets dits linéaires, comme les marquages au sol et les glissières de sécurité dans un contexte autoroutier. Les outils développés doivent s'intégrer à la plateforme de gestion de nuages de points de l'entreprise et compléter les outils existants.

## 2. Une approche image

Compte tenu de l'état de l'art et des premiers essais réalisés, le choix s'est orienté vers le développement d'outils de détection automatique utilisant une approche image. En effet, les nuages de points de voirie ne présentent pas de complexité particulière et les relations de voisinage des différents objets ne nécessitent donc pas l'utilisation de structures plus complexes (voxels, graphes, ...). Une méthode image permet d'exploiter l'ensemble des informations disponibles (altitude, intensité, durée d'impulsion retour si disponible) tout en réduisant la complexité d'appréhension des données. La projection verticale des points permet de passer de données tridimensionnelles non structurées à des données en 2,5D dont les relations de voisinage sont parfaitement définies. De plus, le nombre d'outils disponibles est ainsi plus complet et éprouvé que pour une approche tridimensionnelle.

L'approche image nécessite tout d'abord quelques traitements sur le nuage de points. Pour des raisons calculatoires, la détection s'effectue par tronçon de 100 m. La première étape consiste donc à subdiviser le nuage de points en tronçons de cette longueur. Cette étape doit être effectuée par l'utilisateur car l'automatisation est jugée trop complexe compte tenu du nombre important de cas particuliers possibles. Un outil AutoCAD a été implémenté pour permettre de dessiner les contours

des images. Les zones doivent vérifier les contraintes suivantes : englober toute la largeur de la chaussée, être contiguës sans recouvrement et avoir une longueur d'environ 100 m. Différents outils proposés par l'application Covadis permettent de faciliter le dessin.

Les contours exportés sont ensuite utilisés afin d'effectuer des requêtes spatiales dans la base de données PostGIS dans laquelle le nuage de points a été importé et indexé spatialement. Chaque portion du nuage de points obtenue est tout d'abord segmentée à l'aide de l'algorithme CSF (*Cloth Simulation Filter*) proposée par (Zhang *et al.*, 2016). En résulte un premier sous ensemble contenant les points du sol et de la route. Ces points sont utilisés afin de créer une image d'intensité permettant la détection des marquages. Le second sous-ensemble, contenant les objets présents à une hauteur maximale d'1,5 mètres au-dessus du sol, sont utilisés afin de créer une image d'altitude permettant la détection des autres objets (murs, glissières, bordures de trottoir). Les traitements distincts effectués sur les deux différentes images sont présentés rapidement dans les deux parties suivantes. Pour des raisons de confort et d'efficacité calculatoire, l'axe de la route est toujours sensiblement horizontal sur l'image quelque soit la réalité sur le terrain.

### # 3. Détection des marquages

Comme introduit dans la partie précédente, les points de la chaussée sont convertis en une image d'intensité et d'altitude par une projection verticale. La taille du pixel au sol a été choisie à 2 cm. La détection des marquages est basée sur la différence d'intensité retour entre les marquages et le bitume. L'ensemble de la chaîne de traitement proposé repose donc sur l'étape de seuillage de l'image. La méthode choisie est celle présentée par (Bradley and Roth, 2007). Cette méthode de seuillage adaptatif simple et optimisée d'un point de vue calculatoire, est robuste aux changements de couleurs du bitume comme des marquages. Elle permet également de gérer la diminution de l'intensité retour du faisceau avec l'augmentation de la distance scanner-objet. L'image binaire obtenue subit ensuite différents traitements permettant d'améliorer les contours et de lutter contre la sur-segmentation, traitements inspirés de (Guo, Tsai and Han, 2015; Jung *et al.*, 2019).



**Figure 1** : Visualisation de la vectorisation sur fond d'image d'intensité

Les marquages détectés sous forme de composantes connexes (ensemble de pixels positifs contigus) sont ensuite vectorisés. Les marquages de faible longueur sont ajustés par la méthode des Moindres Carrés avec une équation de droite. Les objets de longueur importante, supérieure à 10 m, sont ajustés, de la même manière, mais avec un polynôme du second degré permettant de gérer la courbure éventuellement observée. Une fois le marquage vectorisé en planimétrie, l'altitude est obtenue à partir du canal de l'image dédié à l'altitude.

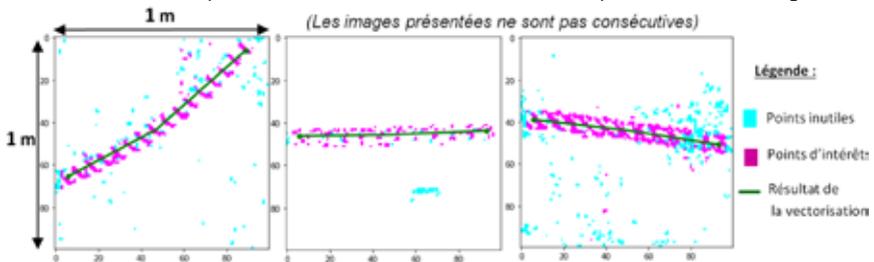
Dans une dernière étape, les marquages individuels sont assemblés de manière à obtenir les lignes définissant les voies de circulation. L'assemblage s'effectue selon des critères géométriques (position relative, distance, différence d'orientation, angle de changement de direction...).

### 4. Détection des glissières

Comme introduit dans la partie 2, les points présents à moins d'1,5 m au-dessus du sol sont projetés verticalement sur une image d'altitude. Plus précisément, chaque pixel de taille 1 cm x 1 cm, contient l'altitude maximale et minimale des points présents dans la surface terrain correspondante dans deux canaux distincts. Une taille de pixel, plus faible que pour les marquages, est nécessaire pour une détection convenable des arrêtes des objets (évite le phénomène de lissage). La première

étape consiste à détecter les objets ayant une forte amplitude verticale, caractérisant les objets recherchés. Pour chaque pixel, on soustrait l'altitude maximale et minimale que l'on seuille afin d'obtenir une image binaire. Différents outils de traitement d'images, notamment de morphologie mathématique, sont ensuite mis en œuvre afin d'extraire des amorces de lignes, voire des lignes partiellement complètes, correspondant aux objets recherchés. Les composantes connexes identifiées comme des lignes sont vectorisées.

Dans un second temps, un algorithme dit de « poursuite d'objets linéaires », comparable à un algorithme de croissance de région adapté aux objets de l'étude, permet de poursuivre la détection à partir des germes obtenus à l'issue de la première étape. De proche en proche, l'algorithme identifie puis vectorise les éléments identifiés comme le prolongement de la ligne courante. L'algorithme avance itérativement par blocs d'un mètre carré, comme présenté sur la **figure 2**.



**Figure 2 :** Illustration de la poursuite vectorisation séquentielle d'une glissière métallique.

Dans une dernière partie, un profil moyen de l'objet est calculé et permet de déterminer sa nature. En fonction de celle-ci, des traitements spécifiques sont employés pour positionner plus finement les objets. Par exemple, pour une Glissière en Béton Armé (GBA), des profils sont régulièrement effectués et permettent de rechercher l'angle supérieur de la glissière par exemple. D'autres objets comme les murs, grillages et bordures de trottoirs sont également détectés mais n'ont pas été pleinement exploités pour l'instant par manque de temps.

## 5. Assemblage et export

Les éléments linéaires extraits dans les différents tronçons de 100m sont ensuite assemblés dans une étape précédant celle de l'export. Les critères d'assemblage sont liés à la nature des objets et à des conditions géométriques : orientation, distance, angle d'enchaînement, position relative... Les éléments assemblés et vectorisés sont ensuite exportés sous forme de polygones dans un fichier DXF permettant un import facile dans différents logiciels pour poursuivre le dessin.

## 6. Résultats partiels de l'étude

Les valeurs de précision et de rappel présentées dans le tableau en page suivante sont calculées par rapport à la longueur des différents objets vectorisés. Les données de référence ont été digitalisées manuellement par un dessinateur selon la procédure habituelle de l'entreprise. Les résultats sont encourageants cependant, un certain nombre de cas problématiques a été identifié.



**Figure 3 :** visualisation du résultat de la vectorisation d'une glissière métallique, on remarque que l'altitude est parfois mal estimée (flèche rouge).

L'évaluation de la détection des glissières n'a pas encore été effectuée.

	Temps en minutes					Précision de la vectorisation %**	
	Prétraitements	Extraction marquages	Assemblage marquages	Rappel %	Précision %	3 cm	5 cm
Tunnel 1 km 2 voies sens unique	12,5*	1,6	0,8	93	90	76	91
Autoroute 1 km 2 x 3 voies	24,5*	8,3	1	86	78	60	70

\*Exécution des processus en parallèle pour accélérer les calculs (multi-processing)

\*\*Pourcentage (en longueur) des marquages vectorisés entrant dans la tolérance indiquée.

**Tableau 1** : Résultats (partiels et non définitifs) de l'algorithme de détection des marquages

## 7. Conclusion

La chaîne de traitements implémentée permet d'obtenir un premier résultat de vectorisation automatique intéressant et prometteur. Une généralisation à d'autres objets est possible. Le rappel et la précision sont perfectibles tout comme le temps de calcul. Cependant, la totalité des cas de figure ne peut être anticipée par le programme. La principale difficulté réside dans le choix de méthodes et de paramètres les plus généraux et robustes possibles. En l'état actuel, l'outil développé produit une version initiale du dessin devant faire l'objet d'un contrôle et de compléments par l'utilisateur. Le gain de temps lié à l'utilisation de cet outil reste à évaluer avec précision.



**Figure 4** : Visualisation de résultats dans CloudCompare, les marquages sont en jaune, les GBA et glissières métalliques en rouge, certains véhicules ont été inutilement vectorisés.

## 8. Bibliographie

- Bradley, D. and Roth, G. (2007) 'Adaptive Thresholding using the Integral Image', *Journal of Graphics Tools*, 12(2), pp. 13–21. doi: 10.1080/2151237x.2007.10129236.
- Guo, J., Tsai, M. J. and Han, J. Y. (2015) 'Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar', *Automation in Construction*, 58, pp. 165–175. doi: 10.1016/j.autcon.2015.07.017.
- Jung, J. et al. (2019) 'Efficient and robust lane marking extraction from mobile lidar point clouds', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Elsevier, 147(November 2018), pp. 1–18. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.012.
- Zhang, W. et al. (2016) 'An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation', *Remote Sensing*, 8(6), p. 501. doi: 10.3390/rs8060501.

# Système de photogrammétrie embarqué sur véhicule : développement et amélioration du système existant, définition des conditions d'utilisation et de mise en œuvre au regard de cahiers des charges types de relevés

PFE présenté par : **Valentin THOMINE**  
Société d'accueil : **Cabinet GREUZAT**  
Directeur de PFE : **Benoît GREUZAT**  
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**



## 1. Introduction et contexte de l'étude

Le Mobile Mapping est une nouvelle méthode d'acquisition qui a vu le jour dans les années 1980 et qui a connu de nombreuses améliorations. Il s'agit d'un instrument moderne qui a l'avantage d'être à la fois facile à mettre en place et rapide dans l'acquisition de données.

Suite à la demande d'un client pour le relevé d'une route départementale, le Cabinet Greuzat a eu l'idée de développer son propre système de Mobile Mapping, ou plus précisément de photogrammétrie embarqué sur véhicule. Une nacelle a été spécialement conçue pour fixer un appareil photo à quatre mètres au-dessus du sol et permettre la prise de photos nadirales. Seulement cette méthode a montré quelques faiblesses dans le sens où des problèmes d'alignement ont été constatés. L'acquisition et le traitement des données ont permis d'aboutir à la création d'un plan, mais avec des difficultés et un temps de réalisation bien plus long qu'une méthode classique. Des améliorations étaient donc envisageables pour fiabiliser le système.

C'est dans ce contexte que ce Projet de Fin d'Études a pris forme avec comme objectif l'amélioration du système de photogrammétrie embarqué. Parmi les principales pistes de recherches, on a :

- l'amélioration du système de déclenchement de l'appareil photo permettant une acquisition automatique de données à intervalle régulier, tout en ayant des images de qualité convenable
- la mise en place d'une antenne GNSS pour la réception des données satellites et le positionnement des emplacements des prises de vues.



Figure 1 : Photos d'un dispositif expérimental

## 2. Mise en place d'une zone d'étude

Pour ce projet, une zone d'étude a été mise en place à proximité du bureau de Varreddes. La zone se situe dans un environnement pavillonnaire, ce qui implique quelques masques comme des bâtiments ou des arbres. La situation géographique permet également de se mettre dans un scénario de prises de mesures pour du corps de rue ou du relevé d'assainissement. Des clous ont été implantés sur la voirie et relevés par tachéométrie pour permettre le géoréférencement des données. L'ensemble des points est connu en coordonnées dans le système Lambert 93.

## 3. Le système de cartographie

Le système de cartographie est composé d'un appareil photo Sony a7RII couplé à un objectif Zeiss Batis 2.8/18. Il s'agit d'un capteur grand format permettant la prise d'image manuelle, l'acquisition de vidéo en 4k, le contrôle à distance, etc.

### 3.1 Le déclenchement de l'appareil photo

L'étude a d'abord été centrée sur le déclenchement de l'appareil photo à distance. Cette manipulation peut se faire de manière manuelle ou automatique, mais l'automatisation du processus facilite le travail. Il existe des programmes time-lapse qui permettent de définir le nombre d'images que l'on souhaite et un intervalle de temps entre chaque prises de vues. Des recherches ont permis de déterminer des méthodes de contrôle à distance de l'appareil photo depuis un ordinateur et une télécommande.



Figure 2 : Photo de la caméra Sony a7RII avec l'objectif Zeiss Batis 2.8/18.

Des logiciels déjà programmés comme DigidigamControl, SmartShooter 4 ou encore Imaging Edge Desktop ont été testés mais les conclusions déduites sont similaires : l'intervalle de temps entre les images ne permet pas de descendre en dessous des 2 secondes avec une image de 36 millions de pixels. Les langages de programmation ont également été exploités avec des modules spécialement dédiés au contrôle des appareils photos depuis un port USB. C'est le cas du module *opencv* sur Python et de l'application *Image Acquisition Toolbox* sur Matlab. Néanmoins, ces pistes renvoient aux mêmes conclusions que les logiciels à savoir le non-respect de la contrainte d'intervalle. Cela nous a permis d'en arriver à la conclusion que le non-respect de la contrainte d'intervalle est dû au temps de transfert de l'image. En effet, le déclenchement est suivi d'un enregistrement de l'image dans un dossier spécifique sur l'ordinateur. La taille de l'image est un des facteurs important dans ce délai et les recherches faites à ce sujet n'ont pas permis l'enregistrement sur la carte SD. La conséquence directe est la diminution de la vitesse du véhicule aux alentours des 5 km/h, ce qui est contraignant puisque l'objectif à terme serait de pouvoir s'insérer dans un flux de circulation.

Pour contourner ce problème, l'idée de prendre une vidéo avec la caméra Sony a émergée. Par définition une vidéo est une succession d'images, on pourrait donc extraire les images pour la réalisation d'un nuage de points. Des programmes ont été mis au point sur Python et Matlab pour réaliser cette manipulation mais le souci concerne la qualité et la quantité de données. La qualité est bien en dessous des contraintes initiales et la quantité nécessite un tri important. Il y a donc un allongement du temps de traitement, ce qui est un inconvénient dans la mise en place de cette solution. D'ailleurs, un test a été réalisé pour créer un nuage de points mais celui-ci a montré des erreurs dans l'alignement.

La dernière solution imaginée se base sur les télécommandes de contrôle à distance. Depuis une connexion sans fil avec un boîtier relié à l'appareil photo, il est possible de programmer un relevé en mode time-lapse avec une vitesse d'acquisition d'une image par seconde et des données de bonne qualité (36 millions de pixels pour une qualité XFine). Les images sont directement sauvegardées sur la carte SD, ce qui permet de respecter l'intervalle de temps.

Des trois méthodes de déclenchement imaginées, la télécommande est la solution la plus intéressante, notamment pour sa facilité d'utilisation et de mise en place. C'est donc cette option qui a été choisie pour la suite de l'étude.

### 3.2 La mise en place de l'appareil photo sur le véhicule

Des tests ont été réalisés pour déterminer la meilleure position de l'appareil photo sur le véhicule. Il faut savoir que le traitement des données relatives au relevé de la route départementale a montré que l'appareil photo n'était pas stable. En effet, la nacelle oscillait et par moment l'arrière du véhicule se trouvait sur les images. Pour remédier à ce problème, il a été décidé de placer l'appareil photo sur un trépied, qui a été sanglé aux barres de toits de la voiture.

Afin d'éviter que la voiture ne se retrouve dans le champ de vision de l'appareil photo, celui-ci doit être incliné. Cela implique des images obliques qui dégradent la qualité du rendu final. Étant donné que la hauteur du trépied est ajustable, la meilleure option est donc de mettre l'appareil photo à un niveau intermédiaire. Dans ce cas précis, cela permet à la fois de limiter l'inclinaison de l'appareil photo par rapport au nadir et d'obtenir une taille de pixel au sol convenable. L'installation de l'appareil photo à une hauteur approximative de quatre mètres permet de répondre à ces critères et permet également d'obtenir une emprise au sol de l'image convenable.

### 3.3 Les écarts sur les CheckPoints

Une série de mesure a été réalisée avec la télécommande et les données obtenues ont été géoréférencées avec les clous matérialisés au préalable sur la voirie. Suffisamment de points étaient présents pour avoir des CheckPoints, et faire une analyse de la répartition des écarts.

Un géoréférencement avec 3 Ground Control Points (GCP) a permis de mettre en évidence la présence d'un systématisme. Comme on peut le voir sur la figure 3a, les écarts sont identiques que ce soit au niveau de l'orientation ou de la distance. L'origine de ce systématisme est attribuée à l'orientation des caméras puisqu'il n'y a eu qu'un seul passage sur la zone d'étude. Une série de mesure a été refaite dans les mêmes conditions, mais cette fois-ci en faisant un aller-retour. L'analyse des écarts a permis, comme on peut le constater sur la figure 3b, de réduire l'influence du systématisme et par la même occasion d'augmenter le recouvrement entre les images.



Figure 3 : Représentation de l'orientation des écarts sur les CheckPoints pour une acquisition simple (a) et en aller-retour (b).

## 4. Le système de positionnement

Le positionnement des données consiste en l'estimation des coordonnées des emplacements des prises de vues. Elle permet donc d'avoir une information supplémentaire et pourrait à terme éviter d'avoir à matérialiser des points au sol. L'entreprise dispose de plusieurs récepteurs GNSS permettant d'aboutir à une précision centimétrique. Une antenne Trimble R10 a donc été placée juste au-dessus de la caméra avec une structure, spécialement conçue pour le système. Pour ce qui est des mesures, une option permet de faire des observations en continu, tout en définissant un intervalle entre chaque enregistrement de données. Il s'agit du programme *Topo Continu*. Les données peuvent être observées jusqu'à une seconde d'intervalle, et ce même si l'antenne ne se trouve pas à la verticale. Un format d'export permet de récupérer l'ensemble des données et des métadonnées enregistrées dans l'étude (nom du point, coordonnées du point, heure d'acquisition, précision, etc.). L'heure d'acquisition étant également déterminée lors de la prise d'images, une synchronisation peut donc être opérée entre les deux jeux de données.

Néanmoins, la méthode détaillée permet d'obtenir des coordonnées de points toutes les secondes. De ce fait, les images sont géoréférencées à la seconde près, ce qui induit une approximation de l'emplacement. Sachant que l'objectif à terme serait de réduire l'intervalle de temps en dessous de la seconde, il paraît plus intéressant de faire le relevé d'une trace GNSS. Dans ce cas précis, les emplacements des images sont déterminés par interpolation. Avec l'antenne Trimble R10, il est possible de récupérer des données au format NMEA (National Marine Electronics Association). Depuis le Web User Interface, l'antenne peut être paramétrée de telle sorte à modifier les paramètres de sortie de l'ensemble des trames. Dans notre cas, celle qui nous intéresse est la trame GGA car elle fournit les coordonnées ainsi que l'heure d'acquisition.

Le système mis en place permet d'estimer les coordonnées des images. Cependant, l'antenne est en mouvement et elle n'est pas systématiquement à la verticale. De ce fait, des erreurs de positionnement sont constatées et la précision laisse à désirer. Il pourrait donc être intéressant d'ajouter un inclinomètre dans le but de corriger les erreurs. Toutefois, les coordonnées des images servent à avoir une information supplémentaire et à faciliter l'alignement sur les logiciels de traitement. A l'heure actuelle, la matérialisation de points au sol et l'observation avec une antenne GNSS reste la méthode la plus précise et la plus efficace. Cette précision va d'ailleurs dépendre de plusieurs facteurs comme : la vitesse du véhicule, la cadence d'acquisition d'images, le taux de recouvrement, la distance entre les GCP et les conditions sur le terrain.

## 5. Conclusion et perspectives

Finalement, les recherches et les différents tests ont permis de mettre au point un instrument pour l'acquisition de données et une méthode de relevé. La télécommande semble être la meilleure option pour le déclenchement à distance. La cadence d'acquisition est d'une image par seconde et le relevé de la zone se fait en aller-retour pour réduire les systématismes et augmenter le recouvrement.

Au niveau du géoréférencement, l'antenne GNSS permet d'estimer la position des caméras. Il s'agit d'une donnée approximative, qui sert d'information. L'acquisition d'une trace GNSS au format NMEA est possible avec une antenne Trimble R10 et permet un meilleur géoréférencement des données, qu'avec le programme *Topo Continu*. Toutefois, l'ajout de points matérialisés au sol est nécessaire pour obtenir une meilleure précision.

Il tient à rappeler que les conditions de terrains peuvent faire varier les résultats, et notamment les précisions. Par exemple un relevé en linéaire ne donnera pas les mêmes rendus que le relevé d'une route sinueuse, avec les mêmes paramètres au départ. La précision va donc dépendre de plusieurs facteurs qu'il faut ajuster en fonction de la situation.

Des perspectives sont envisageables que ce soit pour le système de cartographie ou de navigation. En effet, le système pourrait être amélioré notamment en insérant un deuxième appareil photo et une télécommande plus performante. Le positionnement des données peut également être affiné par l'ajout d'une seconde antenne GNSS et l'estimation de l'inclinaison du véhicule.

# Relevé par Lidar mobile de cours d'eau et intégration aux relevés bathymétriques par sondeur mono-faisceau.

PFE présenté par : **Guillaume DIDIER**

Société d'accueil : **AXIS-CONSEILS**

Directeur de PFE : **Benjamin Montigny**

Correcteur : **Mathieu Koehl**



## 1. Contexte de l'étude et objectifs

Les mesures bathymétriques font parties des prestations les plus contraignantes et difficiles à réaliser chez AXIS-CONSEILS. Elles nécessitent le plus souvent des moyens assez importants en termes de matériels, d'instruments et de personnels. De plus, elles se déroulent généralement dans des milieux humides, végétalisés et peu entretenus. Les mesures demandées par les clients peuvent concerner des zones larges, s'étendant sur plusieurs kilomètres jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres.

En parallèle de la bathymétrie, AXIS-CONSEILS a déjà été sollicité pour réaliser des mesures dans des environnements comprenant de la végétation (relevés de carrière, MNT sous forêt, etc.). Tout comme la bathymétrie, les mesures monopolisent des ressources sur de longues durées. Ces cas mettent en lumière deux problématiques : la gestion des ressources humaines/matérielles et le temps passé sur le terrain. Une technologie pourrait apporter un début de réponse : le Lidar topographique embarqué sur drone et ULM. Aujourd'hui, cette technologie est devenue suffisamment attractive et abordable pour que les Géomètres commencent à s'y intéresser. Deux points négatifs persistent : son prix encore élevé, bien plus cher que le scanner-laser terrestre, et les risques d'accident du drone/ULM encore importants. Mis à part ces éléments, le Lidar pourrait apporter une solution aux problèmes de gestion de ressources, aux masques engendrés par la végétation et permettrait de réduire la pénibilité des activités de terrain.

Dans le cadre du projet d'étude, les objectifs resteront concentrés sur l'utilisation du Lidar en bathymétrie. Le but de l'étude est de réaliser un lever de berges à l'aide d'un lidar embarqué sur un zodiac, d'étudier le résultat obtenu, de comparer avec les données issues d'un lever de berges classique et faire la synthèse des gains et pertes par rapport au processus classiquement mis en œuvre. Cette étude permettra de se faire une première idée des capacités d'un lidar pour une utilisation non conventionnelle.

## 2. Adaptation du lidar à un nouveau vecteur

> Le lidar retenu pour l'essai :

Aujourd'hui, les entreprises proposant des systèmes lidars embarqués sur drone/ULM sont assez nombreux pour pouvoir comparer les solutions proposées. L'instrument doit être en capacité de réaliser une acquisition multi-écho, de poids et taille modeste, le plus simple d'utilisation, capable de mesurer un maximum d'objets et vendu par une entreprise ou un intermédiaire situé de préférence en France. Sur la base de ces critères, c'est l'entreprise YELLOWSCAN qui est choisie et les instruments retenus sont le Vx-20 et le Surveyor (figure 1). Au regard du prix d'achat,



Vx-20	Surveyor
Précision : 1 cm	Précision : 4 cm
Exactitude : 2,5 cm	Exactitude : 5 cm
Taille : 43cm x 11cm x 17cm	Taille : 16cm x 10,5cm x 14cm
Poids : 3,1 kg (avec batterie)	Poids : 1,6 kg (avec batterie)

**Figure 1 : visuel des instruments choisis pour réaliser l'essai et quelques caractéristiques (Yellowscan@2020)**

c'est la solution de location du Vx-20 via l'entreprise POSITICS qui a été retenue. Au moment du choix, seul le Vx-20 était disponible en location. Avant de continuer, précisons que le Vx-20 n'est pas en capacité de recueillir des données sous l'eau.

#### > L'adaptation de l'instrument au zodiac :

Le lidar retenu pour l'étude a été étudié pour une utilisation aérienne via un drone porteur de type DJI M600 Pro. Notons que le Surveyor, en plus du drone, peut aussi s'utiliser sur un véhicule grâce à un support spécialement conçu pour cette utilisation. Le premier défi du projet consiste à créer un support de montage permettant de faire la liaison entre le zodiac et le Vx-20, tout en ne possédant qu'une maquette numérique de l'instrument. Ce support doit répondre aux exigences suivantes :

- Utiliser des matériaux « low-cost ».
- Réutiliser un maximum de matériaux stockés dans les locaux de l'entreprise.
- Limiter l'utilisation de compétences techniques particulières
- Doit accueillir le Vx-20 de la façon la plus naturelle possible, tout en assurant la sécurité et le fonctionnement optimal de l'instrument.
- Réaliser l'assemblage le plus simple possible. Le processus d'assemblage doit être le plus simple et naturel possible.

Trois versions du support ont vu le jour, la troisième version, étant une adaptation du second modèle s'adaptant à la pénurie de matériaux qui a pu être observée ces derniers mois.

### 3. Planification et mesures

Le lieu du test se situe dans la commune d'Olivet (45), sur le Loiret. Plusieurs éléments font de ce lieu une cible de choix car il possède plusieurs éléments intéressants : présence de végétation importante (arbres) et affleurante au cours d'eau, des berges aménagées et entretenues (sans végétation), deux ouvrages d'art, du bâti et deux îlots chargés en végétation, le tout s'étendant sur près de deux kilomètres. Deux éléments viennent confirmer ce choix : le courant est très faible et ce lieu a déjà fait l'objet d'un lever bathymétrique début 2020. La zone a été divisée en deux sites : Zone A et Zone B (**figure 2**). La planification des mesures sur ces deux zones se déroule en deux temps :

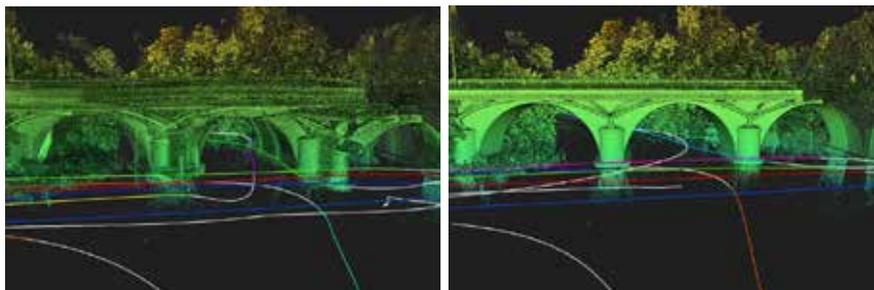


Figure 2 : aperçu des deux sites de mesures, au cœur de la commune d'Olivet

- L'état des lieux, par reconnaissance sur le terrain et témoignages du personnel ayant précédemment réalisé des mesures. Cette phase vise à déterminer les conditions d'utilisation du système {zodiac ; Vx-20} vis-à-vis de la végétation, la profondeur du cours d'eau et de l'influence des masques GNSS sur le GDOP.
- La mise en place du trajet à réaliser. Il doit être pensé de telle sorte à ce que les berges et ouvrages d'art soient scannés au moins deux fois. Trois paires de passages seront à réaliser : une paire proche de chaque berge et une paire au centre du Loiret. Si la largeur ne le permet pas, le nombre de paire sera réduit au minimum à une paire de passage effectuée au centre du cours d'eau.

Une fois les mesures terminées, les données de la trajectoire enregistrées par la centrale inertielle sont corrigées en post-traitement par la voie du logiciel Pospac, développé par Trimble pour traiter les trajectoires de drone et ULM. La correction nécessite les données brutes de la trajectoire et

le fichier RINEX des observations des antennes du RGP situées à 10 et 15 km du lieu de mesure. Ce post-traitement est essentiel car le nuage de points est reconstruit à l'aide de la trajectoire de l'instrument. Il faut impérativement minimiser les erreurs et corriger la trajectoire pour reconstruire un nuage réduisant le nombre et l'intensité des aberrations géométriques. Une comparaison entre le nuage de points sans post-traitement et celui avec post-traitement permet de saisir toute l'importance de cette étape (**figure 3**).



*Figure 3 : comparaison du nuage sans post-traitement (gauche) et avec post-traitement (droite). Nous observons un changement remarquable dans la qualité du nuage de points et de la trajectoire.*

#### 4. Résultats obtenus

Le résultat définitif est obtenu grâce au logiciel CloudStation de YELLOWSCAN (**figure 5**). Elle se déroule en deux étapes : reconstruction du nuage de points basée sur la trajectoire et ajustement des bandes de scan. Le scanner-laser du Vx-20 génère le nuage de points en dimension  $R^2$  (en l'occurrence selon un plan orthogonal à l'axe principal du lidar). Le nuage est reconstruit en dimension  $R^3$  grâce à la trajectoire corrigée. La reconstruction est réalisée grâce aux bandes d'acquisition sélectionnées par l'utilisateur (affichées en couleur). Chaque objet doit être scanné au moins deux fois pour moyenniser la position des scans. Le traitement des données est finalisé par l'ajustement des scans. Ce dernier processus a permis de réduire les erreurs d'ajustement des bandes, passant en moyenne de 3cm (zone A) et 4cm (zone B) à respectivement 2 cm et 3 cm. L'amélioration du nuage, à défaut de proposer une correction significative (relativement et absolument parlant), a le mérite d'affiner la qualité de représentation des ouvrages d'arts, des maisons et des berges.



*Figure 5 : extrait du nuage de points final (après traitements et corrections) sous CloudStation. Le visuel montre également la trajectoire du Vx-20 pendant toute la durée de fonctionnement (en blanc et en couleurs).*

Après cette dernière étape de traitement, nous pouvons commencer à analyser le rendu global pour tous les objets mesurés. Cette analyse se concentre sur deux points :

- La précision, l'exactitude et le niveau de détails du modèle numérique des ponts et du terrain naturel (par rapport au premier lever de berges).
- La capacité du lidar à obtenir des données du terrain naturel malgré la présence de végétation assez touffue en certains endroits.

En l'état actuel du projet (au 1<sup>er</sup> juillet 2020), les analyses de ces éléments n'ont fait que débiter et seules les premières impressions visuelles peuvent être partagées. A première vue, les nuages obtenus semblent se générer correctement et ne présentent pas d'anomalies aussi remarquables que les nuages générés sans post-traitement. Le dédoublement des objets est toujours présent mais son amplitude est similaire à celui du bruitage naturel des données. Cela se traduit par des surfaces possédant une épaisseur, ce qui ne devrait pas arriver car le concept mathématique de surface n'inclue pas la notion d'épaisseur. Cette épaisseur (mesurée sur les ouvrages d'art et quelques maisons) est estimée entre 3 cm et 7 cm. Concernant la pénétration de la végétation du faisceau, seuls quelques coupes ont été réalisées à ce stade. Les premiers résultats indiquent que la pénétration du faisceau dans un milieu chargé en végétation donne des résultats variables. Le niveau de détail du terrain naturel varie entre 2 cm et 1,50 m, ce qui reste tout à fait correct en termes de niveau de détails pour ce genre de travaux. Néanmoins, cette information a de quoi nous alerter : avec un niveau de détails à 1,50 m il est possible de commettre des erreurs de représentation trop importantes, des talus ou des fossés pourraient très bien exister, sans pour autant apparaître dans le plan de coupe. Les talus (et par extension la pente du terrain naturel) peuvent étre manquants à cause d'une végétation trop dense. Concernant les fossés, ils pourraient étre cachés par les talus adjacents. Ce dernier problème pourrait étre résolu à condition de réaliser une acquisition aérienne (et en espérant que la végétation ne constitue pas un obstacle). Tous ces éléments doivent encore étre infirmés ou confirmés (ou rester sans réponse) par une analyse plus approfondie du jeu de données. Cette analyse sera discutée plus en détails dans le mémoire de fin d'études et dans sa présentation.

## 5. Conclusions et perspectives

Les conclusions doivent encore attendre quelques semaines, le temps d'analyser les données. Le nuage de points devra ensuite étre comparé aux profils en travers réalisés de façon usuelle (utilisation d'une station totale avec prisme). Cette comparaison, couplée aux capacités d'analyse du lidar, devrait permettre d'aboutir à des conclusions sur une possible utilisation du lidar dans le cadre de la bathymétrie (éléments terrestres) et de les fusionner avec les données recueillies par sondeur mono-faisceau. Attention toutefois aux capacités du Vx-20 : il n'est pas en mesure d'obtenir des données sous l'eau, contrairement à certains lidars qui ont aujourd'hui cette capacité, ou aux traditionnels sondeurs mono-faisceau et multi-faisceaux. Si le lidar s'avère efficace, la prochaine étape consisterait à installer en simultanée un lidar avec un sondeur mono-faisceau ou multi-faisceau. Ainsi, les levers bathymétriques demanderont à l'avenir moins d'exigence physique, verront le temps de travail global réduit et monopoliseront moins les ressources humaines et matérielles de l'entreprise. Gardons à l'esprit que ce genre de système ne pourra pas étre utilisé pour toutes les prestations de bathymétrie (cela dépendra des conditions environnementales).

L'autre intérêt de cette étude est de déterminer s'il est envisageable de détourner l'utilisation d'un lidar embarqué sur drone pour d'autres applications utilisant d'autres modes de déplacement. Nous pourrions envisager une diversification des vecteurs : véhicule, quad, robot de terrain, etc. Etant donné le coût encore très élevé de cette technologie et les risques encourus sur un drone, AXIS-CONSEILS à tout intérêt à élargir les possibilités d'application d'une telle technologie afin de répondre à de nouveaux marchés tout en amortissant le coût d'utilisation de cet appareil. L'utilisation du Vx-20 (sur environ deux jours) s'est avérée assez coûteuse, même pour de la location. Son coût à l'achat reste très élevé (estimé à au moins le prix de deux scanners-lasers terrestres). Si la nécessité d'achat se fait sentir et que les résultats de l'étude sont concluants, l'entreprise privilégiera vraisemblablement l'achat du Surveyor, moins précis mais plus léger, deux fois moins cher et utilisable sur le toit d'un véhicule. Grâce à sa plus grande polyvalence et son gabarit poids-plume, le Surveyor se pose comme le candidat le plus probable pour un premier achat de la gamme YELLOWSCAN.

# Évaluation de solutions commerciales et développement d'un dispositif autonome de télésurveillance.



*PFE présenté par :* **Julian Rebetez**  
*Société d'accueil :* **Haller-Wasser + partner SA**  
*Directeur de PFE :* **M. Wasser**  
*Correcteurs :* **M. Ledig, M. Koehl**  
*Encadrant :* **M. Sanguard**



## 1. Contexte et objectifs

La télésurveillance est une activité complémentaire à celle d'un cabinet de géomètre expert. Elle est traditionnellement réalisée via un suivi régulier de la structure à partir de techniques tachéométriques ou de nivellement. La contrainte d'une intervention terrain et l'automatisation de tels appareils coûtent cher. De plus, toutes les structures n'ont pas besoin d'une surveillance tridimensionnelle et certaines autres peuvent nécessiter un suivi quasiment en temps réel, ce qui est difficile à réaliser par tachéométrie. Aujourd'hui, l'industrialisation 4.0, l'essor de l'IoT (Internet of Things) et la démocratisation des capteurs rendent les techniques de télé-détection concurrentielles. Déjà utilisée dans d'autres corps de métiers, tels que celui des géotechniciens ou de l'automatisation en industrie, la mise en place de capteurs autonomes permet une gestion à distance. Celle-ci peut être complémentaire ou supplanter le besoin d'opération sur le terrain tout en garantissant le bon suivi des éléments sensibles. Les marchés potentiels sont aussi variés que le nombre de types de capteurs différents existants. L'intérêt est ici de développer la mesure de mouvement angulaire et spatial, mono ou multi directionnel.

Ce projet de fin d'études vise ainsi à ouvrir les portes de ces marchés à travers l'évaluation de la performance et de l'applicabilité de solutions existantes ; mais également par le développement d'une solution propre de télésurveillance, du hardware au software, en s'arrêtant avant la gestion des serveurs et la diffusion des données aux clients. Le cas d'étude de la surveillance de grue sera le fil conducteur, la référence, et l'objectif d'application concrète des résultats obtenus.

## 2. Un capteur pour monitorer

La première étape de cette étude correspond au choix de la technologie la plus adaptée pour répondre à la problématique d'auscultation de grue. Face à la diversité des configurations et pour un déploiement sur le terrain simplifié, la question de la solution la plus adaptée se pose. Par ailleurs, dans une optique de développement plus large, quelles sont les ouvertures possibles ? Et comment choisir la meilleure solution à commercialiser ?

### 2.1 Des grues

Il existe de nombreux types de grues. Les principaux sont les grues à tour et les grues mobiles, on trouve également des grues treillis et des grues télescopiques. L'étude se concentrera sur les grues à tours dont il existe plusieurs variantes mais ayant le plus souvent des structures similaires.

Malgré les multiples précautions prises telles que les inspections structurelles, les sols de soutènement bétonnés, les tables de charges maximales mises à disposition pour les grutiers, la mise en girouette des grues lors de l'inactivité et les signalisations pour éviter les collisions, le risque d'effondrement de la grue est toujours présent. Ces accidents ont des conséquences lourdes et doivent être à tout prix limités. Les causes sont diverses : problèmes mécaniques, d'usage, de fondation, etc. Cependant, le principal danger vient surtout des conditions



Figure 1 : Grue monitorée pendant l'étude

météorologiques qui sont difficiles à estimer et aléatoires. C'est pourquoi les principaux systèmes existants sont basés sur un système anémométrique (mesure des vitesses de vent) disposé au sommet de la contre-flèche (le point culminant centré sur l'axe du mat) de la grue. Toutefois, ce système est uniquement un indicateur météorologique. Ainsi, il ne permet pas d'évaluer la stabilité de l'édifice et ne protège que sur l'une des causes d'effondrement.

## 2.2 Une technologie

Parmi les nombreuses technologies de capteurs existantes, l'étude se concentre sur des prix unitaires compris dans la gamme de 100 à 2000€. Plusieurs principes de mesures existent, certains ont été écartés par manque de précision, ou à cause d'une installation complexe, du besoin d'une référence fixe, de l'applicabilité incertaine selon des configurations particulières de chantier, de la dérive de leur mesure sur le moyen ou long terme ou encore du besoin trop important en recherche et développement pour viabiliser son usage. Les capteurs basés sur des technologies MEMS (Microelectromechanical systems) se démarquent par leur attractivité financière. Mais le contrecoup est souvent celui d'une corrélation des performances avec la température de mesure, et, suivant le type d'instrument, une dégradabilité du zéro sur le long terme. Cependant, avec leur démocratisation, il est possible de trouver du matériel de plus en plus précis. Plusieurs constructeurs proposent des solutions basées sur ce type de technologie y compris adaptées à des environnements rudes.

La technologie retenue pour ce projet est celle des capteurs inclinométriques. Ils sont nombreux à être basés sur ces puces MEMS (parfois présentes en surabondance pour chaque axe de mesures). Un inclinomètre permet de mesurer directement des angles en exploitant le champ gravitationnel émis par la Terre. Il détermine ainsi son inclinaison par rapport à la verticale sur un ou deux axes de mesures orthogonaux. Il existe des modèles triaxiaux, ce qui permet de placer le capteur dans n'importe quel sens et de lire la valeur de l'inclinaison sur les deux axes les plus proches de l'horizontale. L'inclinomètre ne sera en revanche pas sensible aux déplacements uniformes de translation sur les axes X, Y ou Z. Il ne permet pas non plus de déterminer un angle de lacet autour de la verticale.

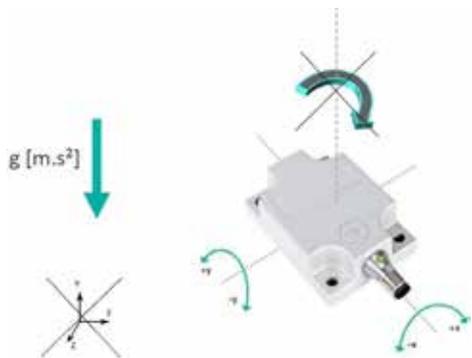


Figure 2 : Schéma présentant la mesure d'un inclinomètre bi-axial

## 2.3 Des applications

De nombreuses structures peuvent nécessiter un suivi angulaire afin de garantir leur stabilité. Les grues en sont un exemple mais les façades de bâtiments, les tours, les digues et barrages, les parois moulées, palplanches, berlinoises et pieux sécants proposent un besoin similaire de suivi. La différence se fera sur les besoins en précision et fréquence d'acquisition ainsi que, au cas par cas, sur le niveau de sécurité souhaité. D'autres marchés prometteurs peuvent aussi s'ouvrir au suivi par mesures inclinométriques. En particulier les réseaux ferrés ainsi que les ponts et tunnels. L'objectif étant ici d'utiliser plusieurs capteurs organisés à la chaîne afin de pouvoir déterminer non seulement des inclinaisons mais aussi de pouvoir en déduire des déformations.

## 3. Mise en place d'un système autonome

Afin d'acquérir des données il faut non seulement un capteur mais aussi une centrale d'acquisition dont le rôle est celui de contrôler le capteur, de réceptionner les données et de les transmettre. Le développement d'un tel système, autonome, comporte plusieurs défis. Le premier est celui du choix du matériel. L'IoT étant en pleine évolution, de nombreuses solutions existent. Mais quelle est leur applicabilité en conditions réelles ? Parmi les différentes architectures de réseaux et protocoles de communication lesquels choisir et comment intégrer les composants en une seule unité fonctionnelle et robuste sur une longue période de temps ?

### 3.1 Des puces de contrôles

Afin de pouvoir acquérir les données il faut pouvoir communiquer avec le capteur puis lire et interpréter le résultat afin d'en sortir une donnée compréhensible et significative de la mesure réalisée. Pour cela, il existe 3 possibilités :

- Les Programmable Logic Controller (PLC)

Ce sont des systèmes résistants et éprouvés dans le domaine de l'automatisation. Ils utilisent des langages de programmation simplifiés et sont capables d'automatiser n'importe quelle application mais peuvent être rapidement volumineux suivant la configuration choisie.

- Les microcontrôleurs

Disponibles à bas coût, les microcontrôleurs les plus connus du grand public sont les Arduino mais il existe de nombreuses autres marques. Ils ont l'avantage d'être très peu consommateurs et très compacts mais peuvent être limités en capacité pour certaines applications.

- Les micro-processeurs.

Compacte et abordable, cette solution est souvent rapprochée de celle des microcontrôleurs. Ce qui la démarque est principalement le fait qu'elle possède un système d'exploitation et des performances généralement plus développées que celles proposées par la plupart des microcontrôleurs. Les microcontrôleurs et microprocesseurs sont souvent utilisés ensemble pour pouvoir gérer des réseaux. A titre d'exemple les microprocesseurs les plus connus sont les différents Raspberry Pi.

L'étude s'est portée sur le choix d'un microcontrôleur. La solution trouvée propose une programmation micro-python et des modules de communication et de capteurs annexes tels que d'humidité et de température qui permettront la réception d'informations importantes pour l'analyse des acquisitions.

### 3.2 Une architecture

Le choix du hardware nécessite la connaissance de l'architecture que l'on souhaite déployer sur le terrain. Il est possible de créer un système :

- Filaire ou sans fil,
- De captation ou de détection,
- Sans propagation, avec diffusion ou de point à point,
- Avec une topologie plus ou moins robuste.

De plus, la redondance des mesures doit apparaître au sein ou en dehors de l'architecture. En effet, le risque zéro n'existant pas, une acquisition multiple est le moyen le plus fiable de prévenir une panne et de détecter un dysfonctionnement par comparaison directe de résultats présumés similaires.

### 3.3 Des protocoles

Il en existe une multitude mais ils peuvent être classés en deux grands groupes :

- Les protocoles filaires :

Les principaux étant la communication via les protocoles et câbles UART, Modbus, Ethernet, USB, CanOpen.

- Les protocoles sans fil :

Des réseaux de grande envergure tels que Lora, NB-IoT, LTE, GSM sont adaptés pour envoyer les données sur le serveur. Des réseaux de plus courte portée peuvent convenir à la communication entre capteurs tels que le wifi, le Bluetooth, le BLE, le ZigBee, le Z-wave, le 6LoWan, le Thread et le RFID actif. Les réseaux les plus représentés pour les applications de monitoring proposent des variantes ou directement l'usage du réseau téléphonique et du LoraWAN pour des applications de longue portée. Le ZigBee ou les protocoles filaires sont principalement utilisés pour la communication sur courte portée.

## 4. Différentes solutions pour un objectif

Le but est de venir qualifier et quantifier les capacités des différentes solutions commerciales ainsi que la solution propre à son état de développement courant.

#### 4.1 Une évaluation et des mesures

Afin de réaliser l'étude, deux solutions de constructeurs ont été mises en concurrence. De par leurs différences techniques et applicabilités, une première différenciation a eu lieu. Mais afin de pouvoir les comparer et connaître leur réelle capacité, plusieurs expériences ont été réalisées. Ces expériences peuvent être décomposées en 3 catégories :

- Une estimation fonctionnelle

Cette estimation comprend le bon fonctionnement des capteurs à la réception, leur mise en place, la réception des données depuis la plateforme mise à disposition, la bonne communication entre capteurs et jusqu'au réseau, ainsi que la gestion de la batterie.



Figure 3 : Banc de mesure en acier de 4m de longueur

- Une estimation en conditions idéales

Cette estimation est réalisée dans les bureaux en intérieur. Elle comprend la création et la fabrication d'un banc de test de métrologie venant accueillir les systèmes à contrôler ainsi que la réalisation de mesures dans diverses configurations des capteurs couplés à une mesure tachéométrique. Le banc de mesure est visible en figure 3. Il est maintenu en 2 points par un pivot et un trépied de tachéomètre modifié.

- Une estimation sur un chantier type

Cette estimation est réalisée sur la base d'une grue à tour dont le pied est lesté par bloc de béton. La mesure des capteurs est couplée à des mesures régulières de monitoring par tachéométrie. De plus, une attention particulière est mise en place pour la mesure origine qui a eu lieu un samedi (jour de repos du chantier) et qui permet de confirmer les hypothèses faites sur l'impact du positionnement des capteurs. Ces capteurs sont disposés sur des plaques en acier afin de venir contrôler leur positionnement et axe de mesure. La figure 4 montre la plaque numéro 5 qui accueillera un capteur positionné verticalement.



Figure 4 : Plaque d'accueil d'un capteur sur un lest en béton

#### 4.2 Une analyse

Les données issues de plusieurs systèmes d'acquisition sont uniformisées dans un seul fichier colonné via python. Celui-ci permet ensuite l'extraction de données sur une plage temporelle pour effectuer une analyse par les moindres carrés permettant d'assembler les acquisitions dans un même système de mesure. Les hypothèses permettant une mesure origine non contrôlée par moyens tachéométriques seront évaluées. Différentes analyses concernant les erreurs aléatoires, les erreurs systématiques, et les erreurs systématiques variables sont ensuite étudiées. Une attention particulière est portée sur l'influence de la température.

### 5. Conclusion

Ce projet de fin d'études permet de se rendre compte de la multitude de possibilités offertes par une télédétection basée sur un réseau de capteurs. Il met en exergue les voies à privilégier avec leurs atouts et leurs défauts tout en prenant parti d'une solution, qu'elle soit commerciale ou à développer.

Afin de parvenir à une commercialisation rapide, il aborde dans le détail les risques liés aux capteurs et à leurs applications. Il propose une étude des erreurs et fait le bilan de l'expérience acquise par la manipulation des systèmes ainsi que par les différents problèmes de fonctionnement rencontrés.

# Quantifier la précision pour des mesures topographiques sur structures navales ; Développement d'un outil d'analyse.

PFE présenté par : **Clément CARPENT**  
Société d'accueil : **TPLM-3D**  
Directeur de PFE : **M. David DESBUISSON**  
Correcteurs : **Mme Tania LANDES**  
**M. Jacques LEDIG**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de recherche concerne les **levés sur plateformes navales** réalisés par l'entreprise *TPLM-3D*. Il s'agit de prestations ayant pour objectif la détermination des différences angulaires entre une plaque usinée servant de référentiel au navire que l'on appelle « un marbre » et une plaque d'interface accueillant une centrale inertielle. Concrètement, il est donc question de mesurer la différence d'orientation entre deux plans et entre deux droites. Pour cela il est nécessaire d'utiliser un mode opératoire particulier permettant d'effectuer des mesures topographiques sur plateformes mouvantes dans un système de coordonnées local à l'aide d'un appareil de mesure de type station totale.



Figure 1 : Photo d'une plaque d'interface (à gauche) et d'un marbre (à droite).

Le principe de ce mode opératoire est de lever des points communs entre les différentes stations afin d'effectuer une consolidation des différents « nuages de points ». Ceci permet de transformer les coordonnées des points décrivant le marbre et la ou les plaques d'interface dans le même système de coordonnées de référence et ainsi de déterminer simplement la différence angulaire entre les différents éléments géométriques.

Malgré les différents logiciels sur le marché permettant d'effectuer des calculs de consolidation de nuages de points, aucun n'est adapté à ce mode opératoire. De plus, il est nécessaire pour ces levés de connaître avec certitude la manière dont sont calculées et transmises les erreurs sur les observations et sur les différences angulaires dont les clients ont besoins. C'est pourquoi *TPLM-3D* développe depuis 2009 le logiciel *TopTools* permettant, notamment, d'effectuer les calculs nécessaires pour ce type de mesurage.

Les demandes des clients devenant de plus en plus complexes au fil du temps, il s'est avéré nécessaire d'effectuer des changements dans le logiciel. L'objectif de ces recherches est donc de mettre à jour le programme de *TopTools* afin d'analyser et d'améliorer la compensation des calculs de consolidation, de plans et de droites. Il s'agit également de perfectionner le système de quantification de la précision et de vérifier et modifier, si nécessaire, les transmissions d'erreurs depuis les observations brutes jusqu'aux résultats finaux.

## 2. Principe de fonctionnement initial des calculs

Le logiciel *TopTools* fonctionne grâce à la méthode de compensation par les intermédiaires respectant le principe des moindres carrés présenté par (Landes, 2018) ou encore (Ghilani, 2010). Celle-ci est utilisée à plusieurs reprises ; notamment pour effectuer les calculs de consolidation en bloc et les calculs des paramètres des droites et plans les plus probables.

On appelle équation d'observation, les équations liant les observations et les inconnues du système. Initialement, le calcul de compensation implémenté dans *TopTools* n'utilisait que les équations d'observations suivantes (2.1) :

$$Vx_i^{Ref} = R_{Loc \rightarrow Ref} \cdot Vx_i^{Loc} + T_{Loc \rightarrow Ref} \quad (2.1)$$

Avec  $Vx_i^{Loc}$  et  $Vx_i^{Ref}$  les vecteurs contenant les coordonnées du point  $i$ , respectivement dans le système local et dans le système de référence. Le système de référence étant le système local de la station de référence choisie arbitrairement.

$T_{Loc \rightarrow Ref}$  le vecteur contenant les translations de la transformation du système local vers le système de référence.

Et  $R_{Loc \rightarrow Ref}$  la matrice de rotation du système local vers le système de référence.

On remarque que les observations sont les coordonnées des points de jonction dans le système de coordonnées local propre à chaque station. Les inconnues, quant à elles, sont, pour chaque station autre que la station de référence, les six paramètres de transformation vers le système de référence. À savoir : les trois composantes du vecteur translation et les 3 angles d'Euler  $\omega$ ,  $\varphi$  et  $\kappa$ . Les coordonnées des points de jonction dans le système de référence sont également des inconnues, puisqu'elles n'ont pas été mesurées depuis la station de référence.

Il est possible grâce à cette équation d'observations de remplir les 3 matrices d'entrées nécessaires au calcul de compensation par les moindres carrés. Ces matrices sont : la matrice jacobienne contenant les dérivées partielles de l'équation d'observations par rapport à chacune des inconnues, la matrice des poids et la matrice des écarts à minimiser.

Une fois la compensation terminée, les paramètres de transformation les plus probables sont connus pour chaque station autre que la station de référence. Il est donc possible de transformer les points servant de mesure de cap et de plan dans un même système de coordonnées. Le calcul des droites et des plans les plus probables peut alors débiter. Nous n'allons parler dans ce document que du calcul de droite mais le parallèle avec le calcul de plan est évident. Pour ce calcul de droite, l'équation d'observations est la suivante (2.2) :

$$Y_i = a \cdot X_i + b \quad (2.2)$$

Avec  $X_i$  et  $Y_i$  les coordonnées du point  $i$ , et  $a$  et  $b$  les paramètres de la droite. Les observations sont donc les composantes  $Y$  des coordonnées de chaque point et les inconnues sont les paramètres de la droite. De la même manière que pour la consolidation, il est ensuite nécessaire de remplir la matrice jacobienne, la matrice des poids et la matrice des écarts pour appliquer la méthode des intermédiaires.

De cette façon nous sommes capables de calculer les paramètres les plus probables des droites et des plans dans un même système de coordonnées et ainsi déterminer la différence angulaire entre les différentes entités géométriques.

### 3. Analyse des défauts et solutions retenues

Dans cette partie, il est question de passer en revue les principaux défauts qui ont été analysés, les solutions qui ont été retenues ainsi que les différentes améliorations apportées au système de compensation.

#### 1. Prise en compte de l'incertitude des points de référence

Le premier défaut notable concerne la consolidation des différentes stations. Il s'agit de la prise en compte des incertitudes sur les points de référence. Ce que nous appelons points de référence, dans ce rapport, ce sont les points de consolidation ayant été mesurés depuis la station de référence choisie arbitrairement. En effet, dans le système initial, la précision de ces points était considérée comme parfaite puisqu'ils n'étaient pas considérés comme des observations. Pour pallier ce défaut il a donc été nécessaire d'inclure de nouvelles équations d'observations (3.1) :

$$Vx_i^{Loc} = Vx_i^{Ref} \quad (3.1)$$

Avec  $V_{x_i}^{loc}$  le vecteur des coordonnées du point  $i$ , il s'agit de l'observation brute. Et  $V_{x_i}^{Ref}$  le vecteur des coordonnées du point  $i$  après compensation. Il s'agit de l'observation corrigée. Cette petite modification permet au système de compensation de corriger légèrement les coordonnées des points de référence en tenant compte de leurs précisions théoriques.

## 2. Prise en compte des covariances dans les calculs de compensation

Le second défaut est la négligence de la corrélation des coordonnées X, Y et Z lors de la transformation des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes. En effet, le programme de *TopTools* n'utilisait pas les formes matricielles, ni pour calculer ce passage des coordonnées polaires aux coordonnées cartésiennes, ni pour effectuer les calculs de compensation par les intermédiaires. Il n'était alors fourni aucune information quant aux covariances des observations et des inconnues du système. C'est pourquoi il a été nécessaire de modifier le programme pour effectuer tous ces calculs sous forme matricielle, et ainsi transmettre les covariances en plus des variances.

## 3. Prise en compte de l'incertitude due à la consolidation dans les calculs de plans et de droites

Le troisième et dernier défaut évoqué dans ce document est l'indépendance des calculs de droites et de plans les plus probables vis-à-vis du calcul de consolidation. En effet, il est évident qu'une perte de précision sur les différences angulaires provient de l'incertitude sur la consolidation.

Deux solutions ont été mises en place pour tenter de pallier ce problème, la première étant la modification de la matrice des poids. En effet, jusqu'alors, le logiciel utilisait des poids unitaires pour les observations de plans et de droites. L'idée est donc de calculer les précisions de ces observations grâce aux résultats du calcul de consolidation. Il est nécessaire pour cela d'utiliser la formule (3.2) :

$$C_{ll} = F \cdot C_{xx} \cdot F^T \quad (3.2)$$

Où  $C_{ll}$  est la matrice des variances covariances des points d'observation des plans et des droites.  $C_{xx}$  est la matrice des variances covariances des paramètres de transformation des coordonnées calculées lors de la compensation de la consolidation. Et  $F$  est la matrice jacobienne contenant les dérivées partielles de l'équation permettant la transformation des coordonnées par rapport aux paramètres.

Le calcul de la matrice des poids est ensuite direct grâce à la relation (3.3) :

$$P = Ql_{th}^{-1} = [Cll_{th}/mq_{0th}]^{-1} \quad (3.3)$$

Où  $P$  est la matrice des poids,  $Ql_{th}$  est la matrice des facteurs cofacteurs des observations brutes.  $Cll_{th}$  est la matrice des variances covariances des observations brutes et  $mq_{0th}$  est l'erreur moyenne quadratique (nommée « emq » dans la suite de ce document) de l'unité de poids théorique déterminée arbitrairement.

Cette première solution rend le calcul plus rigoureux mais n'est pas suffisante pour réellement transmettre l'erreur due à la consolidation sur le calcul de plans et de droites les plus probables. La preuve en est que lorsque l'on modifie l'étape de consolidation en supprimant les points aberrants (ce qui modifie la précision de la consolidation de manière significative), les valeurs de différences angulaires calculées changent, alors que la différence sur les emq associées est largement négligeable.

Il a donc été décidé d'effectuer un calcul de précision théorique des paramètres de plans et de droites en utilisant les précisions des points d'observation obtenues par transmission d'emq sous forme matricielle. Pour cela, il est nécessaire de connaître les précisions des paramètres de chaque transformation, ce qui est le cas puisqu'elles sont calculées simplement après le calcul de compensation de la consolidation.

Il est ensuite nécessaire d'appliquer la formule (3.4) :

$$Cxx_{th} = A_g^{-1} Cll_{ef} A_d^{-1} \quad (3.4)$$

Où  $A_g^{-1}$  et  $A_d^{-1}$  sont respectivement la matrice jacobienne inverse à gauche et inverse à droite détaillées par (Strang, 2016).

$Cxx_{ch}$  est la matrice des variances covariances des paramètres des plans et des droites et  $Clle_{ef}$  est la matrice des variances covariances des paramètres des transformations de coordonnées.

Remarque : d'autres défauts avec un impact moindre ont été corrigés et des améliorations annexes ont été implémentées. Parmi celles-ci on peut citer :

- La vérification du test du  $\chi^2$  permettant de quantifier la cohérence globale du levé grâce au modèle stochastique.
- Le calcul des erreurs résiduelles normées qui, quant à elles, permettent de vérifier la cohérence du réseau 3D en local. Cette fonctionnalité est très utilisée pour analyser les observations dont l'erreur résiduelle est trop élevée en se basant sur les précisions théoriques attribuées à chacune des observations.
- La réalisation d'expériences annexes ayant pour but d'améliorer et d'ajuster le modèle stochastique.

#### 4. Tests permettant la validation de la nouvelle version

Une expérience a été prévue pour vérifier le système de calcul des précisions. Celle-ci consiste à simuler un marbre et une plaque d'interface l'une à côté de l'autre et à mesurer les différences angulaires dans 3 cas différents. Dans le premier cas, on mesure les deux plaques depuis une seule et même station, alors que dans les cas n°2 et 3 on réalise respectivement une consolidation de 4 stations et de 9 stations. Dans le dernier cas la traversée de 2 couloirs a été simulée afin de quantifier la perte de précision due aux couloirs ou aux cages d'escalier sur chantier réel.

Pour vérifier les calculs de précision, nous pouvons considérer le cas n°1 comme étant largement plus précis puisqu'il n'y a pas besoin d'effectuer de consolidation. Il ne reste plus qu'à vérifier que les résultats du cas n°1 entrent bien dans les intervalles de confiances calculées dans le cas n°2 et dans le cas n°3.

#### 5. Résultats des tests

Les résultats ont été répertoriés dans le tableau 1 ci-dessous.

	Différences angulaires						
	Cas n°1	Cas n° 2	Cas n°2 (intervalle 68%)		Cas n° 3	Cas n°3 (intervalle 68%)	
Cap	1,556	1,543	1,516	1,570	1,565	1,536	1,594
Tangage	0,229	0,234	0,195	0,274	0,230	0,170	0,290
Rouli	1,039	1,055	1,020	1,090	1,039	0,991	1,087

Tableau 1 Tableau récapitulatif des résultats de l'expérience.

Il est notable que toutes les valeurs du cas n°1, considérées comme les valeurs vraies, entrent largement dans les intervalles des deux autres cas. Ceci signifie que les précisions calculées sont trop pessimistes puisqu'il ne s'agit là que des intervalles à 68%. Il est possible que la cause soit le modèle stochastique qui, bien qu'il soit adapté à la consolidation n'est pas suffisamment optimiste pour les calculs de plans et de droites.

D'autres tests ont été effectués, et sont présentés dans le rapport final, pour vérifier les calculs de précisions, par exemple, pour un même levé, nous avons effectué différentes séries de mesures. Ceci a permis de vérifier que les valeurs obtenues appartenaient toutes aux intervalles de confiance des autres séries. Nous avons également réalisé des tests pour vérifier la cohérence du modèle stochastique notamment grâce au test du  $\chi^2$ , aux erreurs résiduelles normées ainsi qu'au ratio emq théorique sur emq effective de chaque observation. Les différences entre les valeurs obtenues grâce à l'ancien programme de *TopTools* et le nouveau ont été mises en évidence.

#### Bibliographie

- Ghilani, C. D. (2010). *Adjustment computations: spatial data analysis* (J. & S. Wiley (ed.); 5th ed.). John Wiley & sons.
- Landes, T. (2018). *Cours : Calcul d'erreur et compensation*.
- Strang, G. (2016). *Lecture 33: Left and right inverses; pseudoinverse*. <https://ocw.mit.edu/courses/mathematics/18-06-linear-algebra-spring-2010/video-lectures/lecture-33-left-and-right-inverses-pseudoinverse/>

# Interface Génie-civil/Equipement : Positionnement d'interfaces dans des trémies

PFE présenté par : **Arthur ACKER**  
Société d'accueil : **SITES – Aix-en-Provence**  
Directeur de PFE : **Matthieu HANSEN**  
Correcteur : **Emmanuel ALBY**

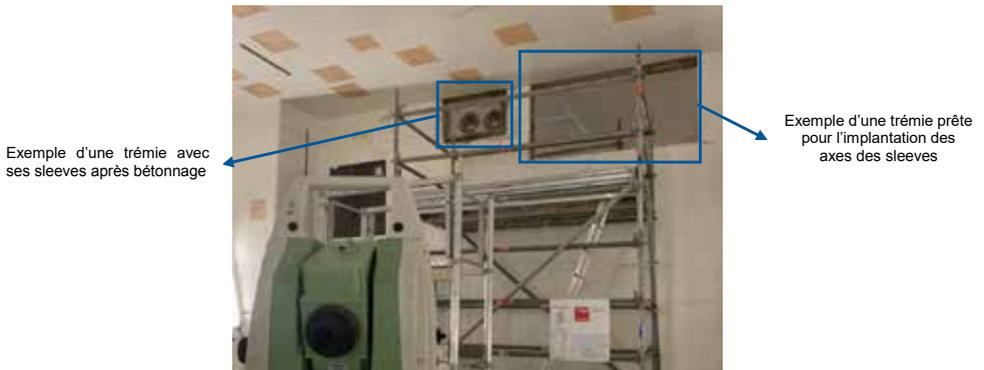


## 1. Introduction

SITES acronyme de « Société d'Instrumentation et de Traitement d'Essais sur Site », a été fondée en 1984 par Jean-François Sageau, afin de contrôler, surveiller et suivre la résistance au vieillissement de grands ouvrages du génie-civil. Elle est, de nos jours, spécialisée dans le diagnostic et le suivi de structures de grande envergure dont des environnements industriels sensibles ou nucléaires.

Mon Projet de Fin d'Etudes s'est donc déroulé au sein du groupe topographie et instrumentation (*TOP/MIM*) de l'agence SITES d'Aix-en-Provence. Le groupe *TOP/MIM* de cette agence est appelé à régulièrement travailler sur deux projets à enjeux de sûreté nucléaire : le projet Réacteur Jules Horowitz (*RJH*) et le projet mondial de recherche sur la fusion nucléaire (*ITER*). Ils nécessitent l'intervention de topographes pour des travaux d'implantations, d'auscultations et de relevés de contrôles.

On retrouve parmi les interventions réalisées, le positionnement de tubes en acier, appelés sleeves, à l'intérieur de réservations dans le béton, appelées trémies, sur le chantier d'ITER. Ces sleeves seront destinées, par la suite du chantier, au passage de gaines, câbles, tuyauteries plus ou moins sensibles. SITES a mis en place une procédure allant de l'implantation de ces axes au réglage et contrôle après bétonnage. SITES a réalisé que la phase de contrôle prenait beaucoup de temps aux équipes sur le terrain. La problématique principale du projet est donc de proposer une solution qui permettrait, dans le meilleur des cas, aux employés, d'effectuer la phase de réglage avec une présence partielle des topographes.



## 2. Méthode et cahier des charges actuels

Dans cette mission, SITES est sous-traitant pour une société de génie civil dans le cadre de chantiers sur sites hautement réglementés et sensibles. Pour une trémie, le client nous fournit le plan avec les données théoriques des coordonnées du centre de la sleeve aux deux extrémités dans le repère du chantier. La tolérance de position de chaque extrémité de la sleeve après bétonnage est de  $\pm 5\text{mm}$ . Pour atteindre cette tolérance, SITES a mis en place toute une procédure pour réaliser un positionnement millimétrique : l'implantation des axes des sleeves, le contrôle du positionnement avant bétonnage et pour finir le lever après bétonnage pour attester de la situation finale. A chaque étape, un procès-verbal est établi pour attester du respect du cahier des charges. Une station totale de type métrologique *Leica TDRA6000* ainsi qu'un kit métrologique sont utilisés pour déterminer les coordonnées du centre de l'extrémité de chaque sleeve. En effet, à l'aide d'une pièce de liaison et d'un coin de cube nous allons lever 5 points sur le périmètre de l'élément. Ces cinq points vont servir à recalculer les coordonnées du centre par le biais du logiciel interne *Metride Dim Master (MDM)*, installé sur un ordinateur connecté à l'appareil, qui va alors calculer, comparer et établir les écarts entre les données théoriques et relevées.

C'est la mesure de ces 5 points qui rallonge considérablement la phase de contrôle. Tant que la position de la sleeve ne rentre pas dans la tolérance, ces cinq points doivent être mesurés après chaque déplacement. La mesure et le calcul de ces 5 points pour l'obtention d'écarts prennent en moyenne 1min45sec. Ce temps peut vite évoluer de façon exponentielle car on doit réitérer ces mesures sur chaque sleeve de la trémie, des deux côtés. Si après correction de la position de la face 1 nous devons effectuer une correction de position de la face 2 nous devons revenir mesurer la face 1 pour contrôler si elle n'est pas sortie des tolérances.

## 3. Solutions étudiées

Pour répondre à cette problématique, plusieurs systèmes et solutions ont été étudiés :

- La lasergrammétrie
- La photogrammétrie
- La réalité augmentée, par affichage à travers un élément et la réalité augmentée spatiale
- La création d'un système mécanique permettant de matérialiser le centre de la sleeve

Au fur et à mesure des premières recherches et tests, nous avons décidé d'abandonner deux pistes. D'une part la lasergrammétrie car l'utilisation d'un scanner laser ainsi que le traitement des données seraient trop lourd à effectuer sur le terrain pour une personne non formée. D'une autre part, nous avons aussi exclu la partie réalité augmentée par affichage à travers un élément comme des lunettes. Après études des tests réalisés, les technologies actuelles ne permettent pas d'afficher et maintenir une précision d'affichage de l'ordre de 1 millimètre pour rentrer dans notre tolérance de  $\pm 5\text{mm}$  de positionnement après bétonnage.

Nous avons alors axé nos recherches autour de la photogrammétrie, la réalité augmentée spatiale par le biais du gabarit laser et une solution matérielle permettant de placer un coin de cube ou une cible codée directement au centre de la sleeve.

## 4. Méthodes étudiées

- **Photogrammétrie**

L'agence Provence possède un appareil photographique *Canon EOS500D*. Cet appareil nous a permis de réaliser une orthophotographie vraie d'une trémie pour contrôler la position des sleeves.



Figure 1 :  
Orthophotographie d'un  
insert

Ce premier test nous a permis de mettre en lumière que l'environnement de travail mettait l'appareil photographique à rude épreuve de par sa très mauvaise luminosité. Le contrôle de la position des centres sur l'orthophotographie nous a permis de valider la précision de cette méthode. Un script *python* du traitement *Metashape* a alors été créé pour automatiser la procédure. Néanmoins cette méthode ne permet pas de contrôler la position en profondeur de la sleeve dans la trémie qui ne peut pas être négligé et le traitement est aussi très long à effectuer.

*Metashape* possède des outils permettant de produire et de détecter les coordonnées de cibles codées sur des photographies. Nous avons alors pu réaliser des tests à l'aide de ces cibles codées pour extraire les coordonnées d'un modèle. Le script a pu alors être réutilisé et adapté à cette situation.



Figure 2 : Processus *Metashape*

Le schéma ci-contre représente le cheminement du script *python* à effectuer. Certaines étapes sont déjà réalisées et opérationnelles comme : l'estimation de la qualité des photographies, la désactivation des photographies sous un certain seuil de qualité, la détection de cibles codées, l'alignement ainsi que l'export de coordonnées dans un fichier *.txt*. Il reste encore à réussir l'association automatique de la détection de cibles codées avec des coordonnées venant de l'importation d'un fichier texte. L'automatisation d'une telle procédure permettrait, après la prise de photos ainsi que le lever tachéométrique des différentes références, de lancer le processus tout en s'occupant d'une autre tâche pendant le calcul.

Plusieurs questions subsistent pour ce processus. Soit nous plaçons 5 cibles sur le périmètre de la sleeve et nous recalculons le centre à l'aide du logiciel *MDM* ou nous arrivons à placer la cible directement au centre de la sleeve pour obtenir ses coordonnées. Une sleeve mesure environ 3 millimètres d'épaisseur, il est alors très difficile d'y placer une cible. C'est pourquoi nous nous sommes tournés vers le développement d'une solution mécanique permettant de mesurer directement le centre.

### - Solution mécanique permettant de matérialiser le centre d'une sleeve

Cette question de matérialiser le centre d'une sleeve s'est posée dès les premières réflexions sur le sujet. En effet le fait de développer un tel système permettrait, au lieu de mesurer cinq points à chaque fois, de mesurer seulement un seul point tout au long des travaux. Cette solution permettrait de gagner beaucoup de temps pendant la phase de contrôle en effectuant un réglage dynamique. Ne trouvant pas de solution correspondant à notre situation nous avons choisi d'en produire une.



Figure 3 : Pièce principale



Arthur Acker 3/4

Figure 4 et 5 : Représentation du prototype



## - Gabarit Laser

Ce système s'insère dans la catégorie de réalité augmentée dite spatiale, parfois appelée réalité augmentée par projection ou réalité augmentée projective. La réalité augmentée spatiale (RAS) consiste à augmenter la réalité en projetant des images directement sur des objets réels. On peut y retrouver des projecteurs d'hologrammes ou comme dans notre cas des gabarits lasers. Le gabarit laser permet de projeter sur une surface un modèle laser à partir d'un plan DAO. A l'aide de références, le gabarit affiche à l'échelle et avec précision le plan importé.



Figure 6 : Gabarit laser CAD-Pro

Le système fonctionne par le biais de références placées au préalable autour de la zone de projection. A l'aide de l'import d'un fichier texte comprenant les coordonnées des différentes références, le gabarit vient alors localiser les cibles rétro-réfléchissantes. Il calcule la somme au carré des écarts par le principe des moindres carrés (information constructeur) pour mettre à l'échelle le modèle dans l'espace. Le gabarit projette alors le fichier DAO importé sur la surface. A 1 mètre à l'aplomb d'une surface le gabarit laser projette une pyramide de base 1 mètre 67 avec comme angle de sortie à la pointe 80°. Bien sûr, il est possible d'avoir une zone de projection plus grande en reculant le projecteur de la surface, le projecteur est majoritairement utilisé à une distance entre 2 mètres et 8 mètres de la surface sur laquelle nous projetons. En mode standard la précision de projection est de 0.02mm/m en fonction de la distance projecteur/surface. Il projette un laser de classe 5Mw ne nécessitant pas d'équipements de protection individuel (EPI) particuliers quant à son utilisation.

Ce gabarit laser permettrait de positionner la sleeve dans la trémie suivant les trois axes. En effet, on pourrait visuellement savoir si la sleeve est à déplacer pour se caler sur la trace laser projetée. Cette solution permet aussi de régler la position en profondeur dans la trémie. Par exemple si la représentation laser se trouve dans la sleeve, elle sera à reculer dans la trémie pour caler le tout ensemble.

En réfléchissant à ce système, nous nous sommes questionnés sur l'utilisation d'une station totale comme gabarit laser. En effet, à l'aide du pointeur laser de l'appareil et de la fonction « Pos3D » dans le programme d'implantation il est possible de représenter la position du point à implanter. Une gamme, programme du logiciel interne MDM, permet de pointer automatiquement à la suite n-points correspondant à des points du périmètre de la sleeve. Ce système peut être couplé à la solution mécanique permettant de matérialiser le centre de la sleeve. Malheureusement, après des tests, le diamètre du point laser de l'appareil se révèle trop important par rapport à l'épaisseur du sujet pour rentrer dans nos tolérances de positionnement.

## 5. Conclusions et perspectives

Ce projet s'est inscrit dans une prestation en cours de réglage d'une centaine de trémies mais avec une perspective d'en réaliser 2500 supplémentaires. La lasergrammétrie est trop longue et complexe à mettre en œuvre, le temps de traitement est trop important et nécessite du personnel spécialisé. La réalité augmentée consistant à voir à travers un écran la position théorique du modèle n'a pas permis d'atteindre la précision millimétrique. La photogrammétrie consistant à créer une orthophotographie vraie nécessite un processus de traitement trop long et complexe. Néanmoins l'export de cibles codées à partir de l'alignement des photos a montré son efficacité en termes de temps de traitement et de précision.

Une approche plus ponctuelle permet de réduire nos problématiques comme une pièce mécanique matérialisant le centre, une cible codée ou prisme de mesure sont autant de solutions. Cette pièce mécanique permet le réglage dynamique d'une sleeve à l'aide d'un unique point. Cette méthode est donc réalisable à l'aide de moyens conventionnels tels qu'une station totale. La réalité augmentée par projection par le biais du gabarit laser permet ce réglage en masse de plusieurs sleeves simultanément.

Toutes ces solutions sont autant de moyens à combiner pour optimiser notre mission.

# Détection automatique de changements et de défauts dans le béton des orthophotographies

*PFE présenté par :* **Caroline Grussi**  
*Société d'accueil :* **SITES Rhône-Alpes**  
*Directeur de PFE :* **Pierre Carreaud**  
*Encadrant :* **Marc-Antoine Brossault**  
*Correcteur :* **Emmanuel Alby**



---

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'inspection d'ouvrage est une activité majeure de SITES depuis sa création. Celle-ci consiste à repérer sur un ouvrage les défauts représentatifs de problèmes structurels (fissures, corrosions, etc). Pour des structures de taille importante et/ou difficiles d'accès, comme des tunnels, barrages ou cheminées, cette inspection est réalisée à l'aide d'une orthophotographie couvrant l'ensemble de la structure. Celle-ci est ensuite chargée dans un SIG (Système d'Information Géographique, comme ArcGis), et les défauts y sont annotés sous forme de points, lignes ou surfaces.

A l'heure actuelle, cette inspection est réalisée manuellement. Il s'agit d'une opération laborieuse et répétitive, qui peut mobiliser un opérateur pendant plusieurs semaines. Le besoin pour SITES d'automatiser ce processus est donc apparu naturellement.

Ce PFE traite ainsi de l'automatisation de cette inspection. Celle-ci sera faite en deux phases : la détection automatique de changements entre des orthophotographies d'un même ouvrage réalisées à deux époques différentes d'une part, et d'autre part, la détection de défauts sur une seule orthophotographie.

L'objectif de la détection de changement a été imaginé comme une aide à la détection plus qu'une détection automatique : à la suite d'une série de traitements d'images, il serait possible de superposer dans un SIG l'orthophotographie prise au moment t2, la base de données issue de l'inspection t1, ainsi que les changements entre les deux époques. Ainsi, les modifications entre les deux époques seraient facilement visibles et la base de données rapidement modifiée. Cela permettrait donc un gain de temps ainsi qu'un véritable confort visuel pour l'opérateur, qui n'aurait plus besoin de balayer l'intégralité de l'orthophotographie avec un zoom important.

Concernant la détection de défauts, deux axes de réflexions ont été envisagés :

- L'utilisation d'algorithmes de traitement d'images, pour mettre en valeur un type particulier de défauts ou tous les défauts.
- L'utilisation de méthodes d'apprentissage profond (deep learning). L'idée ici n'est pas de coder de A à Z un réseau de neurones, mais de considérer plusieurs solutions intégrées, d'évaluer leur performance, et de comparer leur prix, afin de retenir une solution utilisable à des fins de production dans un futur proche. Les solutions étudiées sont les suivantes : le module de deep learning disponible dans ArcGis Pro ; le site internet Picterra, qui permet à l'utilisateur d'entraîner un détecteur personnalisé en dessinant les objets qu'il souhaite détecter ; le site internet EasyInspect, qui possède un réseau de neurones pré-entraîné pour la détection de défauts sur ouvrage d'art ; la start-up franco-américaine Sterblue, qui propose d'entraîner un réseau de neurones adapté à nos besoins, et avec qui SITES a déjà travaillé par le passé.

## 2. Détection de changements

L'étude bibliographique menée a permis de retenir de nombreuses méthodes de détection de changements couramment implémentées à l'heure actuelle. Parmi ces solutions, on peut citer la différence d'image, le ratio d'image, la régression d'image, l'analyse en composante principale, ou de façon plus récente, l'utilisation de l'algorithme SIFT.

Les premières expérimentations liées à la détection de changement ont mis en avant la nécessité de traiter de manière distincte des changements d'envergure différente. En effet, les méthodes citées précédemment permettent d'obtenir, directement à partir des images brutes, des résultats suffisants pour détecter des changements de taille importante, comme les chutes de béton, l'apparition d'acier interne au béton, les traces d'infiltration d'eau, etc. Cependant, pour les petits défauts, et notamment les fissures, cela ne permet pas de mettre suffisamment en avant ces changements pour faciliter l'inspection. Ceci est principalement dû aux variations locales de luminosité sur l'orthophotographie (utilisation de flash différent d'une année à l'autre, influence du soleil pour les ouvrages exposés). Ainsi les différences qui nous intéressent, c'est-à-dire celles liées à l'évolution des défauts, se retrouvent noyées dans des différences liées à des changements de luminosité.

En termes de mise en place de la méthodologie, l'accent a été mis sur des outils facilement reproductibles par les opérateurs chargés de l'inspection, qui n'ont en général pas de connaissance en termes de programmation. L'écriture de code a donc été limitée le plus possible, et les recherches se sont orientées un maximum vers des logiciels SIG, qui proposent une interface agréable, un vaste choix d'algorithme de traitement d'image, des fonctionnalités personnalisées par le biais de plugins, et sont de plus optimisés pour traiter des images de taille importante comme des orthophotographies.

Finalement, la solution retenue pour la détection de changements d'envergure importante est basée sur l'utilisation d'un plugin QGIS. Cette solution a été retenue car son utilisation est intuitive, et qu'elle permet d'obtenir en sortie une couche binaire semi-transparente (pixel « changement » en couleur, pixels « sans changement » transparents à 100% par défaut), ce qui est exactement le but recherché.

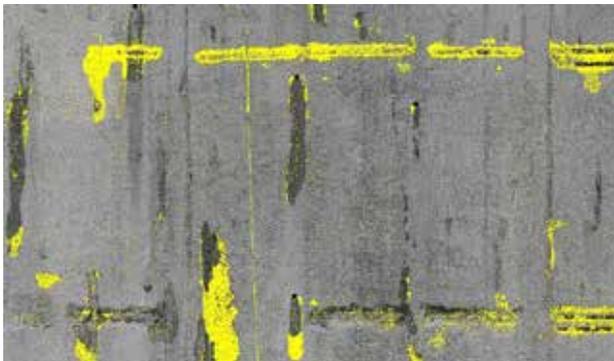


Figure 1 : Illustration du résultat obtenu à l'aide du plugin. En jaune, les changements détectés.

## 3. Mise en valeur des fissures

Puisque les méthodes de détection de changements avec une approche « pixellaire » ne permettent pas de visualiser l'apparition et/ou l'évolution des fissures, il a été décidé qu'une approche « objet » serait adoptée. Ainsi, les fissures seraient détectées de façon indépendante sur chaque image, puis comparées ensuite. Cette idée rejoint par ailleurs un autre objectif de ce projet, à savoir la détection de défauts par des méthodes de traitement d'image.

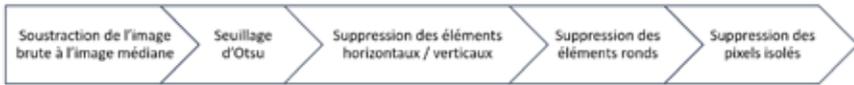


Figure 2 : Chaîne de traitement mise en place pour la mise en valeur des fissures

La chaîne de traitement mise en place pour permettre la mise en avant des fissures est résumée figure 2.

La première étape consiste à appliquer un filtre médian à l'image en niveau de gris. Ce filtre va avoir pour effet de lisser l'image, et d'en éliminer les petits éléments caractéristiques, notamment les fissures. Puis l'image brute est soustraite à l'image lissée. Sur cette image résultante, seuls les petits éléments caractéristiques seront alors mis en avant.

Comme illustré sur la figure 3a, les petits défauts (notamment les fissures) sont bien mis en avant, mais c'est également le cas du grain du béton, des fils de câbles, et d'autres éléments caractéristiques au béton (joints par exemple). Supprimer ces éléments sans supprimer les fissures est donc l'enjeu principal de la suite de la chaîne de traitement. A noter que dans le cadre de la détection de changement, le traitement s'arrête ici.

La logique de la suite du traitement repose sur les caractéristiques des fissures : celles-ci sont rarement complètement horizontales ou verticales, il est donc possible de supprimer les éléments qui le sont ; les fissures présentent également des excentricités proches de 1, du fait de leur finesse et de leur longueur, il est donc possible de supprimer les éléments ronds. Enfin, les petits amas pixels sont probablement du bruit lié au béton, et ils peuvent également être effacés. Ces différentes suppressions ont été réalisées à l'aide d'un script python.

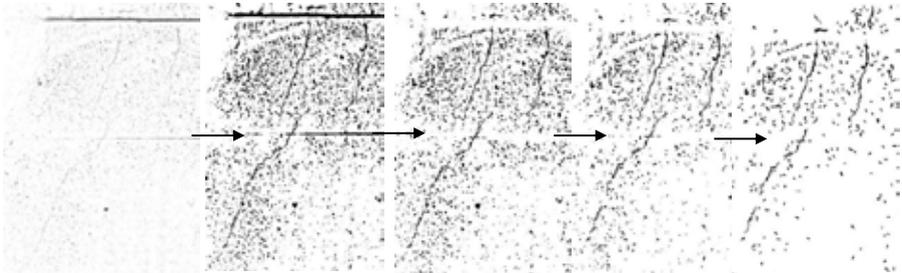


Figure 3 : De gauche à droite : (a) Soustraction de l'image brute à l'image médiane, (b) Application du seuillage, (c) Suppression des éléments horizontaux et verticaux, (d) Suppression des éléments ronds, et (e) Suppression de petits amas de pixels.

Comme montré figure 3e, cette méthodologie donne de bons résultats. Cependant, elle est limitée dans certaines situations, notamment celles où le grain du béton est beaucoup plus important que dans l'image utilisée pour illustrer ce résumé. Dans cette situation, des traitements spécifiques, à adapter au cas par cas, seraient nécessaires. Les valeurs de tolérances pour les suppressions multiples devraient par exemple être adaptées. Cette méthodologie, bien que prometteuse, paraît ainsi difficilement généralisable, du moins sans avoir une connaissance a priori de l'ouvrage inspecté.

## 4. Intelligence artificielle

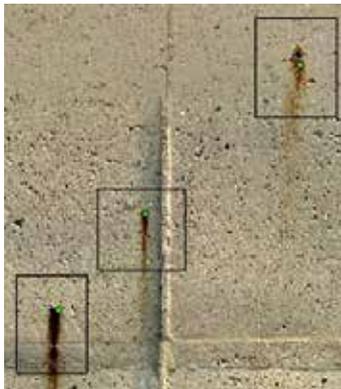
Comme expliqué dans la partie concernant les objectifs de l'étude, plusieurs solutions de deep learning intégrées sont à étudier dans le cadre de ce projet. Une « stratégie de détection » a dû être élaborée. En effet, lors de l'inspection, SITES distingue les défauts en fonction de leur type (fissure,

corrosion, efflorescence, etc) mais également en fonction de leur géométrie (ponctuelle, linéaire, surfacique). Pour des questions techniques (éviter la redondance d'information et la sous/sur-détection), il a donc fallu rassembler ces informations en un minimum de classes d'objets à détecter. La stratégie de détection finale se compose donc de 5 classes : une pour les fissures et les décollements avec risque de chute (notamment les bords de ceux-ci) ; une pour les corrosions ; une pour les suintements et les efflorescences ; une pour les aciers apparents ; et enfin une pour les nids de cailloux et les épaufrures (qui s'apparentent à des trous dans la surface du béton).

Le premier prestataire étudié a été **Picterra**. L'utilisateur est amené à dessiner les objets à détecter, c'est-à-dire les données d'entraînement, sur les images. Une option permet de tester par la suite le résultat de l'entraînement, d'évaluer sa performance à partir d'une vérité terrain, et de l'améliorer si nécessaire. Une fois ce résultat jugé satisfaisant, il est alors possible de détecter les objets sur des images nouvelles.

De manière générale, les résultats obtenus pour les trois premières classes sont satisfaisants, puisque sur des données nouvelles (jamais vues pendant l'entraînement), 98% des fissures, 99% des efflorescences, et 97% des corrosions sont détectés. Les résultats de la classe « nids de cailloux et épaufrures » ne sont pas encore concluants.

Figure 4 : Détection de fissures avec Picterra (en bleu) par rapport à l'inspection de SITES (en vert)



La seconde solution étudiée est le module de deep learning présent dans **ArcGis Pro**. L'interface est différente de Picterra, mais le principe d'entraînement reste le même, puisque l'utilisateur est amené à dessiner les données d'entraînement, ou à générer celles-ci à partir de fichiers shape qu'il a déjà en sa possession.

Les résultats obtenus pour la détection de corrosions sont semblables à ceux obtenus avec Picterra. La détection d'éléments linéaires (comme les fissures) présente des résultats prometteurs, mais n'est pas encore aboutie.

Par ailleurs, pour les deux outils, la classe représentant les aciers apparents a été laissée de côté, par manque de données d'entraînement.

Figure 5 : Détection de corrosions avec ArcGis Pro (en noir) par rapport à l'inspection de SITES (en vert)

## 5. Conclusion et perspectives

Une méthode de détection de changements a donc été mise au point grâce à ce projet, et ceci quelle que soit la taille des changements.

Lors de la mise en place de la méthodologie de détection de changements, une méthodologie pour la détection de fissures a été implémentée et testée sur différents jeux de données. Cela a mis en avant ses forces et ses limites, notamment en termes de généralisation. Cette méthodologie présente donc une marge de progression.

Enfin, les manipulations des solutions intégrées en intelligence artificielles sont prometteuses, et permettraient une véritable automatisation du processus d'inspection. D'autres solutions doivent encore être étudiées, et comparées avec les précédentes.

# Utilisation de l'apprentissage machine dans la classification de données aériennes 3D

PFE présenté par : **Mira Lecocq**  
Société d'accueil : **IGO**  
Directeur de PFE : **Philippe Bour**  
Correcteur : **Emmanuel Alby**



## 1. Contexte et objectifs du projet

Cette étude s'inscrit dans une recherche d'amélioration des résultats en phase aval du processus de photogrammétrie au sein de l'entreprise IGO. Le sujet de ce stage est ainsi la classification de modèles 3D réalisés par la société via un apprentissage machine. Ces modèles sont généralement issus d'une aérotriangulation à partir de photographies aériennes de villes ; ils peuvent donc être sous forme de nuage de points ou de maillage 3D. Pour cadrer le projet cependant, nous avons décidé de ne travailler que sur des nuages de points. Certains modèles intègrent également des données LiDAR aériennes comme c'est le cas du nuage de points de Bordeaux qui sera notre jeu de test dans l'étude. Le but de notre classification est d'obtenir les trois classes suivantes : bâtiment, sol et végétation ; une dernière classe est réalisée pour répertorier tous les autres éléments (voiture, poteau, bruit de mesure etc.). À noter que le terme « classification » est un abus de langage désignant ici « segmentation », le sujet qui nous intéresse réellement (voir la partie 2).



Figure 1 : Extrait du nuage de points de Bordeaux utilisé pour les tests

Pour effectuer cette étude, IGO avait déjà pris contact avec l'entreprise GeometryFactory, fournisseuse de la librairie CGAL permettant des opérations sur des modèles 3D, telles que la classification appliquée à une scène urbaine. L'algorithme promu par CGAL est la forêt d'arbres décisionnels développée par Breiman (2001), bien connue en 2D. Il sera donc une des solutions étudiées mais d'autres devront être déterminées par l'état de l'art, notamment celles faisant appel à un réseau de neurones.

Ce stage de recherche ne doit pas aboutir à un modèle parfait mais plutôt proposer des pistes de méthodes de segmentation qui semblent adaptées à nos données et une étude sur les meilleurs paramètres de chaque méthode. À la suite de cela, IGO prévoit de travailler sur la reconstruction 3D de bâtiment selon le format CityGML. Le manque de temps empêche son étude durant le stage mais un état de l'art à son sujet sera établi dans le rapport final de stage.

## 2. État de l'art de la classification et de la segmentation 3D

La classification et la segmentation 3D sont deux processus différents mais liés ; la classification s'intéresse à un nuage de point dans son ensemble tandis qu'une segmentation est une classification point par point. Les articles scientifiques sur le sujet sont cependant largement plus centrés sur la classification, la segmentation n'étant qu'un dérivé. Ainsi, il peut être possible qu'un algorithme soit documenté et efficace pour sa composante classification mais le soit moins pour sa composante segmentation. L'étude bibliographique sera tournée vers les méthodes de classification de nuages de points mais il sera nécessaire, durant les tests, de vérifier leur applicabilité pour de la segmentation.

Les méthodes de classification 3D peuvent se séparer en deux familles : celles faisant appel à un réseau de neurones et les autres que l'on peut qualifier de « traditionnelles ».

Parmi les méthodes « traditionnelles », la forêt d'arbres décisionnels est l'algorithme le plus utilisé mais nous pouvons également citer les séparateurs à vastes marges, abrégés SVM, et les fonctions d'identification. Elles peuvent toutes être associées à un champ aléatoire de Markov qui permet de régulariser les résultats. La forêt d'arbres décisionnels et SVM sont deux algorithmes de classification supervisée très connus et robustes en 2D. Leur passage à la 3D est relativement simple ; il leur suffit d'avoir des descripteurs 3D des points et de leur voisinage comme l'horizontalité, la hauteur relative ou la dispersion verticale. Les fonctions d'identification sont plus complexes à appréhender et moins robustes car elles effectuent une classification non-supervisée. Pour chacune des classes possibles, une fonction prenant en entrée les caractéristiques du point est définie. On calcule ces fonctions pour chaque point et lui attribue la classe pour laquelle la fonction correspondante a le résultat maximal.

Les réseaux de neurones sont aujourd'hui très populaires grâce à leur efficacité remarquable, en particulier les réseaux de neurones convolutifs. S'ils sont relativement connus et faciles à utiliser en 2D, ils ne peuvent être appliqués directement à des données 3D. En effet, la notion de voisinage est alors difficile à définir et cela rend la convolution impossible. De nombreux articles ont donc cherché des solutions et l'une d'elle est le changement de la structure des données. Les données sont réorganisées soit en voxels, soit en multi-vues 2D. Cette structuration permet d'avoir un voisinage défini et donc d'appliquer des réseaux de neurones convolutifs comme en 2D. Cependant ces méthodes demandent un temps de calcul considérable et une mémoire. Une autre approche a donc été étudiée avec notamment l'algorithme PointNet de Qi et al. (2017a) qui est la référence en classification 3D. Celui-ci a été le premier à prendre directement un nuage de points en entrée sans en changer sa structure. Il intègre notamment une opération de pooling symétrique qui est invariante à l'ordre des points ; cependant, il tient peu compte de l'échelle locale. De nombreux autres algorithmes ont alors suivi pour résoudre ce problème dont PointNet++ de Qi et al. (2017b) et PointCNN de Li et al. (2018).

Notons qu'il existe une librairie Pytorch, appelée Kaolin, développée par Murthy et al. (2019) de la société NVIDIA, disponible en open source regroupant plusieurs de ces classifieurs. Kaolin a été optimisé et permet de créer un modèle et de le tester avec un minimum de lignes. Parmi les méthodes intégrées, on retrouve PointNet et PointNet++.

## 3. Méthodes envisagées et testées

Tous les algorithmes testés ont leur répertoire disponible gratuitement sur GitHub, au moins pour une version d'évaluation ; ils sont donc tous faciles d'accès mais leur installation peut se révéler laborieuse et nécessiter des environnements informatiques spécifiques.

La première méthode étudiée est la forêt d'arbres décisionnels depuis l'implémentation de CGAL. Cette librairie est écrite en C++ et fonctionne sur CPU. Si elle est disponible sur Linux, nous avons utilisé sa distribution Windows dans l'environnement de développement Microsoft Visual Studio. Grâce au fichier exécutable exemple pour la fonction de classification disponible sur le GitHub et l'aide d'un développeur de GeometryFactory, plusieurs tests ont pu être menés avec différents paramètres. Il conviendra par la suite de créer un modèle rassemblant tous ces paramètres optimaux. Par ailleurs, nous essaierons de l'adapter sur un nuage du centre-ville de Lyon sans LIDAR.

La deuxième méthode envisagée a été PointNet++ depuis Kaolin, écrit en Python et disponible uniquement sur Linux avec une carte graphique NVIDIA. Cependant, malgré les contacts pris avec NVIDIA, le manque de documentation à propos de la segmentation a rendu son utilisation très difficile. Il a donc fallu mettre de côté cette solution par manque de temps. L'utilisation d'une autre implémentation de PointNet ou de PointNet++ a été envisagée mais le même problème se posait.

Enfin, la troisième méthode envisagée, PointCNN, est actuellement en phase d'étude. Ce répertoire Python nécessite également le système d'exploitation Linux et une carte graphique NVIDIA. Plusieurs exemples sont cette fois-ci disponibles, notamment avec une base de données destinée à de la segmentation. Il est donc probablement exploitable mais nous sommes encore en phase d'adaptation du code et de nos données à la configuration de l'ordinateur. Au vu des nombreuses difficultés rencontrées pour sa mise en place et notamment les versions requises de Python, tensorflow, CUDA etc., un résultat n'est pas garanti pour le moment. Si nous réussissons à en avoir un, nous n'aurons malheureusement pas le temps d'en tester les paramètres mais ils restent très facilement modifiables. De nouveaux essais pourront ainsi être menés par l'entreprise dans le futur.

#### 4. Résultats obtenus avec la forêt d'arbres décisionnels

Les tests avec l'algorithme de forêt d'arbres décisionnels de CGAL ont été réalisés sur le nuage de points de Bordeaux provenant de données LIDAR et photogrammétriques. Les quatre classes étudiées sont : bâtiment, sol, arbre et autre, représentant respectivement 79 %, 15 %, 1 % et 4 % du nuage de points initial. La densité est alors de 100 points/m<sup>2</sup> et la surface totale de 100 ha.

Pour tester cet algorithme et l'adapter au mieux à nos besoins, il est possible d'influer sur les entrées, c'est-à-dire les données d'entraînement et de tests ou de modifier des paramètres dans le processus de classification. Devant le grand nombre de variables et le temps court du stage, nous avons dû en choisir un nombre limité à étudier. Les codes sont ensuite très facilement modifiables pour essayer d'autres variables dans le futur au besoin. Nous avons décidé de considérer toujours les mêmes données : un jeu d'entraînement de 400 000 points (5 ha) et un jeu de test d'un million de points (13 ha). Pour accélérer les tests, nous avons échantillonné le nuage initial. Nous avons préalablement vérifié visuellement que la densité change peu le résultat.

Nous avons testé les paramètres suivants : la prise en compte ou non de la couleur des points, le nombre d'arbres décisionnels, leur profondeur, le nombre d'échelles considérées pour le calcul des caractéristiques des points et enfin la présence ou non d'une régularisation pour lisser la classification.

Paramètre	Valeur	Différence d'exactitude (%)	Bâtiment	Sol	Arbre	Autre
			Différence de précision (%)			
Ajout de la couleur	/	-1	0	0	-1	-2
Nombre d'arbres	20	1	0	0	1	0
	30	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	1	1
	50	0	0	0	1	2
Profondeur des arbres	5	3	-1	-3	-3	23
	10	3	0	-1	11	6
	15	1	0	0	4	1
	20 (défaut)	0	0	0	0	0
	25	-2	0	0	-2	-2
	30	-1	0	0	-1	-2
Nombre d'échelles	2	3	0	-2	19	14
	4	4	1	-2	24	14
	6	-4	1	-1	-3	-3
	8	-8	0	0	-6	-13
Ajout d'une régularisation	/	1	-2	0	4	4

Tableau 1 : Différences d'exactitude globale et de précision par classe selon les valeurs de paramètres

Le tableau 1 récapitule les différences d'exactitude globale et de précision de classe selon les valeurs de paramètres par rapport aux paramètres par défaut. Ces métriques ne sont pas définies au sens topographique mais par les formules classiques établies pour de la classification. Par défaut, il y a 25 arbres avec une profondeur de 20 nœuds, sans couleur ni régularisation, avec 5 échelles. Le résultat est alors visuellement correct (figure 2b) ; l'exactitude globale est de 93 %. Les bâtiments et le sol sont bien reconnus (précisions de 97 % et 95 %). Les petites classes « arbre » et « autre » sont beaucoup moins bonnes (précisions de 6 % et 66 %) et présentent de nombreux faux négatifs et faux positifs. De plus, la variation des paramètres ne permet pas d'avoir de bonnes précisions pour ces classes ; c'est donc un problème de manque de données d'apprentissage et non de paramètres.

### Paramètres :

- Ajout de la couleur : les résultats sont légèrement moins bons. Cela peut s'expliquer par le fait que la campagne de levé s'est effectuée en hiver ; le manque d'ensoleillement et l'absence de feuilles aux arbres rendent une couleur grisâtre à tous les éléments.
- Nombre d'arbres décisionnels : le changement est assez faible et visuellement peu notable cependant il semblerait que 50 arbres donnent le meilleur résultat.
- Profondeur des arbres : visuellement, plus les arbres sont profonds, plus les petites classes sont présentes dans le nuage, même si cela parasite le reste. La profondeur 10 est la mieux adaptée d'après les chiffres et visuellement.
- Nombre d'échelles pour le calcul des descripteurs : le résultat se dégrade très rapidement après six échelles ; le meilleur résultat est obtenu pour quatre échelles.
- Ajout d'une régularisation : le résultat est grandement amélioré visuellement car les points isolés sont supprimés, ce qui donne une apparence plus propre.

La figure 2 présente différents résultats obtenus avec les meilleures valeurs de paramètres. Cependant, un modèle combinant tous ces paramètres optimaux en même temps n'est pas forcément le meilleur car les paramètres ne sont pas indépendants. Il faudra donc choisir avec soin lesquels intégrer dans le modèle final.

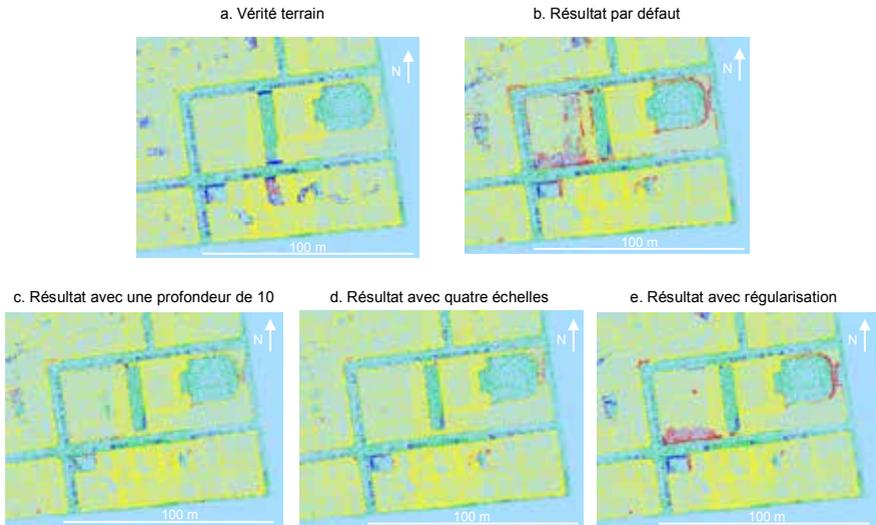


Figure 2 : Vérité terrain (a) et résultats de segmentation (b à e) avec les quatre classes « bâtiment » (jaune), « sol » (vert), « arbre » (rouge) et « autre » (bleu)

## 5. Références

- Breiman, L. (2001). Random forests ; Machine Learning, vol. 45, p. 5-32.
- Li, Y., Bu, R., Sun, M., Wu, W., Di, X. and Chen, B. (2018). PointCNN : Convolution On X-Transformed Points ; Advances in Neural Information Processing Systems, p. 820-830.
- Murthy, K., Smith, E., Lafleche, J.-F., Fuji Tsang, C., Rozantsev, A., Chen, W., Xiang, T., Lebedian, R. and Fidler, S. (2019). Kaolin : A PyTorch Library for Accelerating 3D Deep Learning Research, p. 1-7.
- Qi, C., Yi, L., Su, H. and Guibas, L. (2017a). PointNet++ : Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space ; Advances in Neural Information Processing Systems, p. 5100-5109.
- Qi, C., Su, H., Mo, K. and Guibas, L. (2017b). PointNet : Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation ; Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 77-85.

# Etude des champs d'application du Zeb Revo RT, du Backpack, du Scanner Laser Statique et du Drone avec rendements associés

PFE présenté par : **Jean-Victor Rey**  
Société d'accueil : **Gexia Foncier**  
Directeur de PFE : **M. Sylvain CANTALOUBE**  
Correctrice : **Mme Tania LANDES**  
Encadrant : **M. Emmanuel ALBY**



## 1. Introduction

Depuis plusieurs années, le métier de géomètre est en perpétuel évolution. Nous observons peu à peu que les méthodes dites conventionnelles (tachéomètre, distance-mètre) dénotent quelques faiblesses, lorsqu'elles sont employées pour numériser des objets de grande dimension.

Dans un premier temps, le domaine de l'acquisition de données 3D et leur utilisation se sont démocratisés dans l'univers de la topographie avec l'expansion des moyens de numérisation par techniques lasergrammétriques et photogrammétriques. Parmi ces technologies, on distingue l'apparition des scanners lasers statiques (terrestres) et de la photogrammétrie terrestre ou aérienne. Désormais, ce domaine tend à se diversifier avec l'apparition sur le marché des Scanners Lasers Dynamiques ou encore de la cartographie mobile par LiDAR<sup>1</sup>.

Tout d'abord, notre étude se penche sur les systèmes MMS<sup>2</sup>, et leurs avantages et inconvénients par rapport à une acquisition par scanner laser statique ou par méthode traditionnelle. Leurs fonctionnements sont complexes puisqu'ils utilisent à la fois des LiDAR et d'autres capteurs (Centrales inertielle, caméras, GNSS, odo-mètres...etc.) ainsi que la technologie SLAM<sup>3</sup>. Cette dernière est commune aux deux systèmes MMS que nous analysons dans ce mémoire (Zeb Revo RT et Backpack). L'idée principale du SLAM consiste à estimer l'état général du système. Cet état inclut la position de celui-ci ainsi que celles des différents points de l'environnement. En d'autres termes, le système va devoir reconstituer les données de l'environnement dans lequel il évolue, tout en étant capable de se positionner dans celui-ci grâce aux informations qu'il acquiert. Plusieurs algorithmes SLAM ont été développés. Ces algorithmes sont catégorisés en fonction du type de capteurs et de la nature de l'approche mathématique utilisée. De plus, le choix de la représentation de la carte de l'environnement est une étape importante dans le SLAM.

Les deux systèmes MMS que nous analysons ici proposent des approches différentes. Le Scanner à main ZEB REVO RT a une approche basée sur les caractéristiques géométriques (feature based). Elle va filtrer les données des mesures en ne gardant que les objets remarquables ou primitives géométriques pour se positionner. Les cartes feature-based constituent une représentation compacte de l'environnement. Elles sont néanmoins basées sur l'extraction de caractéristiques connues et prédéfinies, ce qui limite leur utilisation aux environnements structurés et internes. Le backpack bMS3D LD5+ de Viamétris, quant à lui, a une approche basée sur une grille d'occupation (grid-based). La trajectoire est calculée de la même manière que pour le Zeb Revo RT, mais en ajoutant les données GNSS et un algorithme SLAM qui utilise chaque point du nuage. Grâce à l'analyse du nuage de points entier pendant le calcul, le système est capable de calculer une trajectoire très précise. L'inconvénient de cette dernière méthode est qu'elle utilise une grande quantité de mémoire mais elle a l'avantage de pouvoir représenter tous les types d'environnements.

Pour finir, une partie de notre étude porte sur les relevés photogrammétriques par drone, afin de voir dans quelle mesure ils pourraient remplacer ou compléter les méthodes précédentes. Nous analyserons les avantages et inconvénients de ces différents types d'acquisition en termes de rendus possibles, de précisions obtenues et de complexité de mise en œuvre.

<sup>1</sup> Light Detection And Ranging

<sup>2</sup> Mobile Mapping System

<sup>3</sup> Simultaneous Localization and Mapping

## 2. Matériels

Figure 1 : Appareils étudiés

<p style="text-align: center;"><b>Scanner Laser Statique TX5 (Trimble)</b></p>  <p>Fonctionnement : Différence de phase</p> <p>Portée maximale : 120 m</p> <p>Cadence de mesures : 976 000 pts/sec</p> <p>Bruit de mesure : 2 mm à 25 m</p> <p>Poids : 5 kg sans trépieds</p> <p>Appareil photo pour colorisation de la donnée</p> <p>Pas de géoréférencement direct</p>	<p style="text-align: center;"><b>Scanner Laser à main Zeb-Revo RT (Géomesure)</b></p>  <p>Technologie : SLAM (Feature Based)</p> <p>Portée maximale : 30m (intérieur)/ 15m (extérieur)</p> <p>Cadence de mesures : 43 200 points/sec</p> <p>Bruit de mesure : 1 cm à 10 m</p> <p>Poids : 1kg sans l'ensemble disque dur-batterie</p> <p>Caméra embarquée type GoPro</p> <p>Pas de géoréférencement direct</p>
<p style="text-align: center;"><b>Backpack bMS3D LD5+ (Viamétris)</b></p>  <p><b>Composition du système :</b></p> <p><u>Camera LADYBUG 5+</u> 30 Mpx réglable à 6 optiques</p> <p><u>2 Lidar VLP16</u> avec une cadence de 300 000 pts/sec</p> <p><u>Centrale inertielle</u> et système <u>GNSS</u></p> <p><b>Caractéristiques :</b></p> <p>Technologie : SLAM (Grid Based)</p> <p>Portée maximale : 60 m</p> <p>Bruit de mesure : 1 cm à 10 m</p> <p>Poids : 13,5 kg avec batterie</p>	<p style="text-align: center;"><b>Drone Phantom 4 pro (dji)</b></p>  <p><b>Caractéristiques du système :</b></p> <p>Poids : 1388 g</p> <p>Autonomie : environ 30 minutes</p> <p><b>Caractéristiques appareil photo :</b></p> <p>Focale : 8,8 mm</p> <p>Taille du capteur : 8.8 * 13.2 mm</p> <p>Pixels effectifs : 20M</p> <p>Angle d'ouverture : 84 °</p>

### 3. Données et méthodes

Durant cette étude, les données provenant de deux zones vont être utilisées (Corps de rue (zone1) et zone semi-urbaine (zone2)). Chaque zone possède des particularités différentes et va permettre de distinguer les performances de chaque appareil. La partie corps de rue est située dans une zone urbaine très dense. C'est une route à double voies, très fréquentée par les automobilistes. La seconde zone est un large espace de 8 ha située en périphérie de la ville de Toulouse. Elle possède de grands bâtiments industriels, des bâtiments classiques (type bureau) mais aussi de grands espaces de stockage.



Figure 2 : Zones tests

#### 3.1 Relevé des données de références au Scanner Laser Statique

Le scanner laser statique est bien plus précis qu'un système mobile et les données acquises via celui-ci nous serviront de données de référence.

Tout d'abord, une portion de 350 mètres de route (zone1) a été relevée au scanner laser statique. 22 stations ont été réalisées (approximativement 15 mètres entre chaque station.) Les scanners étaient positionnés au milieu de la route. Cela permettait de déceler les limites de propriétés et bâtiments en bordure. Le relevé plus détaillé d'une façade a été effectué, en complément.

Ensuite, essentiellement des relevés d'intérieurs ont été réalisés sur la zone semi-urbaine (zone2). Nous avons scanné : une partie d'un grand bâtiment industriel, un autre bâtiment industriel plus petit avec un grand espace ouvert et le rez-de-chaussée d'un bâtiment classique type bureau.

#### 3.2 Test du Zeb Revo RT

Pour la zone 2, une seule partie de la route a été sélectionnée pour le test. Elle se composait d'une portion comprenant peu d'objets caractéristiques et d'une autre portion avec de nombreux amers tel que des voitures sur un parking, des murs et des arbres. La 1ère méthode était de tester s'il était possible de ne réaliser qu'une seule boucle pour relever 150 mètres de linéaire. La 2ème méthode était de réaliser plusieurs boucles. Préalablement des objets remarquables (sac à dos, plots de chantier en amont et aval de la boucle) ont été positionnés au bord et milieu de la route. La 3ème méthode était de réaliser une boucle en se servant des deux côtés de la voie. De plus, le relevé d'une façade a été expérimenté.

Ensuite, le Zeb Revo RT a été testé dans des bâtiments industriels de la zone 2. Nous allons ainsi voir si cet appareil est adapté pour des grands bâtiments avec espaces ouverts. Pour finir, un bâtiment classique type bureau a été relevé.

#### 3.3 Test du Backpack bMS3D LD5+

Dans la zone 1, un linéaire de 750 m de la route a été relevé. L'opérateur a utilisé une trottinette électrique pour se déplacer ce qui a permis d'opérer en très peu de temps. Des points de calages ont été répartis sur la route grâce à une campagne de mesures GPS et tachéométrique.

Dans la zone 2, une grande partie de la zone industrielle a été mesurée. Une boucle, cette fois-ci à pieds, a été effectuée pour mesurer une grande partie de l'extérieur et deux grands bâtiments industriels. Ensuite, deux boucles ont été nécessaires pour mesurer un petit bâtiment type bureau. Cela nous a permis notamment de tester les limites du backpack pour des relevés d'intérieurs.

### 3.4 Test du drone Dji Phantom 4 Pro

D'une part, nous avons réalisé une campagne photogrammétrique pour calibrer la caméra de l'appareil. Des cibles papiers ont été disposées sur le mur d'une pièce et relevées en coordonnées locales au tachéomètre. Un jeu de photo a ensuite été effectué avec la caméra du drone.

D'autre part, nous avons réalisé une campagne photogrammétrique de la zone industrielle (zone2). Deux plans de vols ont été réalisés avec une altitude de vol à 50 mètres d'altitude et caméra inclinée à  $-90^\circ$ . Chaque campagne a produit environ 270 photos avec un recouvrement latéral et longitudinale de 80 %. Des cibles (Ground Control Points et Check Points) ont été disposées au sol de façon homogènes sur le terrain et mesurées au GPS dans le système de coordonnées Lambert 93-CC43. De plus, les emplacements et hauteurs des bâtiments ont été mesurés au tachéomètre dans l'optique de fournir une orthophoto vraie du site.

## 4. Résultats

Aux vues des différentes expériences réalisées, nous pouvons déjà établir des premières conclusions sur la partie des relevés sur le terrain.

Pour les relevés d'intérieurs, le Backpack bMS3D LD5+ aura tendance à mieux fonctionner dans de grands bâtiments industriels et bâtiments à espaces ouverts que le Zeb Revo RT. En revanche, pour des bâtiments classiques avec des petits espaces (type bureau), le Zeb Revo RT arrivera mieux à se localiser et sera plus pratique. En effet, la portée minimale du système backpack étudié est de 1 m. Autrement dit, en dessous de cette distance, il n'y aura pas assez de points pour nourrir l'algorithme. On rappelle que ce dernier repose sur l'analyse entière du nuage de points contrairement au Zeb Revo RT qui lui repose sur l'analyse des caractéristiques géométriques.

Pour les relevés extérieurs, le backpack fonctionne très bien dans des milieux à ciel ouvert. Il n'y a eu aucun problème de calcul de trajectoire pour la zone semi-urbaine. Pour le relevé de corps de rue, il a été nécessaire de contraindre le calcul de la trajectoire avec des points de recalages (géoréférencés par méthodes traditionnelles) car la réception GNSS était affaiblie à causes des bâtiments et de la végétation. Le Zeb Revo RT quant à lui reste peu adapté pour des relevés en extérieur. Il souffre du manque d'amers et de la forte circulation automobile pour le relevé du corps de rue. Enfin, le drone a permis de réaliser une campagne photogrammétrique complète de la zone semi urbaine en quelques minutes. En revanche, les différentes lois et restrictions imposées pour les survols rendent l'utilisation du drone assez complexe.

## 5. Conclusion

Le but de l'étude était de tester et comparer des nouvelles technologies récentes d'acquisition de données 3D en vue d'améliorer la productivité de l'entreprise Gexia Foncier. L'entreprise Gexia s'est peu à peu tournée vers le domaine de la 3D avec l'acquisition, dans un premier temps, d'un Scanner Laser Statique TX5 de Trimble en 2013 et, dans un second temps, du Scanner Laser Dynamique Zeb Revo RT de GéoSLAM en 2018. Le Scanner Laser Statique est utilisé par l'entreprise pour des relevés d'intérieurs, relevés de façades et relevés architecturaux. Le Zeb Revo RT, quant à lui, est essentiellement exploité pour la copropriété. Il permet d'effectuer des relevés d'intérieurs demandant un rendu d'une moins bonne précision que ce que ne pourrait l'être si l'on utilisait un scanner laser statique. L'un des enjeux était de tester son comportement dans un milieu extérieur comme le corps de rue. Le système backpack n'a pas été encore acquis par l'entreprise. Grâce à des démonstrations de l'entreprise Viamétris, nous avons pu tester et comprendre cette technologie. Cette dernière s'inscrit dans un but d'amélioration de la productivité de l'entreprise avec la réalisation de relevés extérieurs rapides pour l'élaboration de plans de corps de rue, plans d'alignements, plans topographiques et pour des relevés d'intérieurs. Cet outil a donc un aspect complet qui permettrait à l'entreprise d'accroître son activité et de remplacer ou compléter les relevés topographiques classiques en extérieur et/ou intérieur. En somme, le but était de tester cet appareil dans un milieu urbain (corps de rue), milieu semi-urbain (bâtiments, zones de stockages, zones vertes) et pour des relevés d'intérieurs. La photogrammétrie par drone n'est pas un domaine exploité par Gexia Foncier. L'enjeu était de guider l'entreprise dans ce domaine pour réaliser des plans topographiques, orthophotographies, ou encore renseigner des hauteurs de toiture en complément d'un relevé de façade au scanner laser statique. Le drone a été testé dans un milieu semi-urbain.

Au final, nous avons pu comparer ces différentes technologies entre elles en étudiant les différents champs d'applications et rendements de ces appareils afin de guider l'entreprise dans ces futurs investissements.

# Apport des informations thermiques, de couleur et d'intensité pour la détection automatique d'ouvertures dans des nuages de points.

PFE présenté par : **Leyla ROY**  
Société d'accueil : **Laboratoire ICUBE, Unistra**  
Directrice de PFE : **Hélène MACHER**  
Correctrice : **Tania LANDES**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

La détection automatique d'ouvertures trouve son importance dans plusieurs domaines. Les travaux réalisés par (Hoegner and Stilla, 2009) ont montré que les ouvertures représentaient un obstacle pour l'identification de défauts sur la façade. Il est donc nécessaire de les détecter et les extraire afin d'améliorer la précision de l'inspection thermique. La détection des ouvertures peut également jouer un rôle important dans le processus de consolidation des nuages de points, lorsque ce dernier n'est pas réalisable (acquisitions faites par différentes méthodes, positions différentes des cibles, environnements intérieurs et extérieurs etc...). Les fenêtres peuvent donc servir de points d'intérêt permettant la consolidation quel que soit le mode d'acquisition, le moment ou la configuration de la scène. Enfin, les ouvertures représentent un certain niveau de détails sur les bâtiments. Leur extraction permet la détermination des coordonnées de leurs points d'insertion, permettant d'alimenter les maquettes numériques.

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans la continuité de mon projet de recherches technologiques, Roy, L. (2020). Au cours de ce dernier, l'enjeu était d'élaborer un algorithme permettant, à partir des informations géométriques, d'extraire les ouvertures et de déterminer automatiquement les coordonnées de leur point d'insertion. Le point d'insertion a été défini comme étant le point central du dormant inférieur de la fenêtre, comme illustré par le point rouge sur la figure 1. Les objectifs principaux de ce projet sont, d'une part d'utiliser les informations thermiques, de couleur et d'intensité pour détecter les ouvertures, et d'autre part, d'améliorer la détection des points d'insertion en compensant les coordonnées détectées. La façade utilisée pour effectuer les différents tests est représentée sur la figure 2. Tous les éléments de la façade sont référencés dans le système planimétrique RGF93 CC48 et le système altimétrique NGF IGN 69.



Figure 1: Illustration sans échelle du point d'insertion défini



Figure 2: Illustration de la façade d'étude du musée zoologique de Strasbourg.

## 2. Détection des ouvertures

La détection des ouvertures a fait l'objet d'un développement de 2 méthodes : La méthode d'égalisation d'histogrammes et celle de la classification par plus proches voisins. La figure 3 illustre les grandes étapes de la chaîne de traitement mise en place durant ce projet.

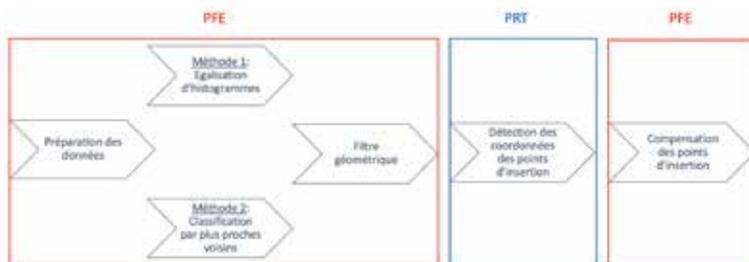


Figure 3: Illustration des grandes étapes de la chaîne de traitement mise en place.

### 2.1 La préparation des données

Ce processus est scindé en 3 grandes étapes. La première consiste à effectuer un changement de repère par la méthode PCA<sup>1</sup> dans le but de positionner le long de la façade parallèlement à l'axe des abscisses afin de faciliter les calculs à partir des coordonnées. La deuxième étape ne concerne que les nuages acquis par lasergrammétrie. Elle vise à réduire l'influence de l'angle d'incidence du faisceau laser dans la détection des fenêtres en éliminant tous les points pour lesquels l'angle est supérieur à 65° horizontalement et verticalement. Enfin, la dernière étape a pour but de regrouper les points d'un même nuage selon les différents plans détectés. En effet, sur une façade, il est souvent possible de distinguer plusieurs plans caractérisés par différentes profondeurs. Ainsi, il est nécessaire de les identifier afin d'améliorer la détection des ouvertures.

### 2.2 Les méthodes d'extraction des fenêtres

Comme annoncé précédemment, 2 méthodes de détection des fenêtres ont été mises en place durant ce projet. La première méthode consiste à égaliser les histogrammes des informations étudiées afin d'améliorer le contraste et favoriser l'extraction des ouvertures comme illustré sur la figure 4.

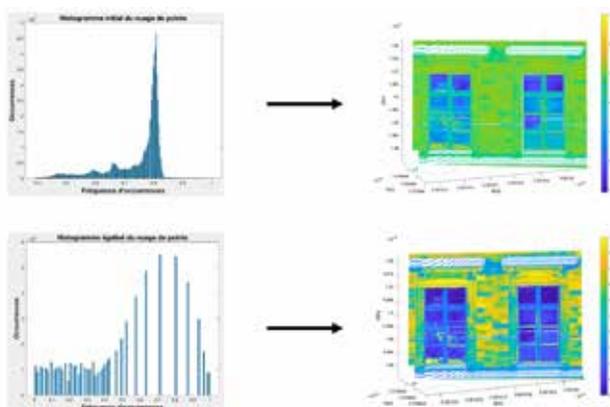


Figure 4: Illustration du principe de l'égalisation d'histogrammes à partir de l'intensité laser

<sup>1</sup> PCA : Principle Component Analysis

La seconde méthode vise à classifier les points du nuage en les regroupant selon différentes régions. Elle est basée sur le calcul de distances en prenant en considération les comptes numériques. Les distances peuvent être calculées selon une ou plusieurs dimensions. En effet, en utilisant l'intensité laser, la distance sera calculée selon une simple soustraction. En revanche, en utilisant les informations colorimétriques, la distance euclidienne sera calculée à partir de 3 composantes (R,G,B) ou (H,S,V).

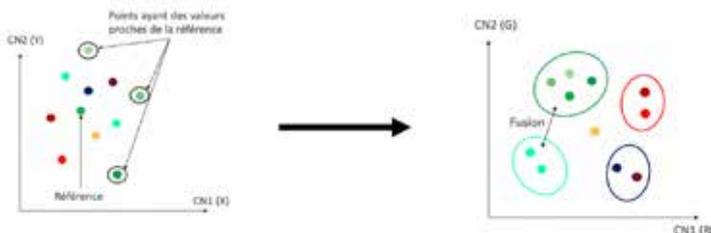


Figure 5: Illustration du principe de la classification par plus proches voisins. (Gauche) Position des points dans l'espace géométrique (X,Y), (Droite) Position des points dans l'espace colorimétrique (R,G).

### 2.3 Le filtre géométrique

Les informations de couleur et d'intensité dépendent fortement de plusieurs paramètres. Ainsi, dans la majorité des cas, l'utilisation unique de ces informations n'est pas suffisante pour extraire correctement les fenêtres. Lorsque cela est possible, la géométrie sert de complément pour affiner la détection. Le filtre géométrique appliqué se base sur l'étude des histogrammes des nuages de points et plus particulièrement sur la profondeur, caractérisée par la composante « y ». L'objectif est de déterminer dans un premier temps le plan moyen représentant le mur de la façade, et de récupérer ensuite les points appartenant aux fenêtres se trouvant théoriquement derrière le mur.

## 3. Résultats de la détection des ouvertures

Les résultats de la détection des fenêtres issus des informations de couleur et d'intensité sont présentés sur la figure 6. On remarque que l'intensité a permis de détecter un plus grand nombre de fenêtres que la couleur. En effet, sur la façade utilisée pour réaliser les tests il n'y a pas de différence marquée de couleur, figure 2. Ainsi, il est difficile de classifier les points. En revanche, l'histogramme d'intensité présente un pic parfaitement défini qui peut être assimilé à une forme gaussienne. Après égalisation, l'amélioration du contraste fait ressortir les fenêtres pour une meilleure détection.

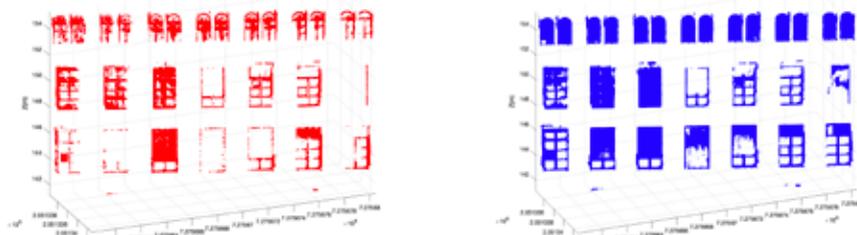


Figure 6: (Gauche) Résultat de la détection à partir de la classification par plus proches voisins utilisant les valeurs HSV, (droite) Résultat de la détection d'ouvertures à partir de l'égalisation d'histogrammes utilisant les valeurs de l'intensité laser.

Après avoir étudié les informations séparément, je me suis intéressée à la possibilité de combiner les résultats obtenus dans l'objectif d'améliorer la détection. Le principe est de définir un nuage de référence et un nuage secondaire puis de rechercher, par le biais d'une croissance de région, tous les points du nuage secondaire correspondant aux fenêtres permettant de compléter le nuage de référence. Le résultat est illustré sur la figure 7.

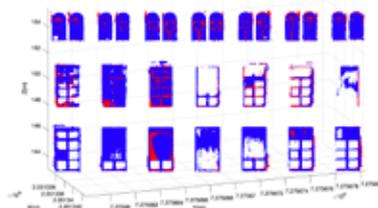


Figure 7: Combinaison des résultats illustrés en figure 6.

#### 4. La compensation des points d'insertion

La méthode permettant de déterminer les coordonnées des points d'insertion a été développée durant mon projet de recherches technologiques, Roy, L. (2020). Elle est basée sur le calcul de l'intersection de trois plans dans l'espace, correspondant aux plans verticaux des rebords gauches et droits de chaque fenêtre, au plan vertical principal de chaque fenêtre et au plan horizontal déterminé pour chaque étage. L'intersection de ces plans nous fournit les coordonnées des points intermédiaires, c'est-à-dire les points des rebords inférieurs de chacune des fenêtres. Le calcul de la moyenne arithmétique permet d'obtenir les points d'insertion recherchés. Afin d'améliorer la précision et l'exactitude de ces points, je me suis intéressée à leur compensation dont le calcul a été réalisé par la méthode des intermédiaires, utilisant le principe des moindres carrés, visant à minimiser les écarts de distances entre les points d'insertion sur chacun des étages. Voici le résultat visuel de la position des points avant et après la compensation.

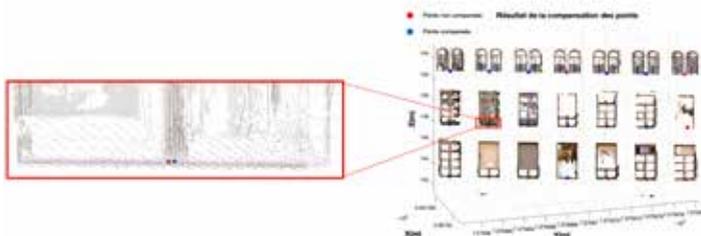


Figure 8: Résultat de la compensation des points d'insertion

#### 5. Conclusion et perspectives

Rappelons que les objectifs principaux de ce projet de fin d'études étaient d'extraire automatiquement les ouvertures dans un nuage de points à partir des informations thermiques, de couleur et d'intensité, afin de déterminer par la suite, les coordonnées des points d'insertion de chaque fenêtre et de les compenser. Comme expliqué ci-dessus, la détection des ouvertures a été développée selon 2 méthodes. La première est celle de l'égalisation d'histogrammes, utilisée lorsque l'histogramme présente un pic bien défini et que la courbe peut être assimilée à une gaussienne, comme celle de l'intensité laser. La seconde méthode est la classification par plus proches voisins, utilisée avec les informations de couleur. La détermination des points d'insertion a fait l'objet d'une compensation en se basant sur le principe des moindres carrés. L'analyse qualitative des résultats présentés ci-dessus ainsi que l'étude de la thermographie sont actuellement en cours de réalisation et seront présentés dans le mémoire et lors de la soutenance.

#### 6. Références bibliographiques

- Hoegner, L., and Stilla, U. (2009), 'Thermal leakage detection on building facades using infrared textures generated by mobile mapping', 2009 Joint Urban Remote Sensing Event (June). doi:10.1109/URS.2009.5137681.
- Roy, L. (2020) 'Mise à profit de nuages de points intérieurs / extérieurs pour la détection automatique de fenêtres', *Projet de recherches technologiques, INSA Strasbourg*.

# Maquette numérique 3D à l'échelle de la ville : Mise en place d'un processus de production automatisé



*PFE présenté par :* **Victor MARTIN**  
*Société d'accueil :* **ATGT Géomètre-Expert**  
*Directeur de PFE :* **Romain SALICIS**  
*Tutrice de PFE :* **Emma BONHOMME**  
*Correctrice :* **Hélène MACHER**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Le projet de fin d'étude est réalisé au sein de l'agence ATGT Géomètre-Expert de Bobigny (93). Fondée en 1947, ce fut la première société coopérative et participative (SCOP) française dans la profession de géomètre. Avec ATGT Topo3D, ATGT Ingénierie et ATGT SM, cette entreprise compose le Groupe ATGT. Ce groupe, implanté en Ile de France, en région Rhône Alpes et Provence Alpes Côte d'Azur, est l'un des plus importants cabinets de géomètre de France. Il est donc en perpétuel recherche d'évolution dans les domaines des nouvelles technologies, et notamment dans les domaines de l'acquisition et du traitement de données 3D. Conscient de l'intérêt grandissant que portent différents acteurs du quotidien sur la donnée 3D, le groupe ATGT a déjà acquis un grand nombre de compétences dans ce domaine. Son savoir-faire dans la réalisation de maquettes numériques, que ce soit de bâtiments ou encore d'infrastructures, est déjà reconnu. Le groupe souhaite désormais élargir son domaine de compétences et réaliser des maquettes numériques à l'échelle du territoire.

En effet, depuis maintenant quelques années, ce produit géospatial est en constante demande. Les collectivités sont aujourd'hui confrontées à de multiples enjeux, qu'ils soient sociaux, politiques, environnementaux ou économiques. Elles ont besoin d'une vision globale de leur territoire pour mieux le gérer. C'est dans ce contexte que la Smart City ou ville intelligente se développe et les incite de plus en plus à se procurer l'élément de base de ce concept : le socle 3D de leur ville.

De nombreuses villes comme Lyon, Strasbourg ou encore Rennes sont déjà équipées de jumeaux numériques de leur ville. D'autres villes vont vouloir à leur tour obtenir le leur. Parmi elles, certaines ne possèdent pas de service ayant la capacité de produire cette donnée et font appel à des entreprises capables de réaliser cette prestation. Cette demande se fait bien évidemment par étapes. Le contenu de cette première demande concerne la plupart du temps la production des bâtiments sur la zone d'intérêt au format CityGML. C'est pourquoi nous nous intéresserons uniquement à cet élément au cours de ce projet.

Malgré le développement des moyens d'acquisition (drone, Lidar, mobile-mapping, ...) permettant désormais d'acquérir une grande quantité de données spatiales de manière précise en peu de temps, la maquette urbaine demeure assez chère à produire. C'est pour cela que **cette étude vise à mettre en place un processus automatisé, afin de limiter le temps « humain » et ainsi réduire les coûts de production. Nous nous concentrerons principalement à la recherche de solutions permettant la reconstruction 3D des bâtiments.** Cette dernière **se fera à partir d'un nuage de points Lidar préalablement classifié et segmenté.** En effet, c'est actuellement l'une des meilleures solutions pour le traitement automatique de données à grande échelle.

Afin de pouvoir réaliser les tests nécessaires à l'étude, l'entreprise avait à disposition un jeu de données complet sur la commune de Cergy-Pontoise acquis lors d'un précédent marché remporté en 2018. Il est principalement composé d'un nuage de points Lidar d'une densité moyenne de 8 pts/m<sup>2</sup>, d'images aériennes provenant de caméras verticales et obliques, du résultat de

l'aérotriangulation et encore d'orthophotographies. De plus, l'entreprise possède un échantillon de lignes de toits obtenues par stéréo-restitution.

## 2. Mise en place du processus de production automatisé

La maquette numérique urbaine s'étend à l'échelle du territoire et permet de nombreux usages. L'échelle de cette maquette implique un nombre important de données. Pour une meilleure gestion et surtout une bonne interopérabilité, le format CityGML a été développé en 2002 par les membres de Geodata Infrastructure Rhénanie-du-Nord-Westphalie en Allemagne. Ce format est actuellement considéré comme le format de référence pour l'échange et la représentation de modèles de villes. Il est constamment demandé par les clients dans leurs appels d'offres et c'est pour cela qu'ATGT GE a décidé de s'y intéresser.

Une des particularités du CityGML est qu'il permet une gestion multi-échelles, c'est-à-dire qu'il permet une modélisation à différents niveaux de détails (LoD). Il en existe cinq, variant d'une simple représentation 2D de l'emprise au sol à la modélisation complète et détaillée de type « BIM » des bâtiments. Nous nous intéresserons ici à la modélisation au niveau de détails LoD2, ce qui correspond à une représentation des bâtiments avec leurs structures de toits.

Au terme de mes recherches de solutions logicielles, nous nous sommes orientés vers certaines d'entre-elles afin de développer notre processus de production automatisé. Ce dernier a été mis en place à la suite des différents tests réalisés au cours de cette étude. Ces derniers ont été principalement réalisés sur un échantillon du nuage de point Lidar de Cergy-Pontoise, acquis par ATGT Géomètre-Expert lors d'un précédent marché datant de 2018. Ces tests ont permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de certains logiciels. Ils ont également permis de fixer les limites de la modélisation automatique à partir de données Lidar.



Figure 1 : Processus de production des bâtiments en CityGML

La première étape du processus consiste à découper le nuage de points Lidar en plusieurs blocs. Ce découpage peut être réalisé selon les souhaits du client. Lors des tests, nous avons découpé le nuage selon les sections cadastrales. Cela permet notamment de réduire le nombre de points par bloc et par conséquent de réduire le temps de calcul. Par la suite, nous pourrions nommer les bâtiments grâce à ces mêmes sections. Ensuite, nous avons mis en place une macro permettant d'exécuter l'outil de vectorisation des lignes de toits sur plusieurs blocs en même temps. L'analyse des résultats obtenus sur plusieurs échantillons provenant de nuages de points différents nous a permis de conclure que la modélisation des bâtiments à la géométrie complexe n'était pas satisfaisante.

Nous allons donc, lors de la deuxième étape, filtrer les bâtiments et ne conserver que les bâtiments à la géométrie simple, c'est-à-dire ceux composés au maximum de quatre pans de toit. Les modèles de bâtiments restants sont ensuite modifiés puis contrôlés automatiquement à l'aide de scripts. Ce contrôle va permettre de mettre en évidence les erreurs de modélisation en comparant le

nuage de points et le maillage des toitures. Pour cela, nous calculons la distance qui sépare chaque point du nuage au polygone de toit le plus proche. Cela nous permet également d'obtenir des informations sur la qualité de notre modélisation, afin de pouvoir garantir une certaine précision au client. Nous pourrions ensuite rectifier en stéréo-restitution les modèles erronés, ainsi que restituer les bâtiments complexes. De plus, la densité du nuage n'étant pas assez grande, la restitution des éléments de toits se fera également par stéréo. Une fois l'ensemble des lignes de toits regroupées, nous y affectons des attributs. Ces derniers peuvent être nécessaires à la modélisation par la suite, ou contenir des informations sur les bâtiments selon les souhaits du client.

L'étape suivante est la modélisation finale des bâtiments à l'aide d'un processus de maillage automatisé. Celui-ci se base sur les lignes de toits et reconstruit les façades en réalisant une extrusion du haut vers le bas. Quand les bâtiments sont entièrement reconstruits, nous appliquons une texture à l'aide d'un outil automatique. Celui-ci a besoin des images verticales et obliques, ainsi que du résultat de l'aérotiangulation. Il détermine ainsi quelle image est la mieux positionnée et orientée pour chaque façade. Une fois cette étape réalisée, nous réalisons l'export au format CityGML des bâtiments. Cet export peut se faire bâtiment par bâtiment ou alors d'un seul bloc.

La dernière étape de ce processus est le contrôle final. Comme pour le premier contrôle, nous le réalisons à l'aide d'un script mis en place au cours de l'étude. Cette fois-ci, nous comparons le nuage de points Lidar aux bâtiments CityGML. Nous pouvons obtenir la précision globale de nos bâtiments CityGML. Cette précision concerne la modélisation par rapport au nuage de points mais ne prend pas en compte celle de ce dernier.

### 3. Principaux résultats obtenus

Afin de réaliser les tests nécessaires à l'étude, nous avons sélectionné un échantillon du nuage de points Lidar de Cergy-Pontoise qui était à notre disposition. La zone concernée a l'avantage d'être composée de bâtiments géométriquement différents (bâtiment type tour HLM à toit plat, bâtiment de zone commerciale, maison simple à deux pans de toits, ou encore maison complexe à plus de quatre pans de toits par exemple).

La vectorisation des bâtiments à partir du nuage de points Lidar est une des étapes qui a été le plus difficile à mettre en place. En effet, après de nombreux tests réalisés sur des échantillons de points, nous avons remarqué que l'outil sélectionné n'arrivait pas à reconstruire correctement les bâtiments géométriquement complexes. Le tableau ci-dessous présente notamment les principales erreurs de modélisation que l'on retrouve assez souvent sur les bâtiments.

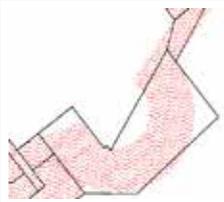
Types d'erreurs	Mauvaise modélisation globale d'un bâtiment complexe	Mauvaise détection des bâtiments arrondis	Mauvaise détection des superstructures de toit
Illustration sur notre échantillon			

Tableau 1 : Récapitulatif des principales erreurs de modélisation observées

Comme expliqué précédemment, nous allons donc conserver les bâtiments géométriquement simples, c'est à dire ayant moins de quatre pans de toits. Puis, nous allons ajuster leur géométrie et les contrôler. Les étapes suivantes du processus consistent à modéliser, texturer et exporter au format CityGML l'ensemble des bâtiments. Nous n'avons pas pu obtenir les lignes de toits provenant de la stéréo-restitution, cependant, nous en avons récupéré sur une autre zone de Cergy-Pontoise. Nous avons ainsi pu tester la fin de notre processus sur ces deux échantillons. La figure 2 représente le résultat final des bâtiments simples générés automatiquement à partir du nuage de points Lidar, tandis que la figure 3 représente les bâtiments complexes en CityGML sans texturation.



Figure 2 : Rendu final des bâtiments simples générés automatiquement



Figure 3 : Rendu final des bâtiments complexes provenant de la stéréo-restitution

#### 4. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de mettre en place un premier processus de production automatisé au sein de la société ATGT Géomètre-expert. Les différentes études et analyses réalisées ont permis de mettre en lumière les difficultés de la reconstruction 3D de bâtiments et les limites de la modélisation automatique à partir d'un nuage de points Lidar de faible densité. Nous avons donc conclu qu'il est encore difficile de se passer de la stéréo-restitution actuellement. Cependant, c'est un premier pas qui a été fait par ATGT et qui a ainsi permis de réduire les coûts de production des maquettes numériques à l'échelle de la ville. De plus, ce processus tend à s'améliorer avec le temps. En effet, le développement continu des solutions de modélisation ainsi que des moyens d'acquisition de plus en plus précis y contribuera.

A l'avenir, plusieurs étapes du processus pourront être améliorées. La plus grande difficulté de ce processus concerne l'étape de la reconstruction 3D des lignes de toits. Plusieurs autres pistes que celle proposée ont été approchées mais pas développées par manque de temps. Par exemple, la reconstruction 3D des lignes de toits pourrait se réaliser à l'aide d'un développement interne qui reprendrait les méthodes que l'on peut retrouver dans des articles scientifiques, ou encore à l'aide d'une autre solution logicielle. Il serait également intéressant de tester la modélisation paramétrique des bâtiments, même si nous avons remarqué en parcourant les appels d'offres, qu'un grand nombre de villes ne souhaite pas de modèles de toit prédéfinis. Nous pourrions également tester la reconstruction des bâtiments à partir d'un nuage de points obtenu par corrélation. Une autre étape à améliorer serait celle du contrôle. En effet, dans notre processus, le contrôle est réalisé à l'aide de scripts permettant de détecter et de détourner les principales erreurs de modélisation. Ces derniers ne permettent pas de détecter toutes les erreurs. Il pourrait alors être intéressant de les optimiser afin de détecter toutes les erreurs possibles ou encore de réduire le temps de traitement.

ATGT Géomètre-Expert possède désormais la capacité de produire et de visualiser des bâtiments au format CityGML à grande échelle. D'autres outils pourront également être développés afin de pouvoir modéliser les autres éléments constituant la maquette comme la végétation, le mobilier urbain ou encore les infrastructures.

# Parameter Estimation for Persistent Scatterer Interferometry using Compressive Sensing



PFE présenté par : **Matthieu Rebmeister**  
Société d'accueil : **IPF – KIT**  
Directeur de PFE : **Prof. Stefan Hinz**  
Correctrice : **Dr. Tania Landes**  
Encadrant : **Dr. Andreas Schenk**



## 1. Persistent Scatterer Interferometry (PSI) via Télédétection SAR

La télédétection SAR (angl. : *Synthetic Aperture Radar*) fait partie des systèmes de mesures actifs depuis plus de 40 ans. Une image SAR est décomposée en pixels contenant chacun un nombre complexe, à savoir une amplitude et une phase. Les satellites SAR reprennent une acquisition de la même zone géographique deux à trois fois par mois en moyenne. La phase est l'information la plus intéressante en géodésie et topographie, car elle contient la notion de distance. Le traitement statistique de la phase interférométrique de plusieurs acquisitions permet ainsi de déterminer les déformations de la zone géographique étudiée. L'ensemble des techniques résolvant ce problème forment la PSI (angl. : *Persistent Scatterer Interferometry*). Cependant, la phase interférométrique ne contient pas seulement l'information de déformation, elle traduit également la topographie du terrain et subit des perturbations liées à la différence des conditions atmosphériques lors des acquisitions. Le modèle utilisé pour la phase mesurée est traduit par l'équation (1), où les indices  $h, v, \alpha$  et  $atmo$  représentent respectivement la hauteur, la vitesse de déformation, la dilatation thermique et l'atmosphère. *Noise* représente le bruit du signal.

$$\phi = \phi_h + \phi_v + \phi_\alpha + \phi_{atmo} + \phi_{noise} \quad (1)$$

Les trois premiers termes du membre de droite contiennent les paramètres à estimer. Ils expriment chacun une relation linéaire entre le paramètre recherché et un paramètre d'acquisition. La relation est linéaire au détail près que la phase observée est pliée (angl. : *wrapped*), ce qui signifie qu'une ambiguïté de  $2\pi$  fait toujours partie de l'observation. Ceci transforme un problème d'apparence linéaire en un problème non linéaire.

Un second problème peut survenir lors de l'estimation : la présence de plusieurs réflecteurs persistants (angl. : *Persistent Scatterer*) dans un pixel. En effet, les modèles d'équations utilisées par les méthodes PSI supposent qu'il n'y a qu'un seul réflecteur dominant par pixel qui retransmet le signal. En revanche, à cause de la géométrie d'acquisition SAR, plusieurs réflecteurs persistants peuvent être présents dans un pixel, ce qui conduit à des estimations souvent fausses en n'en considérant qu'un seul. La reconstruction de tous les points selon la direction d'élévation (représenté par  $s$  sur la Figure 1) est l'objet de la tomographie (angl. : *TomoSAR*). Sur l'exemple de la figure 1 représentant une acquisition en milieu urbain, la bande rouge transparente représente l'information que contient un pixel d'une image SAR. Les flèches bleu sombre représentent le signal émis. Les flèches bleu clair représentent le signal réfléchi tandis que les flèches vertes représentent le signal retransmis et capté par le satellite. Le profil sous la figure représente l'intensité du signal reçu pour une hauteur donnée. La reconstruction de ce profil par analyse de plusieurs scènes SAR est difficile car la géométrie d'acquisition est mal conditionnée. À titre d'exemple, un pixel d'une image acquise par le satellite TerraSAR-X a des dimensions de l'ordre de 3m par 3m. En revanche, pour une base de données typique de TerraSAR-X, la résolution en hauteur ne pourra pas dépasser 15m.

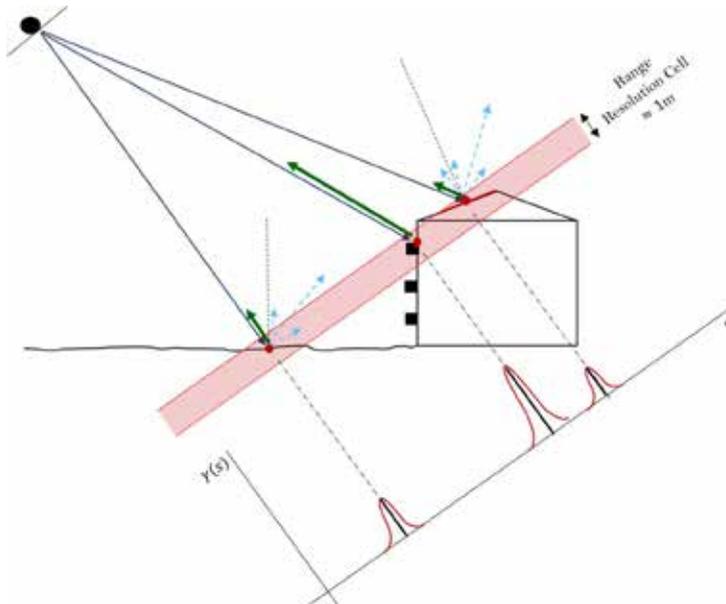


Figure 1 : Représentation d'une acquisition SAR au-dessus d'une zone urbaine.

## 2. Compressive Sensing appliqué au traitement SAR

*Compressive Sensing* est une sous-branche des mathématiques dont l'objectif est de résoudre des systèmes sous-déterminés dont la solution est une matrice ou un vecteur creux. Une structure possédant cette propriété contient beaucoup d'entrées nulles par rapport à sa dimension. La Figure 1 témoigne du caractère creux du profil de réflectivité selon la direction d'élevation lors d'une acquisition SAR. Sur l'exemple, seul 3 entrées du vecteur sont non-nulles.

La quantité associée à un vecteur creux est l'application  $\|\cdot\|_0$  qui correspond au cardinal du support du vecteur auquel cet opérateur est appliqué. En d'autres termes, cette quantité renvoie le nombre d'entrées non-nulles d'un vecteur. La version *Compressive Sensing* d'un problème linéaire du type  $Ax = y$  (où  $x$  est l'inconnue,  $y$  les mesures est  $A$  la matrice de mesure) est traduite par

$$\text{minimiser } \|x\|_0 \quad \text{sujet à } Ax = y$$

Malheureusement, l'application  $\|\cdot\|_0$  n'est pas utilisable pour les calculs numériques car c'est un problème NP-difficile. En pratique, il a été montré que l'utilisation de la norme  $\|\cdot\|_1$  fournit également un résultat creux et une meilleure stabilité numérique. La transformation de l'équation 1 devient :

$$\text{minimiser } \|Ax - y\|_2 + \lambda \|x\|_1 \quad (2)$$

Il existe plusieurs classes d'algorithmes pour résoudre ce problème, distinguables en deux catégories principales : les algorithmes d'optimisation et les algorithmes « gloutons ». Ceux appartenant à la première catégorie sont plus précis mais requièrent plus de temps et de puissance de calcul. Afin de fournir une méthode de calcul rapide, il a été choisi d'utiliser un algorithme de la deuxième catégorie : l'Orthogonal Matching Pursuit (OMP) puis d'affiner la solution de celui-ci.

La matrice  $A$  est obtenue en combinant les trois matrices associées à chaque paramètre, obtenues en discrétisant chaque axe continu le représentant. Par exemple pour la hauteur  $h$ , chaque colonne de  $A$  représente une valeur de hauteur alors que chaque ligne représente un interférogramme. Il est alors

possible de créer trois matrices  $A_h, A_v, A_a$  pour résoudre les systèmes séquentiellement. En revanche, les signaux étant mélangés dans les mesures, il est nécessaire de calculer numériquement les paramètres en une seule inversion. Pour cela une combinaison des trois matrices via le produit transposé de Khatri-Rao est mise en place pour inverser le système de l'équation (2).

### 3. Méthode développée pour l'estimation paramétrique

La méthode développée est une succession d'étapes résumées dans la figure 2.  $D_A$  représente la dispersion d'amplitude qui permet de quantifier de manière approximative le bruit présent dans la phase. Plus ce chiffre est petit, plus le bruit sur la phase est petit et donc le signal de bonne qualité.

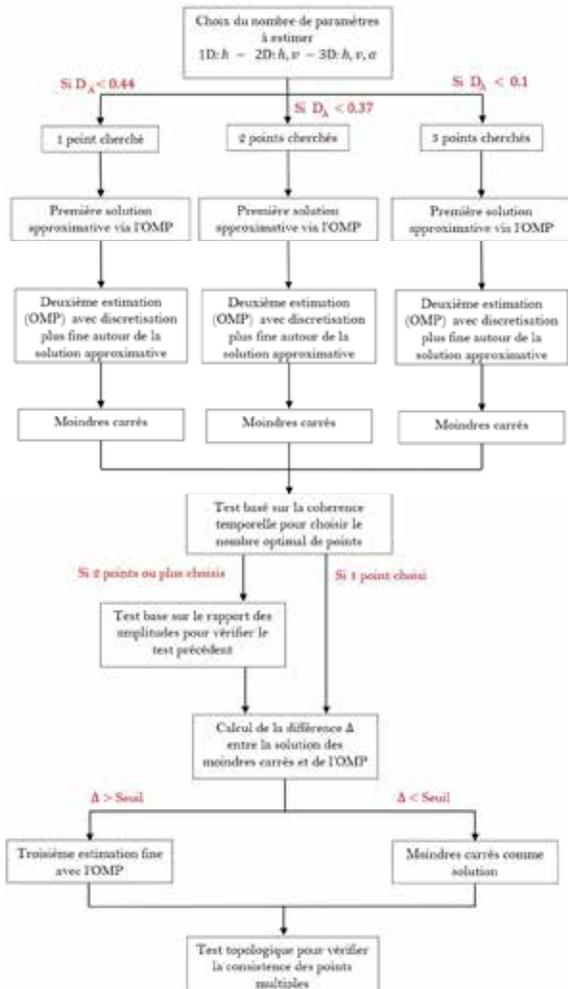


Figure 2 : Diagramme de l'algorithme développé

L'algorithme permet de choisir le nombre de paramètres que l'on souhaite estimer (de 1 à 3). La recherche commence avec l'OMP et une large possibilité de valeur pour chaque paramètre mais avec

une faible résolution. Cette solution est affinée avec une deuxième itération de l'OMP. Cela permet d'avoir une solution approximative précise tout en diminuant le temps de calcul. Puis les moindres carrés sont appliqués pour obtenir une solution optimale. Certains ajustements ont dû être faits car les données SAR sont des données complexes et non réelles. L'étape suivante permet de tester si les valeurs trouvées sont cohérentes avec les mesures par la comparaison des phases observées et reconstruites via les paramètres estimés. Si plusieurs points sont trouvés dans un pixel, le ratio des amplitudes de réflexion calculées permet de constater si les deux points sont significatifs ou non. L'avant dernier test compare l'estimation de l'OMP et des moindres carrés pour vérifier la convergence de cette méthode. En effet, le problème posé étant mal conditionné, les moindres carrés divergent facilement et il est important de s'assurer de la stabilité de l'estimation. Si la différence (OMP – moindres carrés) est trop grande, une troisième itération de l'OMP avec une grille plus fine est utilisée. En effet, l'OMP est plus stable numériquement mais ne fournit que des solutions reposant sur des grilles discrètes alors que les moindres carrés peuvent fournir une solution dans un espace continu. Enfin un test topologique est utilisé pour vérifier la consistance des points multiples trouvés.

#### 4. Applications

L'algorithme développé a été appliqué sur différents types de données : des données simulées ainsi que des données réelles. Les données simulées sont des mesures construites à partir de paramètres connus auxquelles sont ajoutées plus ou moins de bruit (Gaussien). En appliquant l'estimateur à ces données, il est possible de complètement quantifier la performance de l'algorithme. Les performances sur ce type de données ont été très convaincantes. L'écart-type des paramètres trouvés est légèrement supérieur à la borne de Cramér-Rao mais semblable à ce que peuvent fournir d'autres algorithmes.

Le test final a été l'application de la méthode développée sur un ensemble de données acquises au-dessus de la ville de Perth en Australie par le satellite TerraSAR-X. Le résultat a été confronté à un algorithme PSI existant et développé au KIT : M-SBAS. La comparaison montre que l'algorithme développé est plus lent, mais permet de trouver plus de points simples et également des points multiples.

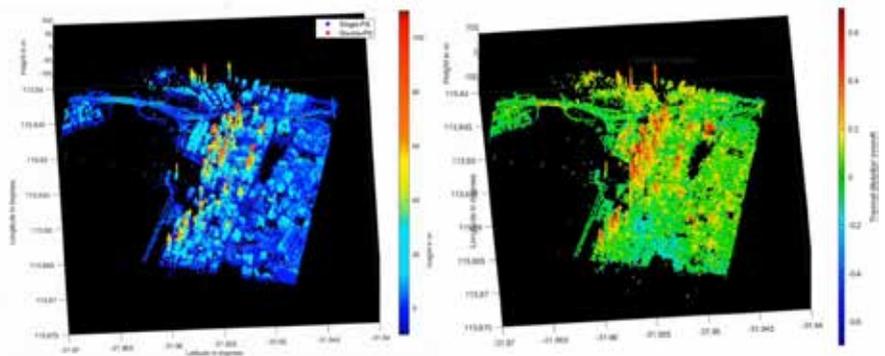


Figure 3 : Hauteur (gauche) et Dilatation thermique (droite) du Central Business District de Perth.

La figure 3 montre deux des paramètres estimés via 79 scènes du satellite TerraSAR-X. Les immeubles et gratte-ciel sont clairement visibles sur la figure de gauche. Il est intéressant de noter que la dilatation thermique est également corrélée à la hauteur. En effet, les hauts bâtiments contiennent plus de métal qui a un coefficient de dilatation thermique élevé.

# Structural deformation monitoring by multitemporal terrestrial laser scanning

Master thesis presented by : **Teresa Bauduin**  
Host company : **Laserscan Berlin 3D Solutions GmbH**  
Reviewer : **apl. Prof. Dr.-Ing. Boris Jutzi**  
Second reviewer : **Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz**  
Advisor : **Dipl.-Ing. (FH) Michael Assig**



## 1. Introduction

### Motivation

TLS are now used for a multitude of different deformation analyses. The monitoring of bridges, floodgates, dams, towers, tunnels, and radio telescopes are typical examples. While the procedure for acquiring laser scans hardly varies between different applications and authors, the evaluation strategy depends very much on the user. There are no signaled single points in two epochs whose difference can be checked for significance. Instead, the deformations are to be derived from two point clouds. Although the point distribution given by this angular grid is repeatable, the exact position of the points on the measured object is not. In any case, preprocessing and modeling of the point cloud is necessary in order to establish point correspondences and to decide whether a deformation exists. How this preprocessing and modeling has to be performed, can only be answered in a very application- and user-oriented way so far. Part of this procedure is the epochal data acquisition and registration if several positions are occupied. Between the epochs, the point clouds must also be registered or georeferenced again to lie in a uniform coordinate system. These processing steps are also decisive for the relevance and significance of deformation analysis.

### Building under investigation

The anti-aircraft towers (flak) were once the most massive bunkers in Berlin. With edge lengths of about 23 m by 50 m (fire control towers, L-towers) and about 70 m by 70 m ( fire turrets, G-towers), they stood out monstrosly from their surroundings with heights of up to 42 m. The anti-aircraft towers in Volkspark Humboldthain were built between October 1941 and April 1942 and partially demolished a few years after the Second World War.

### Goals and issue

Considering the increasing amount of data generated by the TLS, the goal of this thesis is to investigate the most advanced methods for deformation analysis using point clouds. Part of this procedure is the epochal data acquisition and registration since several scan positions are occupied. Between the epochs, the point clouds must be georeferenced to work in a uniform coordinate system. Using a multiscale model to model cloud comparison algorithm (M3C2), point correspondences are formed between the reference epoch and an epoch under investigation to calculate the deformation distances between the point clouds. To each distance an uncertainty is assigned, and thus the deformation can be classified as significant or measurement noise. The last step is the analysis of the results and the possible interpretation of the measured deformation.

### Problem definition

The thesis focuses on the following research questions.

*Is it feasible to use the deformation algorithm M3C2 in the deformation detection for the presented building? Is the registration accuracy sufficient for the deformation analysis? How to assign the normal scale and the projection scale for the M3C2 algorithm? Which deformations can be determined, and which accuracy can be achieved? Can the obtained results reveal a deformation trend?*

## 2. Methods

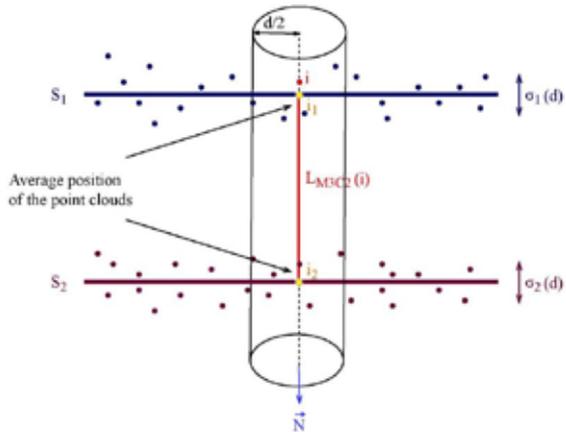
Annual measurements were performed from 2015 to 2019, always in April. E1 corresponds to the reference epoch, measured in 2015. The following epochs (E2, E3, E4, and E5) will be compared only to this reference epoch.

### Multiscale model to model cloud

The measurement noise is disregarded with the closest point distance method, C2C, the point to mesh distance method, C2M, and the mesh to mesh method, M2M. Only a smoothing occurs during point cloud preprocessing or meshing. However, the statements on measurement errors that can be determined from the smoothing are not used in point cloud comparison. This is done in the multiscale model to model cloud (M3C2) comparison, which is implemented exclusively in CloudCompare: several points are combined in a core point, and the scatter around this core point is further used as a measure of the accuracy of the measurement. This stochastic information is also used to check for significant deviations in the point cloud comparison.

Figure 1:  
Calculation of the average distance between the two clouds (in blue the reference epoch and in purple the following epoch) measured at a scale  $d$  along  $\vec{N}$ .

$\vec{i}_1$  and  $\vec{i}_2$  are the average positions of the subset point clouds that intersect with the cylinder.  $L_{M3C2}$  is the local point cloud difference. Adapted from Lague.



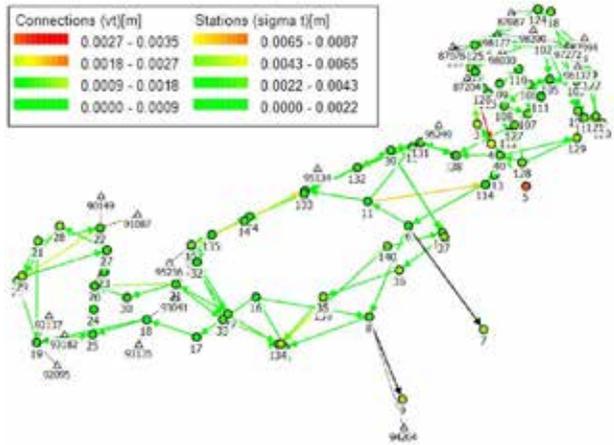
### Registration of the point cloud

This section deals with the methods that have enabled the single scans to be linked together, and the transfer of the registered point cloud to a higher-level reference system. The methods can be divided into three steps: first, the plane detection occurs, and the scans are pairwise registered, then a block adjustment transfers the linked scans into a superordinate coordinate system. The accuracy of local and global registrations are also considered.

The single scans of each epoch are now connected, thanks to the implemented plane-based registration method of Scantra. First, planar segments are extracted from the original point cloud, and for each segment, parameters are adjusted. Each plane is defined by its normal direction in X, Y, and Z and its center of gravity. Thanks to those parameters, correspondences among identical planes can be made, and so the pairwise plane-based registration occurs. Then, the spatial standard deviation of the translation vector and the residuals of the pairwise registrations received during block adjustment are provided. The scanner's noise, the individual planarity, and the distribution of the detected planes within the object spaces are parameters, on which the quality of the results depends. In the last processing step, a Least-Squares adjustment provides datum-dependent quality measures for every station, based on the stochastic properties of all planes and the network configuration. The results thus obtained illustrate with what accuracy, in the form of a spatial standard deviation, a station is connected to the reference station. After that step, all single scans are connected to one common data set, also called a point cloud.

Now all scans can be transferred into a global system. In this step, overdetermination is factored, and the coordinates of a superior coordinate system are being processed. The targets, which were placed in the building during scanning, were also measured tachymetrically.

Figure 2:  
Colored residuals of the block adjustment for E1. The station circles and colors show the achieved absolute translation accuracy of the station. The relation arrows stand for  $vt$ , the residual of the transitional part of an observation.



The registration process has a major influence on the outcome of deformation monitoring. Apart from the second epoch, the plane-based registration, in combination with a block adjustment, provides outstanding results. The residuals of the transformation parameters are in the sub-millimeter range.

### 3. Annual deformation analysis

#### Adapting the normal and projection scale for the M3C2 algorithm

All five point clouds are now referenced in a common datum. To be able to open the point cloud in CloudCompare and to keep processing times low, it was decided to form 3 cm voxels when exporting the point cloud from the registration software. One goal of this thesis is to find the appropriate parameter setting for the M3C2 algorithm. After examining areas with and without prior knowledge about occurred deformations, the larger the parameters of the algorithm are chosen, the more points are taken into account and set with large distances. In order to get visually and statistically accurate results at the same time, assuming that no large deformations occur with about 5 cm, a right parameter setting would be one that clearly detects the outliers and can, however, capture the small variations. For the following investigations, the setting with a normal scale  $D = 10 \text{ cm}$ , a projection scale  $d = 20 \text{ cm}$  and a maximum depth of 30 cm is chosen.

#### Evaluation of a ceiling

Now a very damaged ceiling is examined. What appears here in the illustration as the lower part of the ceiling, is, in reality, the part of the ceiling that is no longer supported by supporting walls, i.e., the ceiling hangs down and rests on the debris. Figure 3 shows the results of the calculated  $L_{M3C2}$  distances. Most of the values are between -18 mm and 36 mm. In general, it should be noted that the part of the ceiling that is still connected to the ceiling of the grand passageway shows the smallest distances, with values from -4 mm to 3 mm. The further away from the connection point with the passageway, the higher the  $L_{M3C2}$  distances become, with values from 1 mm to 3 mm. However, it is remarkable that with E1-E5, the still connected part of the ceiling even has values in the negative range, namely from -10 mm to 4 mm. The points with the highest values are located where there are fissures. Both the maximum and minimum values are found there. No new large fissures appear to be forming at this location.

When looking at some statistical features over all surveys, we see that the median does not change from year to year and is near to 0 mm, except for E1-E2, where it is 1,46 cm. The inner 99.8% of the  $L_{M3C2}$  distances are more often positive. The minimum and maximum values do not change much: 40 cm for the largest distances, the same applies to the minimum values. E1-E5 has the smallest bars, and it means that the  $L_{M3C2}$  distances spread less. This is because another scanner was used for the measurement of E5, which has a smaller noise.



Figure 3:  $L_{M3C2}$  distances for E1-E5

#### 4. Discussion

Based on the examination of the points that show significant deformation and their  $L_{M3C2}$  distances, the following conclusion can be drawn for the studied element. It is noticeable that the global deformations are within a range of values around 3 cm for all epochs. The points that are affected by larger deformations are either strongly affected by measurement noise or are elements that were added or removed by human intervention from one epoch to another. Of course, these elements should also be noted, as they can also show that a piece of ceiling or wall has fallen off. Areas that are strongly affected by the measurement noise are located at edges. Edges, in turn, are located at the transition zones of ceilings and walls, for example, or at areas with small holes that are only a few centimeters in size. These areas should be examined carefully to see whether they grow or remain stable over time. Among the elements studied, no place has been found where the deformation has increased significantly between 2015 and 2019.

#### 5. Conclusion

This thesis presents a workflow that allows a registration error of less than 1 cm and thus a deformation analysis directly with the point clouds, applying the M3C2 algorithm. By using the example of a damaged building, two ceilings, and a wall are tested for deformation over five years. In the case of the present data, the parameters of the M3C2 algorithm are adjusted, especially the normal scale and the projection scale.

#### Bibliography

Lague et al. Nicolas Brodu, and Jérôme Leroux. "Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ)". In: *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 82 (2013), pp. 10–26





Plus d'infos : <http://topographie.insa-strasbourg.fr>



**Contact**

[jdt2020@insa-strasbourg.fr](mailto:jdt2020@insa-strasbourg.fr)

**Avec l'aide d'Hélène Macher**

Maître de conférences INSA Strasbourg  
[helene.macher@insa-strasbourg.fr](mailto:helene.macher@insa-strasbourg.fr)  
tél. 03 88 14 49 16

**INSA Strasbourg**

Spécialité topographie  
24 boulevard de la Victoire  
67084 Strasbourg Cedex  
tél. 03 88 14 47 00  
[www.insa-strasbourg.fr](http://www.insa-strasbourg.fr)

**INSA** | INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
STRASBOURG

**GE**  
**GÉOMÈTRE-EXPERT**  
CONSEILLER VALORISER GARANTIR

**aft**