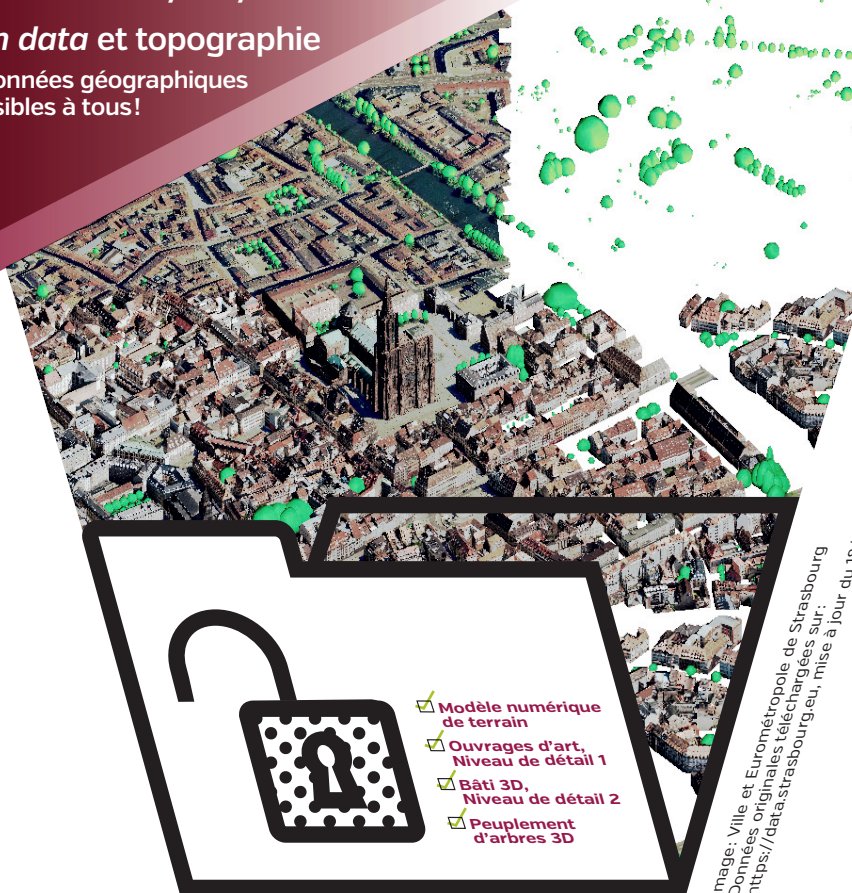


19^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 21 AU 23/09/22

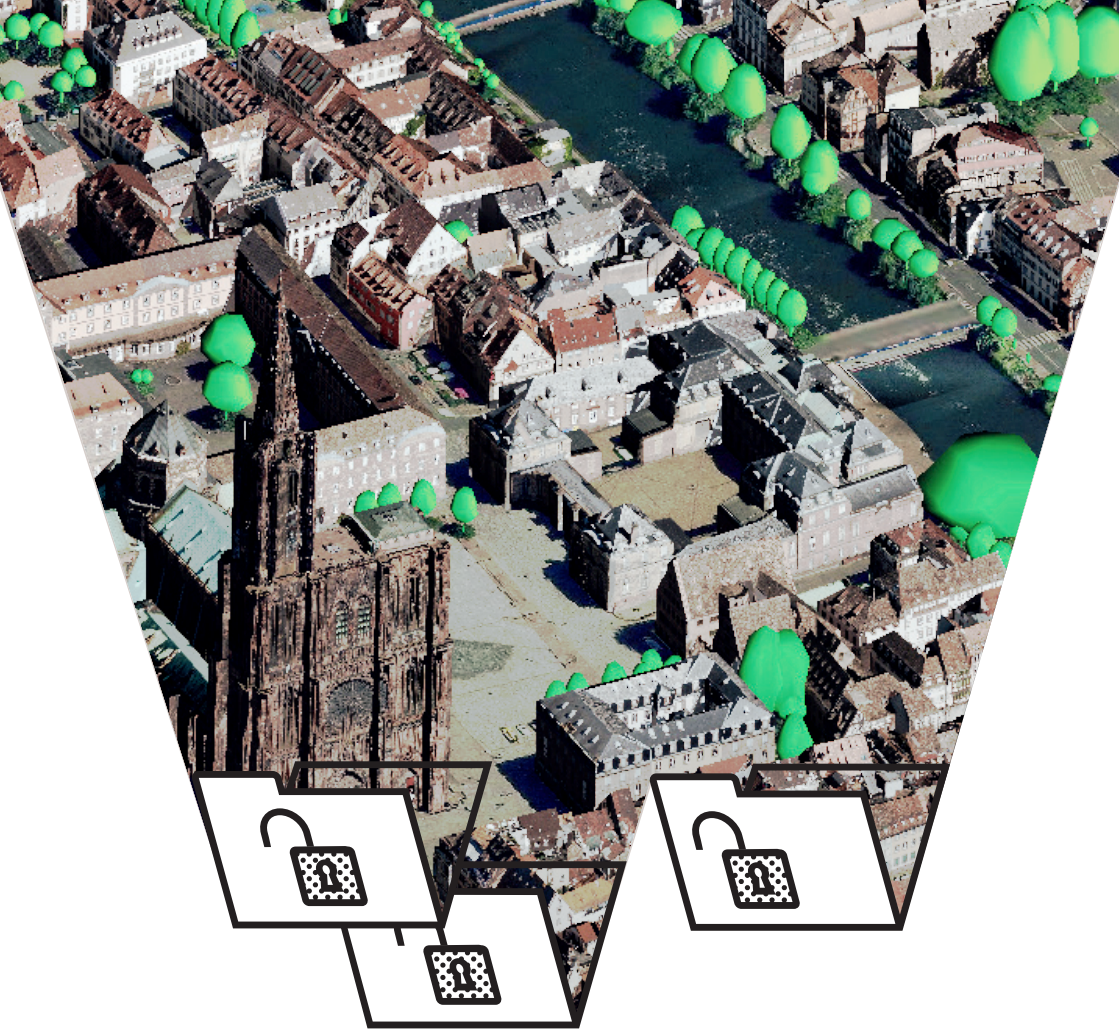
Open data et topographie

Des données géographiques
accessibles à tous!



- ✓ Modèle numérique de terrain
- ✓ Ouvrages d'art, Niveau de détail 1
- ✓ Bâti 3D, Niveau de détail 2
- ✓ Peuplement d'arbres 3D

Image: Ville et Eurométropole de Strasbourg
Données originales téléchargées sur:
<https://data.strasbourg.eu>, mise à jour du 18/03/2022



Sommaire

Mot du directeur p. 4

Programme p. 5

Salon des exposants p. 6

Conférence:
« *Open data* et topographie » p. 7

Remerciements..... p. 8

Ordre de passage des PFE p. 9

Résumés des PFE p. 15



GÉOMÈTRE-EXPERT
CONSEILLER VALORISER GARANTIR



Mot du directeur



Depuis bientôt 20 ans, les Journées de la topographie (JDT) constituent un événement majeur de la rentrée à l'INSA Strasbourg. Il s'agit 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 des géomètres-experts...) mais aussi un événement qui a acquis une visibilité bien au-delà de l'établissement au cours des années.

C'est avec un immense plaisir que l'INSA Strasbourg accueillera à nouveau cette année les JDT en présentiel. Les 19^e Journées de la topographie 2022 mettront en avant les soutenances de Projets de fin d'études (PFE), dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie. Elles seront aussi l'occasion de découvrir des entreprises du domaine. Le salon des exposants fait son grand retour après deux années perturbées par la crise sanitaire. Il constitue un lieu d'échanges privilégiés entre les professionnels et les étudiants. Les étudiants, qu'ils soient au début de leur cursus ou aux portes de la vie active, peuvent profiter de cet événement pour découvrir la pluralité des activités en topographie et les nombreuses offres d'emploi proposées par les entreprises.

La conférence des JDT aura pour thème cette année « *Open data* et topographie: des données géographiques accessibles à tous! ». Que ce soit en topographie ou dans d'autres domaines, l'ouverture et la mise à disposition des données produites et collectées, notamment par des services publics, se développent ces dernières années. Des experts présenteront lors de la conférence les données ouvertes à disposition des topographes et des cas d'usages de ces données.

L'organisation des JDT se fait toujours avec l'aide des enseignants et d'élèves topographes de l'INSA Strasbourg. Les JDT peuvent également compter sur des partenariats pérennes avec l'Ordre des géomètres-experts et l'Association francophone de topographie.

En tant que directeur de l'INSA Strasbourg, je ne peux que me réjouir de ce rendez-vous marquant de la communauté des topographes. Je tiens à remercier tous les acteurs que sont les étudiantes et étudiants, l'équipe pédagogique, technique et administrative qui les encadrent, ainsi que les professionnels qui leur font confiance, pour leur engagement au service d'une profession dont la vitalité ne se dément pas.

Programme

	MERCREDI 21 SEPTEMBRE	JEUDI 22 SEPTEMBRE	VENDREDI 23 SEPTEMBRE
8 h	Accueil - salle topographie		
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE) JURY 1 - JURY 2 salle topographie bâtiment C	Soutenances de PFE JURY 1 - salle C1.11 JURY 2 - C1.15 JURY 3 - C1.16 bâtiment C	Soutenances de PFE JURY 1 - JURY 2 salle topographie JURY 3 - salle C1.16 bâtiment C
10 h			
11 h			
12 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C	Délibération et annonce des résultats salle C1.16 bâtiment C	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C
13 h		Salon des exposants 13 h - 17h30 salle topographie bâtiment C	
14 h	Soutenances de PFE JURY 1 JURY 2 salle topographie bâtiment C		Conférence : « <i>Open data</i> et topographie » 14 h - 16 h amphi de Dietrich
15 h			
16 h			Présentation du métier de géomètre-expert 16 h - 17h30 amphi de Dietrich
17 h			
18 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C	Conseil de l'Association francophone de topographie (AFT) (Réservé aux membres) 17h30 - 20 h salle C1.16 bâtiment C	Cérémonie de clôture des Journées de la topographie et verre de l'amitié salle topographie bâtiment C
19 h			

Salon des exposants

JEUDI 22 SEPTEMBRE
DE 13 H À 17 H 30

Après deux années perturbées par la crise sanitaire, le salon des exposants des Journées de la topographie (JDT) fait son grand retour en présentiel à l'INSA Strasbourg !

Comme le veut la tradition des JDT, nous reconduisons cette année encore le salon des exposants. Nous avons le plaisir de pouvoir accueillir le public (étudiants et professionnels) à nouveau dans nos locaux. Le salon des exposants est une occasion pour les étudiants d'échanger avec des professionnels et de découvrir les activités des entreprises et les nombreuses offres d'emploi qu'elles proposent. Un panneau d'affichage pour les offres d'emploi et de stages sera mis à disposition des entreprises pendant le salon.

Entreprises du salon des exposants

	Abot		Mire SAS
	Capture4Cad		Opsia
	Ecartip		Positics
	ESRI France		Sitech France
	FARO		Sites
	Geofit Group		Sixense
	Geolux 3.14		Sogelink
	Geosat		Spie batignolles valérian
	Geotopo		Teria
	Groupe Parera		Topocenter
	JSInfo		AFT
	Leica Geosystems		OGE
			Invités d'honneur

Conférence : « *Open data* et topographie »

**Des données géographiques
accessibles à tous !**

**VENDREDI 23 SEPTEMBRE
DE 14 H À 16 H**

Cette année le thème de la conférence des JDT est « *Open data* et topographie : des données géographiques accessibles à tous ! ». Les données ouvertes ou *open data* sont des données numériques dont l'accès et l'usage sont laissés libres aux usagers. Elles peuvent être d'origine privée mais sont surtout publiques, produites notamment par des collectivités et des établissements publics. Les données ouvertes sont une ressource précieuse pour l'analyse d'une politique publique ou d'un phénomène sociologique par exemple. Pour d'autres domaines, la donnée et le travail sur la donnée constituent l'objet d'étude lui-même, ce qui est le cas pour la topographie.

En topographie, les données mises à disposition en *open data* sont diverses : plans 2D, orthophotos, nuages de points, maquettes 3D...

Lors de la conférence, des experts présenteront notamment les types de données ouvertes à disposition des topographes et des cas d'usages de ces données. La conférence permettra de répondre à plusieurs questions :

- Quelles sont les principales données géographiques à disposition ?
- Quelles sont les applications possibles avec les données libres d'accès ?
- Comment stocker les données (mise en forme) et garantir leur accessibilité dans le temps ?
- Y a-t-il des risques à l'ouverture des données publiques ?

Intervenants [liste non exhaustive]

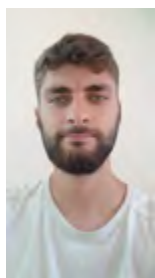
- Olivier Banaszak, chef du service Géomatique et connaissance du territoire, Ville et Eurométropole de Strasbourg
- Maximilien Brossard, directeur & cofondateur de URBS (*Urban retrofit business services*)

Remerciements



Des étudiants de 5^e année en topographie se sont investis dans l'organisation des Journées de la topographie 2022. Ils ont notamment contribué à l'élaboration de ce cahier des résumés et à l'organisation du salon des exposants.

Merci à eux pour leur investissement!



DR

Inès Champetier, Aymeric Mottier, Marie Pasquet

Ordre de passage des PFE

MERCREDI 21 SEPTEMBRE

JURY 1 [salle topographie, bâtiment C]

Président de jury: NATCHITZ Emmanuel

8h30 • Analyse des performances de levers LiDAR¹ via l'iPad Pro en vue de la réalisation de plans d'intérieurs et de maquettes numériques de bâtiments • p. 17

- Étudiante: CHARDON Pauline
- Structure d'accueil: Futurmap, Lyon
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, LANDES Tania

9h30 • Intégration et utilisation de la photogrammétrie terrestre pour les missions topographiques courantes quotidiennes • p. 21

- Étudiante: LE FOLL Lucy
- Structure d'accueil: MA-GEO, Lille
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, LANDES Tania

10h30 • Développement d'outils photogrammétriques permettant de faciliter l'application de missions propres à un bureau de géomètre-expert • p. 25

- Étudiant: MARIN Tom
- Structure d'accueil: Arpent'Alp, Viuz-en-Sallaz
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

.....

Présidente de jury: DUQUENNE Françoise

13h30 • Mise en place d'outils collaboratifs pour une maquette BIM² orientée 7D en vue de l'exploitation et de la maintenance des infrastructures de transport public • p. 29

- Étudiante: IVANOVA Eva
- Structure d'accueil: HKD géomatique, Onex (Suisse)
- Correctrice: MACHER Hélène

14h30 • Relevé et modélisation des galeries des contremines de la citadelle de Doullens [Somme] • p. 33

- Étudiant: RICHALET-CHAUDEUR Théo
- Structure d'accueil: Somme patrimoine, La Chaussée-Tirancourt
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, GRUSSENMEYER Pierre

15h30 • Levé et numérisation du château de Lichtenberg en vue d'une proposition de visite virtuelle du site à des périodes remarquables • p. 37

- Étudiant : ROCHA Maxime
- Structure d'accueil : Communauté de communes de Hanau, La Petite-Pierre
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

16h30 • Solution de numérisation, de maillage et de modélisation d'éléments complexes et architecturaux pour une intégration au logiciel Revit • p. 41

- Étudiante : BOUALAOUI Saphia
- Structure d'accueil : Parera, L'Isle-Jourdain
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, MACHER Hélène

JURY 2 [salle topographie, bâtiment C]

Président de jury: FLACELIÈRE Bernard

8h30 • Initialisation de la pose de l'utilisateur en réalité augmentée par la reconnaissance de l'environnement • p. 45

- Étudiant : KASTLER Nathan
- Structure d'accueil : TT Géomètres experts, Paris
- Correcteur : KOEHL Mathieu

9h30 • Mise en place d'un prototype de cadastre 3D des réseaux gérés par les services industriels de Genève à l'échelle d'un quartier • p. 49

- Étudiant : FRACHET Valentin
- Structure d'accueil : Services industriels de Genève, Le Lignon (Suisse)
- Correcteur : KOEHL Mathieu

10h30 • Développement d'un module de compensation de réseau dans le logiciel TopTools • p. 53

- Étudiante : IGNACCOLO Solène
- Structure d'accueil : TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

.....

Président de jury: BANASZAK Olivier

13h30 • Approche mixte de levé d'intérieur pour le compte de la CTS (site gare) • p. 57

- Étudiant : BOUQUIER Mathis
- Structure d'accueil : Compagnie des transports strasbourgeois, Strasbourg
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

14h30 • Construction automatique d'un jumeau numérique 3D sémantique du territoire à partir de nuages de points • p. 61

- Étudiante: MICHAUD Méline
- Structure d'accueil: IGO, Nîmes
- Correcteur: KOEHL Mathieu

15h30 • Auscultation par mesure de nuages de points • p. 65

- Étudiant: SCHAEPELYNCK Louis
- Structure d'accueil: Sixense, Nanterre
- Correcteur: FERHAT Gilbert

16h30 • Acquisitions, traitements et intégration de données cartographiques hétérogènes de l'objet au territoire: cas d'étude de la petite Camargue et de la tour Carbonnière • p. 69

- Étudiant: SERVIERE Tom
- Structure d'accueil: Global geomatic France, Mudaison
- Correcteur: FERHAT Gilbert

.....

JEUDI 22 SEPTEMBRE

JURY 1 [salle C1.11, bâtiment C]

Président de jury: LAMBERT Régis

8h30 • Mise en œuvre du modèle 3D de référence à partir de données photogrammétriques pour le site du monastère de Saint-Hilarion, bande de Gaza • p. 73

- Étudiant: DELLAROVERE Toma
- Structure d'accueil: Première urgence internationale, Asnières-sur-Seine
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, GRUSSENMEYER Pierre

9h30 • Géolocalisation d'une caméra panoramique par appariement de références • p. 77

- Étudiant: ZEDE Chahine-Nicolas
- Structure d'accueil: Insit, Yverdon-les-Bains (Suisse)
- Correcteur: ALBY Emmanuel

10h30 • Conception d'un outil de géoréférencement automatisé, assisté par intelligence artificielle, pour le report de réseaux concessionnaires DICT • p. 81

- Étudiant: ANDRIEUX Quentin
- Structure d'accueil: Geofit expert, Nantes
- Correcteur: ALBY Emmanuel

JURY 2 [salle C1.15, bâtiment C]

Président de jury: NATCHITZ Emmanuel

8h30 • Étude de la précision du Backpack de Leica et mise en place d'une chaîne de production fiable, de l'acquisition terrain jusqu'au traitement des données • p. 85

- Étudiant: HACHARD Robin
- Structure d'accueil: Bbass géomètre-expert, Castries
- Correctrice: MACHER Hélène

9h30 • Évaluation des performances d'un algorithme de calcul de comparaison de nuages de points • p. 89

- Étudiante: LECLERC Sidonie
- Structure d'accueil: Sixense, Voiron
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Documentation des tunnels par imagerie 3D haute résolution • p. 93

- Étudiant: BARCET Florian
- Structure d'accueil: Cerema, Strasbourg
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

JURY 3 [salle C1.16, bâtiment C]

Présidente de jury: DUQUENNE Françoise

8h30 • *Creation of quality dashboard for geospatial data and services* • p. 97

- Étudiante: COSSEC Camille
- Structure d'accueil: National land survey of Finland, Helsinki (Finlande)
- Correcteur: KOEHL Mathieu

9h30 • Création d'un outil d'analyse de données linéaires appliquées au guidage 3D • p. 101

- Étudiant: RYCKEBOER Lucas
- Structure d'accueil: ZAGE, Lux
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, FERHAT Gilbert

10h30 • Utilisation de l'apprentissage profond pour la détection automatique d'artefacts archéologiques dans des données LiDAR¹ • p. 105

- Étudiant: MOREAU Raphaël
- Structure d'accueil: Archéologie Alsace, Sélestat
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, LANDES Tania

.....

VENDREDI 23 SEPTEMBRE

JURY 1 [salle topographie, bâtiment C]

Président de jury: FLACELIÈRE Bernard

8 h30 • Évaluation de solutions de métrologie sans contact basées sur la génération d'un nuage de points 3D en temps réel pour le suivi d'infrastructures sous-marines • p. 109

- Étudiante: NOYEZ Alice
- Structure d'accueil: Total énergies, Pau
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

9 h30 • Reconstruction automatique de maquettes BIM² d'infrastructures en milieu maritime, portuaire et fluvial • p. 113

- Étudiant: COURTOIS-WAGNER Hugo
- Structure d'accueil: Ferrcad, Montpellier
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, MACHER Hélène

10 h30 • Développement d'une approche basée sur les données Landsat historiques pour la délimitation des zones inondables canadiennes à différentes récurrences • p. 117

- Étudiant: WIRTZ Bastien
- Structure d'accueil: INRS - Centre ETE, Québec (Canada)
- Correctrice: LANDES Tania

JURY 2 [salle topographie, bâtiment C]

Président de jury: NATCHITZ Emmanuel

8 h30 • Méthodologie de couplage de la géométrie 3D de scènes urbaines avec des mesures dans l'infrarouge thermique • p. 121

- Étudiant: LECOMTE Vincent
- Structure d'accueil: Laboratoire ICube, équipe Trio, Illkirch-Graffenstaden
- Correctrice: MACHER Hélène

9 h30 • Mise en place d'une visite virtuelle d'un monument historique à destination du grand public • p. 125

- Étudiante: PIERRE Charline
- Structure d'accueil: Gexia foncier, Labège
- Correcteur: ALBY Emmanuel

10h30 • Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique optimisée pour l'acquisition et le traitement d'images issues de capteur type Go Pro au sein d'un bureau d'études pluridisciplinaire • p. 129

- Étudiant: BARLAUD Valentin
- Structure d'accueil: Cauros, Bayonne
- Correcteur: ALBY Emmanuel

JURY 3 [salle C1.16, bâtiment C]

Président de jury: MOREL Laurent

8h30 • Intégration des éclairages et mobiliers urbains dans une modélisation 3D au service de la réalité virtuelle: scénario de la Steintorplatz d'Hanovre • p. 133

- Étudiante: RICHARD Emma
- Structure d'accueil: Virtual city system, Berlin [Allemagne]
- Correcteur: KOEHL Mathieu

9h30 • Optimisation du traitement des données aériennes LiDAR¹: ajustement interbandes et géoréférencement • p. 137

- Étudiant: LABBE Donavan
- Structure d'accueil: ATGT, Lyon
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Comparaison et analyse de montages juridiques possibles pour la mise en place de copropriétés utilisant les Baux réels solidaires (BRS) • p. 141

- Étudiant: BAEHREL Maxime
- Structure d'accueil: Gexia foncier, Labège
- Correcteur: LAMBERT Régis

1 - LiDAR: *Light detection and ranging*

2 - BIM: *Building information modeling*

Résumés des PFE

Analyse des performances de levers LiDAR via l'iPad Pro en vue de la réalisation de plans d'intérieurs et de maquettes numériques de bâtiments

PFE présenté par : **Pauline Chardon**
Société d'accueil : **FUTURMAP**
Directeur de PFE : **Florent MICHELS**
Correcteurs : **Tania LANDES & Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Thibault BAVOUX**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans un contexte où les smartphones et les tablettes sont de véritables outils du quotidien, Apple est le premier à intégrer en 2020 le capteur LiDAR sur ses deux nouveaux appareils, l'iPad Pro et l'iPhone 12 Pro. À l'origine dédié à la réalité augmentée, ce dispositif pourrait bien révolutionner le domaine de la topographie dans les années à venir. L'intégration d'un capteur LiDAR présente en effet un intérêt certain, de sorte que son utilisation pour les relevés métriques pourrait rapidement se répandre auprès de nombreux professionnels dans divers secteurs.

Pour répondre à ce besoin naissant, la société FUTURMAP a donc fait le choix de mener une étude approfondie sur le sujet, en collaboration avec un grand groupe spécialisé dans le diagnostic immobilier (état des lieux, DPE, Loi Carrez, etc.). Leurs opérateurs sont amenés à réaliser des plans d'intérieurs pour l'établissement de surfaces Carrez ou de travaux d'aménagements dans les logements.

Aujourd'hui, ces relevés métriques sont majoritairement réalisés à l'aide d'un distancemètre et d'un croquis par une approche traditionnelle. Les diagnostiqueurs sont également équipés de supports mobiles (tablettes) pour inscrire leurs mesures. Cette méthode a le mérite d'être parfaitement maîtrisée et permet de former très rapidement de nouveaux opérateurs terrain. Néanmoins, l'intervention est chronophage, et la cohérence du résultat par rapport à la réalité ne peut être vérifiée lors de l'établissement du plan. En conséquence, de plus en plus de diagnostiqueurs remplacent cette approche traditionnelle par un procédé de lever d'intérieur via un scanner laser terrestre (TLS). Ce système donne des résultats plus fiables et permet l'acquisition de logements aux volumes plus grands et plus complexes. Néanmoins, l'appareil a un coût conséquent, et la consolidation des nuages de points et la génération du plan d'intérieur demandent plus d'expertise que la méthode classique.

Un processus de numérisation 3D via iPad et iPhone s'est donc imposé comme une solution évidente. Le principal avantage de ce système est l'accessibilité, d'un point de vue opérationnel comme d'un point de vue financier. Sa prise en main facile, rapide et intuitive, par des personnes non qualifiées aux levers d'intérieurs est également un atout majeur, puisqu'il suffit de se déplacer dans la pièce avec l'appareil comme si notre environnement était filmé.

Ce Projet de Fin d'Études (PFE) consiste donc à mettre en place une nouvelle méthode d'acquisition, basée sur les technologies LiDAR mobiles, dans le but d'établir un plan d'intérieur ou une maquette numérique à partir duquel le plan 2D et les surfaces du logement peuvent en être extraits. Ainsi, nous allons approfondir la connaissance de ce système de numérisation afin de déterminer un processus de captation fiable des données. Plusieurs éléments vont être étudiés à la suite d'une série de tests, comme le fonctionnement du capteur LiDAR, les applications mobiles de numérisation 3D, ainsi que la méthodologie d'acquisition et de consolidation des nuages de points.

2. Capteurs et données

Pour ce projet, nous avons utilisé exclusivement l'iPad Pro 11 pouces 3^{ème} génération. Il est muni du capteur LiDAR, uniquement disponible sur les produits Apple tels que les iPhones 12/13 Pro et 12/13 Pro Max, et les iPads Pro sortis depuis 2020. L'étude s'est déroulée sur l'iPad, néanmoins des tests ont été effectués pour confirmer la conformité de la solution sur l'iPhone 12 Pro.

Cet appareil est doté d'un module photo arrière composé de deux caméras RVB et d'un capteur LiDAR (Figure 1, a). Ce dernier est composé d'un système de détection 3D, qui utilise un capteur d'image proche infrarouge (NIR), à temps de vol direct (dToF) (TechInsights@2022). C'est un LiDAR d'une portée de 5 m (Apple Newsroom@2022), qui crée une fine grille de points (Figure 1, b).



Fig. 1 : A gauche (a), module LiDAR sur l'iPad Pro (System Plus Consulting@2022, et Apple iPad Pro@2022, modifié), à droite (b), exemple d'un extrait de la matrice de points du capteur LiDAR de l'iPad (Spreafico et al., 2021, modifié, et Medium@2022, modifié)

D'après le communiqué de presse d'Apple en mars 2020, plusieurs éléments de l'iPad fonctionnent conjointement avec le LiDAR de l'appareil. Les points de profondeurs mesurés par ce capteur sont combinés aux données des deux appareils photos, à celles du détecteur de mouvement, et aux algorithmes de vision artificielle du processeur (Apple Newsroom@2022).

Ce dispositif présente donc quelques disparités par rapport à celui que nous pouvons retrouver sur les appareils topographiques. En effet, les résultats montrent une dépendance du LiDAR vis-à-vis des capteurs photos, et le nuage 3D résultant ne présente pas d'informations sur l'intensité de chaque point. Ainsi, l'iPad utilise également le suivi optique et enregistre des points d'intérêt sur chaque plan de vue lors de la numérisation.

3. Applications

Depuis la sortie du capteur LiDAR sur les nouveaux appareils Apple, une centaine d'applications dédiées à la numérisation 3D se sont développées. Un recensement a été réalisé après l'établissement de plusieurs paramètres pour sélectionner les plus pertinentes. À l'issue de plusieurs tests, quatre applications ont été retenues : Canvas, Polycam, RTAB-Map et SiteScape.

Une analyse plus approfondie sur plusieurs critères a été réalisée afin d'établir un classement, dans le but de déterminer celle qui serait la plus intéressante et la plus appropriée pour répondre aux besoins du projet.

SiteScape se trouve en tête de cette liste. Cette dernière présente plusieurs avantages par rapport à ses homologues, Canvas, Polycam et RTAB-Map. En effet, elle est l'une des seules à être orientée nuage de points, tandis que les autres types d'applications utilisent un maillage dérivé des nuages acquis. De plus, la densité de points peut être configurée parmi trois options. L'export des données est disponible dans le format RCP, supporté par les logiciels de dessin Revit et AutoCAD. Par ailleurs, la facilité de communication avec les développeurs, et leur recherche constante d'améliorations en collaboration avec les utilisateurs, ont également grandement participé à valider notre choix.

4. Méthodologie

4.1. Acquisition

Afin de réaliser un protocole d'acquisition, des tests ont été réalisés pour déterminer les limites et contraintes de cette numérisation via l'iPad. Ils ont ensuite été comparés afin d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus :

- Acquisition avec l'iPad dans toutes les densités de points disponibles (*high* : matrice de 16 000 points, *medium* : matrice de 8000 points, *low* : matrice de 4000 points (SiteScape@2022)), en acquisition unique ou en découpage pièce-par-pièce,
- Acquisition par la méthode traditionnelle (croquis et distancemètre), par des opérateurs professionnels d'une société de diagnostics immobiliers,
- Acquisition avec un TLS.

Tout d'abord, l'étude montre qu'une numérisation découpée pièce-par-pièce est nécessaire. En effet, les dérives sur le nuage de points sont trop importantes pour fournir des résultats satisfaisants sur une acquisition unique de l'ensemble du site. De plus, nous avons étudié les densités de points que propose l'application. La densité la plus basse a été choisie, car la limite du nombre de points par fichier ne permet pas de faire l'acquisition d'une pièce entière avec les densités les plus hautes.

Des tests ont ensuite été réalisés avec une société spécialisée dans les diagnostics immobiliers. Nous avons ainsi pu acquérir les données de trois appartements, de surfaces comprises entre 60 m² et 75 m² environ. Un diagnostiqueur a également réalisé le même travail, via une approche plus classique (distancemètre). Afin d'évaluer la pertinence de la prestation de lever via l'iPad, les surfaces obtenues par les deux méthodes ont ainsi été comparées. Après modélisation des appartements et établissements des surfaces, les résultats ont mis en évidence des écarts relatifs variants de 0,90% à 1,44% entre nos mesures et celles des diagnostiqueurs (Figure 2). Cela nous a amené à comparer les données acquises via l'iPad avec les données issues d'une acquisition TLS Faro. Cette analyse menée sur des locaux de 180 m² a montré un écart relatif de 0,55% entre les deux surfaces (écart absolu de 1,06 m²). Par ailleurs, une tolérance de 5% sur l'écart de surface est acceptée lors d'un nouveau mesurage.

Fig. 2 : Tableau récapitulatif des surfaces mesurées et des écarts observés

	Logement 1	Logement 2	Logement 3
Surface diagnostiqueurs (m ²)	75,08	77,49	60,89
Surface FUTURMAP (m ²)	74,00	76,79	61,48
Écart absolu (m ²)	1,08	0,70	0,59
Écart relatif (%)	1,44%	0,90%	0,97%

Ainsi, à l'issue des tests menés en interne et en conditions réelles, nous pouvons valider le processus d'acquisition pour la détermination de la surface Loi Carrez. Nous avons ainsi généré un premier protocole, qui reprend en détail l'ensemble des étapes, des instructions du paramétrage de l'application jusqu'à la vérification visuelle des nuages de points acquis sur l'iPad.

4.2. Consolidation

Une fois les données acquises, il convient de s'intéresser à la solution de consolidation la plus pertinente pour notre étude. Pour cela, nous sommes actuellement en train de comparer plusieurs méthodes d'assemblage avec un nuage issu d'une acquisition par TLS, considéré comme vérité terrain :

- Consolidation manuelle par CloudCompare (Figure 3) et SiteScape (disponible depuis mi-mai).
- Consolidation par cible sur RealWorks.
- Consolidation nuage-à-nuage sur CloudCompare, SiteScape (disponible depuis mi-mai) et RealWorks.



Fig. 3 : Résultat de la consolidation des nuages de points d'un appartement de 80 m²

Tout d'abord, en raison de l'imprécision de cette méthode, la consolidation manuelle a pour l'instant été écartée. Nous nous sommes ensuite penchés sur le recalage par cibles. Cependant, en raison du bruit et de la faible densité de points du nuage de l'iPad, les résultats obtenus sont élevés (23,20 mm d'erreur résiduelle totale). De plus, l'utilisation du logiciel RealWorks n'est pas optimale dans le cadre de notre étude, sauf si nous effectuons le recalage des nuages en interne. En effet, la licence du logiciel est

onéreuse par rapport au prix du système d'acquisition. Par ailleurs, l'utilisation de cibles élimine l'aspect simple et pratique de cette méthode de numérisation.

Selon nos dernières acquisitions, la consolidation nuage-à-nuage de SiteScape semble être la méthode la plus appropriée. De plus, d'après le développeur, cette application présentera à l'automne une version améliorée visant à utiliser « la fermeture de boucles et une optimisation plus robuste de l'alignement global, même lorsqu'aucune boucle est présente ». Les résultats de consolidation depuis SiteScape s'annoncent donc très prometteurs pour la suite.

Des tests sont encore en cours pour déterminer la méthode de recalage de nuages de points la plus adéquate au projet. Une fois choisie, cette technique d'assemblage fera l'objet d'un protocole de consolidation des nuages. Une conclusion sur cette partie de l'étude sera présentée lors de la soutenance et dans le mémoire du PFE.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude a donc permis de mettre en place un processus de numérisation 3D via l'iPad Pro grâce au capteur LiDAR intégré et une application dédiée. L'ensemble des tests menés ont abouti à l'établissement d'un protocole d'acquisition, et le domaine d'application de cette solution a été défini. La technique de consolidation des nuages de points sera définie lors de la soutenance.

Grâce aux tests effectués, les limites de cette méthode ont été étudiées, et la conformité des plans construits à partir des nuages de points acquis a été analysée. Les résultats montrent qu'il est possible d'adopter cette solution d'acquisition mobile aux relevés métriques d'intérieurs, à destination de l'établissement de plans de surfaces Loi Carrez. L'extraction des surfaces depuis le modèle 3D donne de bons résultats, avec un écart relatif de l'ordre d'1% avec la surface mesurée par des diagnostiqueurs immobiliers ou avec la surface extraite d'une modélisation d'un nuage de points TLS. Néanmoins, pour le moment, la densité de points et le bruit observé sur le nuage ne permettent pas de généraliser cette méthode d'acquisition pour tous les types de plans. Cette solution est par exemple à proscrire pour les relevés architecturaux à l'échelle 1/50.

Pour la suite du PFE, l'idée est donc d'industrialiser cette solution de numérisation 3D auprès des sociétés de diagnostics immobiliers. En effet, des entreprises spécialisées dans ce secteur ont montré un vif intérêt pour cette méthode facile et intuitive de lever d'intérieur, afin de réaliser un diagnostic Loi Carrez et de générer un plan 2D proche de la réalité. De plus, cette solution pourrait être adaptée à d'autres domaines, comme l'aménagement d'espaces complexes à mesurer (volumes arrondis, inaccessibles, etc.). Certaines sociétés utilisent déjà cette technologie pour la visite virtuelle d'appartements ou la visualisation de l'agencement de logements.

Cependant, la méthode de numérisation présentée dans ce projet est amenée à évoluer. En effet, la progression des nouvelles technologies (voitures autonomes, réalité augmentée) pousse les capteurs et les algorithmes des appareils mobiles et leurs applications à devenir de plus en plus performants. De plus, Apple a annoncé la sortie à l'automne de la nouvelle mise à jour d'iOS et du lancement de leur application RoomPlan, destinée à dessiner un modèle 3D en temps réel lors de la numérisation de la pièce. Des progrès sont donc attendus concernant le suivi de la position de l'appareil, afin d'améliorer la qualité du nuage de points. Il serait alors possible d'élargir le domaine d'application de cette méthode à d'autres secteurs, où la précision requise serait plus importante.

Références

- Apple iPad Pro@2022 (2022). iPad Pro – Apple. URL <https://www.apple.com/fr/ipad-pro/>
- Apple Newsroom@2022 (2020). Apple annonce un nouvel iPad Pro avec scanner LiDAR et la prise en charge du trackpad dans iPadOS. URL <https://www.apple.com/fr/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>
- Medium@2022 (2020). ARKit 911 — Scene Reconstruction with a LiDAR Scanner. URL <https://medium.com/macoclock/arkit-911-scene-reconstruction-with-a-lidar-scanner-57ff0a8b247e>
- SiteScape@2022 (2022). SiteScape FAQ. URL <https://www.sitescape.ai/faq>
- Spreafico, A., Chiabrando, F., Teppati Losè, L. et Giulio Tonolo, F. (2021). The iPad pro built-in LiDAR sensor: 3D rapid mapping tests and quality assessment, Actes de conférence de l'International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Archives, vol. XLIII-B1-2021, p. 63–69, 28 Juin.
- SystemPlus@2022 (2020). Apple iPad Pro LiDAR Module - System Plus Consulting. URL [Apple iPad Pro LiDAR Module - System Plus Consulting](https://www.systemplusconsulting.com/apple-ipad-pro-lidar-module/)
- Techninsights@2022 (2021). Sony d-ToF Sensor found in Apple's new LiDAR camera. URL <https://www.techninsights.com/blog/sony-d-tof-sensor-found-apples-new-lidar-camera>

Intégration et utilisation de la photogrammétrie terrestre pour les missions topographiques courantes quotidiennes



PFE présenté par : **Lucy Le Foll**
Société d'accueil : **MA-GEO Lille**
Directeur de PFE : **Nicolas Jasiak**
Correcteurs : **Tania Landes**
Pierre Grussenmeyer



1. Contexte et objectif de l'étude

Avec 75 ans d'expérience et près de 80 collaborateurs, MA-GEO est devenu un pilier au sein de la profession. La clientèle étant assez variée, MA-GEO doit être réactif et expérimenté afin de répondre au mieux aux demandes spécifiques des clients.

Afin de réaliser les chantiers et de satisfaire le client, MA-GEO adapte ses méthodes d'acquisition et possède, pour cela, des tachéomètres, des scanners laser statique, des scanners mobiles... L'objectif principal de ce Projet de Fin d'Études (PFE) est d'intégrer la photogrammétrie au sein du cabinet pour des missions quotidiennes. En effet, le cabinet n'utilise pas cette méthode d'acquisition.

MA-GEO est mandataire de plusieurs missions, il a donc fallu faire un choix. Pour cela, il a été important de faire un premier tri en éliminant les missions où la photogrammétrie n'est pas une technique envisageable. Les trois missions retenues sont : les espaces confinés, le complément de levé topographique et le levé en milieu industriel.

Cette étude a une contrainte majeure : la méthode choisie est la photogrammétrie terrestre *low cost* autrement dit à bas coût. Pour cela, la GoPro Hero 10 répond le mieux à la problématique. Effectivement, cette caméra est à bas coût mais est également pourvue d'une résolution maximale de 5K, et aussi d'un grand angle. De plus, sa légèreté et sa petite taille permettent une manipulation ergonomique. En effet, les recherches de Fiorillo et al. (2016) mettent en avant les principaux avantages de cette technologie qui sont le (faible) coût de l'équipement ainsi que la facilité de manipulation de la caméra. Ces recherches montrent de plus qu'une caméra grand-angle permet d'accélérer et de simplifier un relevé surtout pour l'acquisition à courte distance.



Taille	71,8 x 50,8 x 33,6 mm
Poids	158 g
Résolutions	5K à 60 fps 4K à 120 fps

Figure 1 : GoPro Hero 10 et ses caractéristiques

Chaque étude de cas est traitée en plusieurs parties. L'acquisition des données est la première étape. Cette acquisition est réalisée suivant la méthodologie mise en place par MA-GEO mais aussi par photogrammétrie. À la suite de cela, les données sont traitées avec les logiciels adéquats. Pour finir, une étude comparative sur les résultats est réalisée pour chaque étude de cas afin de quantifier les erreurs.

2. Première étude de cas : les espaces confinés

Un espace confiné est un espace partiellement ou totalement fermé, non occupé en permanence, dans lequel nous entrons occasionnellement pour l'entretien ou la réparation... L'atmosphère dans cet espace peut être non respirable. Pour ce projet, un regard¹ ainsi que des canalisations sont mesurés dans le but de réaliser un modèle en trois dimensions ainsi que deux coupes verticales en deux dimensions.

¹ Un regard est un ouvrage maçonné rond ou rectangulaire qui se situe au-dessus d'une canalisation et dont le but est la visite et l'entretien d'une conduite souterraine, d'un aqueduc ou d'un égout.

L'objectif de cette première étude est de comparer la méthode habituelle d'acquisition du cabinet à la méthode photogrammétrique. Pour cela, un levé est réalisé avec un scanner laser statique ainsi qu'un levé avec une GoPro. Le but étant de savoir si la photogrammétrie pourrait compléter voire remplacer la méthode actuelle.

2.1 Acquisition des données

Sur le terrain, le scanner laser statique est doté d'un système VIS². Ce système permet l'enregistrement de la position du scanner laser en temps réel. Ce système VIS permet au scanner de se localiser dans le levé en cours et ainsi permettre de "pré-assembler" les nuages de points en temps réel sur le terrain.

Pour ce type de chantier, la méthode d'acquisition adoptée par le cabinet jusqu'à ce jour est très spécifique. En effet, le scanner laser statique est placé sur un trépied inversé permettant ainsi à l'opérateur de descendre progressivement l'appareil dans le regard.

Cette technique requiert de l'expérience contrairement à la méthode photogrammétrique. En effet, la GoPro dispose d'un mode vidéo qui permet à l'opérateur de réaliser le levé en se concentrant seulement sur ce qu'il doit mesurer.



Figure 2 : Scanner Laser RTC360 sur trépied inversé

2.2 Traitement des données

La chaîne de traitement mise en place pour ce type de chantier levé au scanner laser statique est composée de quatre étapes. Pour commencer, les données exportées sont des nuages de points qui seront consolidés en utilisant les liens créés durant le levé. Ensuite, le nuage consolidé pourra être nettoyé des bruits de mesures et artefacts. Après ces deux étapes indispensables, il pourra être possible de réaliser un maillage du regard et des canalisations. Le résultat de toutes ces étapes est le modèle en trois dimensions ainsi que des coupes verticales en deux dimensions. Les logiciels employés pour ces étapes sont Cyclone Register 360, Trimble Realworks ainsi que Sketchup pour la livraison au client.

Les données issues du levé photogrammétrique sont des vidéos. Le traitement des données se divise en cinq étapes et a pour but de créer un nuage de points ainsi qu'un modèle 3D. Pour commencer, les photos sont exportées de la vidéo via le logiciel VLC. Les photos sont ensuite chargées dans le logiciel Agisoft Métashape. Avant toute manipulation, il est important de calibrer la caméra. Cette étape, a traditionnellement été et continue d'être, selon Luhmann et al. (2016), le facteur le plus important déterminant le potentiel de précision et la fiabilité des mesures photogrammétriques à courte portée. Ensuite l'alignement des photos permet au logiciel de trouver la position et l'orientation de chaque photo. Le résultat de cette étape est un nuage de points clairsemé. Par la suite, il est possible de générer un nuage de points dense. Le modèle 3D est construit à partir des informations du nuage de points.

2.3 Étude comparative

L'étude comparative consiste à évaluer les différences entre le nuage de points issu du traitement lasergrammétrique et le nuage de points produit par photogrammétrie.

Pour commencer, une évaluation qualitative est réalisée, elle se résume à une évaluation visuelle. Ensuite, il faut passer à l'évaluation quantitative, qui consiste à confronter les résultats produits par les différentes méthodes, afin de mesurer les écarts séparant les deux nuages de points. L'analyse quantitative des deux nuages de points donne un écart moyen de 0,4 mm avec un écart-type de 8 mm. Le logiciel employé pour réaliser cette évaluation quantitative est CloudCompare plus précisément le plugin M3C2.

Cette étude comparative montre que, pour ce type de chantier de levé de regard, la méthode photogrammétrique pourrait remplacer la méthode lasergrammétrique utilisée habituellement par le cabinet.

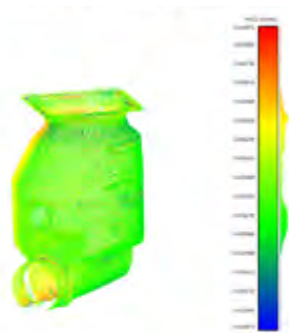


Figure 3 : Calcul des écarts entre le nuage de points obtenu par lasergrammétrique et le nuage de points produit par photogrammétrie avec l'outil M3C2 de CloudCompare

² Visual Inertial System

3. Deuxième étude de cas : le complément de levé topographique

MA-GEO est mandataire de nombreux dossiers topographiques. Le résultat de ces chantiers est un plan topographique à différentes échelles selon le client. Afin de réaliser cela, un technicien réalise le levé du site avec un tachéomètre. Cependant, des éléments peuvent être impossibles à mesurer, prenons l'exemple d'une voiture stationnée sur une plaque d'égoût.

Habituellement, le technicien se rend une première fois sur le terrain et réalise le levé complet du site. Ensuite, au bureau, il faut exporter les données et générer le dessin. La génération du dessin permet d'avoir une vue d'ensemble du levé et ainsi se rendre compte de certains oublis ou incohérence. Suite à cette étape, il est impératif de se rendre une seconde fois sur le terrain afin de mesurer les objets oubliés ou inaccessibles la première fois.

Ici, la méthode photogrammétrique permettrait à l'opérateur de se rendre sur le terrain afin de réaliser une vidéo et ainsi compléter le levé topographique. Cette technique photogrammétrique propose un équipement plus léger et plus ergonomique que le matériel lourd et encombrant utilisé habituellement lors du complément de levé.

3.1 Acquisition des données

La méthode d'acquisition habituelle pour ce type de dossier, consiste à mettre en station l'appareil et de mesurer les points avec une codification propre à MA-GEO. La méthode photogrammétrique se résume, quant à elle, à un enregistrement d'une vidéo en passant sur les objets oubliés.

Afin de confronter le levé conventionnel au levé photogrammétrique, des oublis ont été simulés au travers de la réalisation d'un dessin incomplet. Le levé photogrammétrique est ensuite réalisé dans le but de compléter le levé conventionnel.

3.2 Traitement des données

La chaîne de traitement mise en place pour ce type de chantier levé au tachéomètre est composée de trois étapes. Tout d'abord, il est essentiel d'exporter les données du tachéomètre. Ensuite, il faut calculer le cheminement polygonal et ainsi générer le dessin. Pour finir, l'opérateur doit vérifier la totalité du plan. En effet, cette étape est plus rapide qu'autrefois car une codification a été mise en place dans le cabinet. Si la codification est menée à bien sur le terrain, l'opérateur, au bureau, devra modifier le plan en y ajoutant des détails, tels que le nom des rues, le cartouche, etc. Pour la réalisation d'un plan topographique à l'échelle, le logiciel utilisé est AutoCad – Covadis.

Les données acquises avec la GoPro sont des vidéos. Il faut alors les convertir en photos, pour ce faire, le logiciel VLC est employé. Par la suite, les photos sont orientées afin de construire un nuage de points qui servira à compléter le plan topographique. Le logiciel employé pour ces traitements est Agisoft Métashape.

3.3 Étude comparative

L'étude comparative se divise en deux analyses. L'analyse qualitative, pour ce type de chantier, consiste à superposer le levé conventionnel et le nuage de points par photogrammétrie. Après cela, l'analyse quantitative est réalisée. Cependant, différentes expériences sont réalisées en prenant plus ou moins de points de calage et points de contrôle. Le but de cette analyse quantitative est d'optimiser le nombre de points de calage sur le terrain afin de rendre le levé photogrammétrique le plus simple et rapide possible tout en gardant sa précision. Le résultat de cette étude sera évoqué dans le mémoire du Projet de Fin d'Études.

4. Troisième étude de cas : le levé en milieu industriel

En 1979, une agence MA-GEO est créée à Grande-Synthe et accueille une équipe spécialisée en mesures industrielles. Les chantiers au sein de cette agence sont très divers et variés. Le chantier choisit est le levé d'une pelle industrielle. Le client demande une modélisation 3D de la pelle. En effet, cet engin a un défaut qui engendre des pertes à l'usine car la pelle ne se ferme pas entièrement et laisse donc tomber de la matière lors du chargement ou déchargement des camions.

4.1 Acquisition des données

Pour ce type de chantier, un scanner laser statique est utilisé. La lasergrammétrie est une méthode d'acquisition rapide qui peut être réalisée sans contact direct avec l'objet étudié. En effet, dans leurs travaux, Landes et Grussenmeyer (2011) mettent en avant le balayage



Figure 4 : Pelle industrielle mesurée par la méthode conventionnelle et la méthode photogrammétrique.

laser terrestre comme une technologie rapide qui permet de collecter des données de façon automatique avec une densité importante. Cette méthode d'acquisition est idéale pour ce type de chantier. Cependant, dans le cas d'un levé d'un objet industriel, la lasergrammétrie a ses limites. Effectivement, afin de mesurer la totalité de la pelle industrielle, il est nécessaire de placer le scanner laser statique sous l'objet ce qui peut être dangereux pour l'opérateur.

La photogrammétrie rend possible un levé plus sécurisé. En effet, la GoPro est fixée sur une perche de 2,70 m ce qui permet à l'opérateur de réaliser le levé sans devoir se placer sous l'objet industriel.

4.2 Traitement des données

La chaîne de traitement mise en place pour ce type de chantier levé au scanner laser statique est composée de quatre étapes. Tout d'abord, il est essentiel d'exporter les données de l'appareil afin de consolider les différents nuages de points. Ensuite, le nettoyage des bruits de mesures et artefacts est nécessaire en vue de créer un maillage. Le logiciel employé pour ses traitements est Trimble RealWorks.

La chaîne de traitement pour le traitement des données issues de la GoPro sont les mêmes que les deux autres études de cas, c'est-à-dire, l'export des photos à partir des vidéos prises sur le terrain. Ensuite, l'orientation des photos qui permettra la construction d'un nuage de points dense ainsi qu'un modèle 3D. Ces traitements sont réalisés dans le logiciel Agisoft Métashape.

4.3 Étude comparative

L'étude comparative se divise en deux analyses. L'analyse qualitative consiste à comparer visuellement les nuages de points obtenus par traitement photogrammétrique et par traitement lasergrammétrique. Ensuite, l'analyse quantitative repose sur la quantification des erreurs. Pour cela, il est nécessaire de comparer les deux nuages de points obtenus. L'écart moyen entre le nuage de points issu du traitement lasergrammétrique et le nuage de points issu du traitement photogrammétrique est de 1 mm avec un écart-type de 1 cm.

Ce résultat montre que la photogrammétrie est une méthode d'acquisition alternative aux levés traditionnels. Dans le contexte industriel présenté ici, cette technique d'acquisition a un atout majeur qui est la sécurité de l'opérateur.

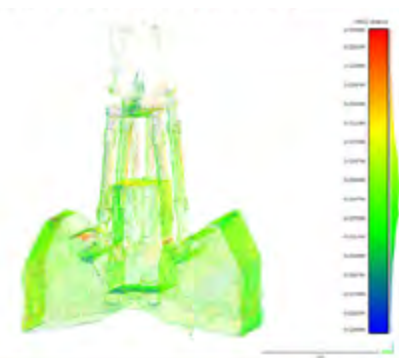


Figure 5 : Calcul des écarts entre le nuage de points obtenu par lasergrammétrie et le nuage de points produit par photogrammétrie avec l'outil M3C2 de CloudCompare

4. Conclusion

Ce projet a permis au cabinet MA-GEO de comprendre l'intérêt de la photogrammétrie terrestre. Pour ces trois cas spécifiques à savoir les espaces confinés, le complément de levé topographiques ainsi que le levé en milieu industriel, la photogrammétrie pourrait être une méthode d'acquisition alternative à la méthode conventionnelle. Ces résultats sont très encourageants et proposent d'étendre les expériences à des levés topographiques complets ou encore des calculs de cubature³ à partir du nuage de points issu du levé photogrammétrique terrestre *low cost*.

Fiorillo, F., Limongiello, M., and Fernández-Palacios B. J. (2016). Testing GoPro for 3D model reconstruction in narrow spaces. *Revue IMEKO*, Volume 5, Number 2, p.64/70.

Landes, T. and Grussenmeyer, P. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre. *XYZ*, Number 128, p.37/49.

Luhmann, T., Fraser, C., and Maas, H. G. (2016). Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, p.37/46.

³ Le calcul de cubatures consiste à définir les volumes de déblais et de remblais nécessaires aux travaux de terrassement d'un projet. [source : <https://www.reflexe-topo.fr/>]

Développement d'outils photogrammétriques permettant de faciliter l'application de missions propres à un bureau de Géomètre-Expert

PFE présenté par : **Tom Marin**
Société d'accueil : **Arpent'Alp**
Directeur de PFE : **M. Denis BORREL**
Correcteur : **M. Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte et objectifs

Il existe actuellement de multiples outils et de multiples techniques pour parvenir à réaliser des missions topographiques au sein d'un cabinet de Géomètre-Expert. La photogrammétrie aérienne et terrestre permet de répondre à un grand nombre de missions à faibles coûts avec un temps d'acquisition assez faible. Cette technique a pour contrainte d'utiliser, en général, des points au sol connus en coordonnées et visibles sur les images de la caméra pour géoréférencer le nuage de points calculé. L'objectif principal est, par conséquent, de trouver un système capable de géoréférencer directement les images, sans avoir besoin de prendre des GCPs ou points d'appui au moment de l'acquisition. Il faut donc avoir, plus particulièrement, une solution photogrammétrique de mobile mapping par drone aérien mais également par caméra terrestre en intégrant un système GNSS qui puisse calculer les coordonnées des centres des images.

Ce développement d'outils photogrammétriques est contraint par d'autres objectifs qui émanent de missions propres à un cabinet de Géomètre-Expert. Des missions comme la réalisation de plans topographiques, de MNT ou Modèles Numériques de Terrain, et d'orthophotos nécessitent une précision absolue qui soit inférieure à 5 cm en planimétrie et en altimétrie. De plus, la phase d'acquisition par la voie photogrammétrique doit gagner en rapidité et en efficacité par rapport au levé par tachéométrie et par solution GNSS. Les différentes étapes d'acquisition et de traitement doivent être également plus rapides que par utilisation de points d'appui pour le géoréférencement.

L'étude se concentre sur les zones de type corps de rue et voirie hors agglomération mais ces nouveaux outils photogrammétriques peuvent être mis en application dans des missions et des situations diverses : plan de façades, calcul de cubatures, plan topographique et MNT dans des zones champêtres, montagneuses et urbaines non étroites...

2. Etat de l'art

Concernant l'utilisation de drone en matière de photogrammétrie pour la réalisation de Modèles Numériques de Terrain, la plupart des études continuent à procéder de manière « classique » par géoréférencement grâce à des points d'appui au sol appelés GCPs. Néanmoins, depuis quelques années, un nouveau système a émergé permettant de s'affranchir des GCPs. Ce nouvel outil est un drone qui intègre une antenne et un récepteur GNSS pouvant fonctionner en mode RTK ou PPK, c'est-à-dire avec des corrections en temps réel ou en post-traitement. L'étude de Taddia et al. (2020) exploite notamment le drone DJI Phantom 4 RTK sur des zones côtières ayant, au final, des résultats quasiment similaires qu'avec l'utilisation de GCPs.

La photogrammétrie terrestre est, en règle générale, peu exploitée par les cabinets de Géomètre-Expert. Ainsi, la caméra terrestre est peu développée pour faciliter le processus d'acquisition et de traitement photogrammétrique. Il n'en demeure pas moins que de nombreuses études explorent différentes pistes de l'évolution de la photogrammétrie terrestre. On peut y voir par exemple des études de mobile mapping par caméra terrestre fixée à un véhicule motorisé (Gonçalves & Pinhal, 2018) ou encore fixé dans un backpack (Ellum et al., 2002) et (Campos et al., 2018).

Des sociétés spécialisées notamment dans le traitement de nuage de points, ont également avancé dans le domaine terrestre. Géomédia apporte une nouveauté en proposant une caméra de type action fixée sur une perche de 3m pour un relevé détaillé de la topographie du lieu. Quant à la société Gépixel, la caméra action est couplée et fixée sur une canne GPS. Les coordonnées des centres des images sont donc calculées quasiment en simultané avec la prise de la photo grâce au récepteur GNSS situé au sommet de la canne.

3. Acquisition des données

La zone d'acquisition se situe le long de 2 routes dans la Commune de Viuz-en-Sallaz comme présentée sur la Figure 1. Elle est répartie sur plus de 1.2 km linéaire. La caméra terrestre prend des photos le long de la route et de ses abords. Le drone aérien capture une zone plus large, qui dépasse parfois le contour de la zone illustrée en vert.



Figure 1 : Zone d'acquisition de l'étude

A. Mobile mapping par caméra terrestre

La société Emlid propose un système GNSS compact contenant le récepteur Reach M2, visible en Figure 2 et un adaptateur « hot-shoe » qui permet une synchronisation entre le déclenchement de la photo et la mesure GNSS. L'appareil photo doit, quant à lui, être léger, peu cher et avec un objectif grand angle. L'appareil photo hybride Nikon Z50 et son objectif NIKKOR Z DX 16-50mm f/3.5-6.3 ont été choisis pour l'étude.



Figure 2 : (a) Récepteur Reach M2 et antenne GNSS

(b) Appareil photo Nikon Z50 NIKKOR Z DX 16-50mm

Avec une perche de 3 mètres de haut, le levé terrestre s'est déroulé sur un intervalle de temps de 1 s entre chaque photo et s'est terminé au bout de 40 min, soit plus de 2400 photos prises.

B. Mobile mapping par drone aérien

Peu de modèles de drones aériens possèdent un système GNSS ayant une précision centimétrique. Nous avons utilisé le drone DJI Phantom 4 RTK, présent en Figure 3 lors de cette étude. L'acquisition a été restreinte à un quart de la zone initiale avec un temps d'exécution de 10 min avec un plan de vol produit en amont. Au final, 272 photos verticales ont été prises avec un recouvrement de 80%.



Figure 3 : Drone DJI Phantom 4 RTK

4. Traitement et analyse des résultats

Suite aux acquisitions effectuées par voie terrestre puis aérienne, les images et leurs coordonnées associées en système RGF93 CC46 sont traitées à l'aide du logiciel Metashape. Les coordonnées des images sont données en WGS84. Il suffit donc juste de calculer la transformation du système géodésique pour obtenir des coordonnées en CC46. Pour les coordonnées des images issues de la caméra terrestre, il faut appliquer également un décalage vertical de 15.3 cm, c'est-à-dire la distance entre le centre de l'antenne et le centre de la caméra.

Comme lors de la phase d'acquisition, le traitement des images s'effectue, dans un premier temps, séparément. Les images issues du drone subissent un calcul d'orientation de haute qualité permettant de lier les images entre elles avec des milliers de points de jonction. Les coordonnées des images facilitent grandement le temps de calcul de l'orientation. Par la suite, le nuage dense puis le MNE (Modèle Numérique d'Elevation), MNT (Modèle Numérique de Terrain) et enfin l'orthomosaïque sont calculés et générés. Pour le calcul du MNT, il est important de classifier le nuage dense pour prendre en compte uniquement les points de terrain et de route. Par exemple, la Figure 4 dévoile le MNE produit par le drone sur la partie sud de la zone d'étude.

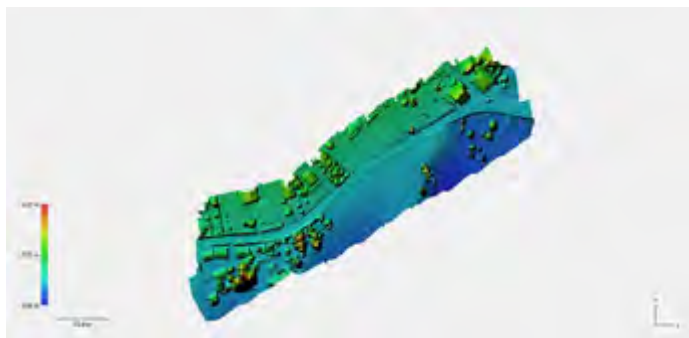


Figure 4 : MNE issu des images du drone

Les mêmes étapes de traitement sont réalisées de manière analogue pour les images issues du relevé terrestre.

Une fois les étapes de traitement terminées, des comparaisons doivent être nécessaires pour évaluer les produits réalisés. L'évaluation de l'exactitude de l'étude a comme produit de référence un levé de Mars 2021 par canne GNSS et tachéomètre mais aussi un levé de la même année au drone DJI Phantom 3 avec des GCPs le long des 2 routes. L'erreur moyenne quadratique ou EMQ des

nuages de points produits définit l'exactitude de ces nuages, à partir de valeurs vraies, c'est-à-dire, en admettant que les levés de 2021 soient exacts. Sur le logiciel CloudCompare, les nuages de points par drone et par caméra terrestre sont comparés au nuage de points de référence acquis par drone en 2021. On obtient les écarts altimétriques des points. Pour le levé de référence de 2021 par tachéométrie et système GNSS, les coordonnées des regards, clous, grilles, marques au sol et bouches à clé ont été importées sur Metashape en tant que coordonnées de points de contrôle. Les valeurs sont présentes dans le Tableau 1 et montrent une meilleure exactitude du levé par drone que par caméra terrestre. L'utilisation de quelques GCPs permet d'obtenir de meilleurs résultats.

	Altimétrie	Planimétrie	Altimétrie
Logiciel	CloudCompare	Metashape	
EMQ issu du drone	7.7 cm	5.7 cm	5.3 cm
EMQ issu de la caméra terrestre	11.1 cm	10.9 cm	5.8 cm

Tableau 1 : EMQ des nuages de points sans GCPs

La mise en application de ces deux systèmes de mobile mapping photogrammétrique peut varier en fonction de la situation et des besoins. C'est pourquoi un cabinet de géomètre utilisera parfois seulement le drone RTK ou la caméra terrestre sur perche. Mais il sera contraint d'utiliser également les deux solutions photogrammétriques, en levant par exemple toute la zone par drone RTK et uniquement la route par caméra terrestre pour un niveau de détail plus élevé. L'acquisition demeure inchangée mais la partie traitement diffère avec la fusion des deux nuages de points pour ensuite créer le MNT puis l'orthomosaïque. Pour optimiser le temps de calcul, une automatisation de la chaîne de traitement est disponible sur Metashape.

5. Conclusion et perspectives

Le développement d'un appareil photo hybride monté sur une perche et équipé d'un système GNSS d'une précision centimétrique puis la mise en application d'un drone intégrant une antenne GNSS ont répondu à l'objectif principal de l'étude. Ces nouveaux outils photogrammétriques ont permis d'atteindre également l'objectif d'efficacité en termes de rapidité et de simplicité d'acquisition puis de la facilité à traiter les images géoréférencées. En revanche, malgré l'absence d'une erreur systématique, la précision absolue des produits finaux n'est pas satisfaisante pour le nouvel outil de mobile mapping par caméra terrestre contrairement aux produits issus du drone RTK. Quelques GCPs bien répartis permettent d'obtenir une meilleure précision.

Le système de cartographie par caméra terrestre, encore assez rudimentaire, peut être amélioré sur plusieurs aspects. L'équipement GNSS dont notamment son antenne devra être fixé dans un support. Il sera aussi utile de rajouter une centrale inertielle ou IMU pour obtenir des meilleures valeurs de décalage du centre de la caméra. Un taux de recouvrement plus élevé peut également contribuer à une meilleure précision.

6. Références

Taddia, Y., Stecchi, F. and Pellegrinelli, A. (2020) 'Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode', Drones, 4(2), p. 9. doi:10.3390/drones4020009.

Gonçalves, J.A. and Pinhal, A. (2018) 'Mobile Mapping System Based on Action Cameras', The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-1, pp. 167–171. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-1-167-2018.

Ellum, C.M. and El-Sheimy, N. (2002) 'The development of a backpack mobile mapping system', pp. xiv, 158 leaves : ill.; 30 cm. doi:10.11575/PRISM/13105.

Campos, M., Tommaselli, A., Honkavaara, E., Prol F., Kaartinen, H., El Issaoui, A., and Hakala, T. (2018) 'A Backpack-Mounted Omnidirectional Camera with Off-the-Shelf Navigation Sensors for Mobile Terrestrial Mapping: Development and Forest Application', Sensors, 18(3), p. 827. doi:10.3390/s18030827.

Mise en place d'outils collaboratifs pour une maquette BIM orientée 7D en vue de l'exploitation et de la maintenance des infrastructures de transport public.



PFE présenté par : **Eva Ivanova**
Société d'accueil : **HKD Géomatique SA**
Directeur de PFE : **Samuel Dunant**
Correptrice : **Hélène Macher**
Encadrants : **Charles Grange et Mathieu Petitjean**



1. Contexte et objectifs de l'étude

En 2014 HKD Géomatique a réalisé, en partenariat avec les transports publics genevois (tpg), le relevé et la modélisation en SIG 3D des éléments de lignes aériennes de contact (LAC) sur un linéaire de soixante-dix kilomètres. Ce projet a notamment été le fruit du projet de fin d'études de Joris Vidalenche (figure 1.1), aujourd'hui ingénieur géomètre de l'ESGT.

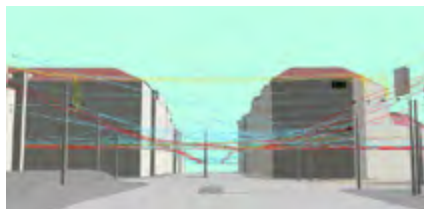


Fig. 1.1 : Résultat de la modélisation SIG 3D par [1]

Depuis 2017 les tpg visent à digitaliser leurs méthodes de travail spécifiques aux travaux sur les chantiers et aux opérations de maintenance. Cela a débuté par l'identification, la hiérarchisation et la topologie de tous les éléments constituant les LAC dans une base de données de type Enterprise Resource Planning (ERP), qui contient les informations de gestion relatives aux ressources humaines, financières et matérielles.

L'enjeu aujourd'hui des tpg est de permettre une gestion et une communication plus rapide et efficace dans le domaine de la maintenance des LAC. Pour ce faire, les tpg ont mandaté HKD Géomatique afin de combiner modèles 3D avec base de données ERP sur un linéaire réduit de six cents mètres. Ce travail est mené dans le cadre d'un projet PoC (Proof of Concept) Les modèles 3D sont issus de données de Système d'Information Géographique (SIG) converties en Building Information Modeling (BIM), mais aussi d'objets BIM nouvellement créés pour enrichir la bibliothèque préexistante. Le format choisi pour la modélisation BIM est l'International Foundation Class (IFC), du fait de son d'interopérabilité et ses diverses possibilités de personnalisation des données stockées.

Ce projet de fin d'études (PFE) présente dans un premier temps les méthodes de maintenance au sein des tpg, les différentes digitalisations de maintenance existantes, ainsi que les outils de maintenance nomades disponibles aujourd'hui sur le marché.

Dans un second temps, il met en exergue le choix, la mise en place et la gestion d'une plateforme collaborative reliée à une application mobile développée spécifiquement dans le cadre du PFE, orientés vers la Gestion et Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) des infrastructures de LAC.

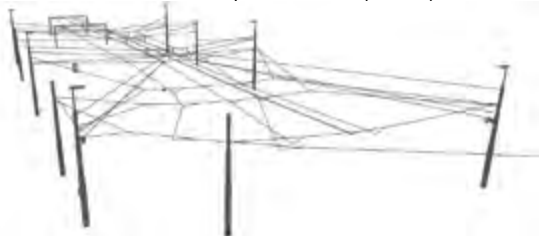


Fig. 1.2 : Extrait de la maquette BIM utilisée pour ce PFE, en cours de modélisation par [2]

2. Intérêt des modèles 3D pour le suivi du cycle de vie d'un projet

2.1. Jumeau numérique et collaboration n -D

Le Building Information Modeling (BIM) avait depuis longtemps la simple définition de représentation virtuelle d'un objet ou d'une structure, comme explicité par [3]. Cependant, ce qui donne toute la puissance à ce concept est l'ajout de dimensions au BIM comme indiquées dans le tableau 2.1 :

2D	3D	4D	5D	6D	7D
Dessin Assisté par Ordinateur (DAO)	Building Information Modeling (BIM)	Intégration du temps et des ressources	Intégration des coûts	Intégration de la durabilité et de simulations	Gestion et exploitation autour du cycle de vie

Tab. 2.1 : Les différentes dimensions du modèle numérique – traduction de [4]

Dans la littérature beaucoup d'auteurs mentionnent des cas d'utilisation du BIM à n -dimensions c'est-à-dire en l'affectation d'informations attributaires à des objets BIM, par exemple des données statistiques thermiques, lumineuses, de consommation énergétique, ou encore de sécurité. Le BIM peut également intégrer des données statistiques dans le but de limiter le gaspillage de ressources, d'augmenter la productivité et d'optimiser les bénéfices, le transformant alors en « lean BIM ».

Dans le cadre de notre projet de recherche et développement, nous souhaitons appliquer la 7^e dimension afin de permettre la Gestion et Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) des LAC tpg. L'intégration des notions d'efficacité des ressources matérielles, de la sécurité ou encore de la réduction de l'impact environnemental resteront des ouvertures futures à notre étude de cas.

2.2. Systèmes mobiles de collaboration – de réalité virtuelle à augmentée

En pleine expansion depuis quelques années, l'utilisation d'outils mobiles de réalité virtuelle ou augmentée optimise le travail collaboratif. Parmi les solutions en réalité virtuelle, nous retrouvons entre autres Vrex sur casque HP Reverb G2 et InsiteVR sur Oculus Quest. Ce type d'outils collaboratifs étant surtout destinés à la conception collaborative et à l'analyse et détection de défauts sur maquettes BIM, ils ne sont pas adaptés à un travail mobile comme les tâches d'opération et maintenance.

D'autre part, nous retrouvons des outils collaboratifs BIM en réalité augmentée, utilisant diverses méthodes de superposition de virtuel sur réel :

- Lecture de données de positionnement du mobile ou d'une antenne GNSS annexe ;
- Lecture de QR-code, code barre ou toute autre cible 2D ;
- Connexion bluetooth, NFC ou puces RFID ;
- Calcul et suivi de surfaces planes à l'aide de la vision par ordinateur ;
- Utilisation d'informations indirectes de positionnement comme la signature du signal Wi-Fi.

Généralement développés grâce à des Software Development Kits (SDK), les solutions de BIM en réalité augmentée se retrouvent majoritairement sur les systèmes d'exploitation Android et iOS. Parmi les solutions en tête de liste pour la collaboration, nous retrouvons les applications vGIS, Dalux ou encore Trimble SiteVision. Chacune présentant ses spécificités et avantages, nous avons eu l'occasion de tester ces 3 solutions sur le terrain avec une maquette BIM de LAC sur zone réduite.



Fig. 2.1 : De haut en bas et de gauche à droite – Trimble SiteVision, Dalux et vGIS, des solutions de BIM en réalité augmentée

Les outils de visualisation et de travail collaboratif étant aujourd'hui en plein essor, de nouvelles fonctionnalités nous attendent en matière de collaboration, particulièrement dans le domaine de la maintenance d'infrastructures.

3. Gestion d'une plateforme BIM collaborative

3.1. Identification des besoins des tpg

Afin de permettre une numérisation des outils de planification, de notifications curatives et de gestion de tâches d'opération et maintenance, la première étape de ce projet fut d'établir un recensement des plateformes collaboratives existantes et d'analyser leur correspondance aux différents outils nécessaires aux tpg. Pour ce faire, nous avons consulté et contacté une trentaine de plateformes collaboratives. À la suite d'un premier tri, une dizaine de plateformes ont été testées pour conclure que 3 d'entre elles sont les plus adaptées au cahier des charges du client (tableau 3.1), les contraintes principales étant la localisation des serveurs de stockage et la diversité des fonctions collaboratives.

Fonctions Plateforme	Lecture et visualisation			Collaboration		Stockage	
	IFC	Nuage de points	SHP, CityGML, Flux WMS	Assignation de tâches	Annotations 3D	Pont ERP	Serveurs
Dalux	•	•		•	•	•	Allemagne
BimSync	•	•		•	•		Irlande
GeoBIM	•	•	•	•	•	•	USA

Tab. 3.1 : Plateformes collaboratives retenues pour l'étude

3.2. Solutions de collaboration mobile

Puisque les tpg souhaitent utiliser cette solution au bureau comme sur le terrain, il est donc nécessaire que la plateforme de collaboration BIM propose un outil mobile ou une possibilité de développements externes mobiles avec ses données. Parmi les plateformes collaboratives BIM sélectionnées, les différentes solutions de collaboration mobile sont exposées dans le tableau 3.2.

Fonctions Plateforme	Application mobile	Formulaires de tâche personnalisables	Réalité Augmentée			Développements externes possibles
			Présente	Position GNSS	Position manuelle	
Dalux	•	•	•		•	
BimSync	•	•				•
GeoBIM	• (vGIS)		•	•		

Tab. 3.2 : Plateformes collaboratives retenues et leurs solutions mobiles

La suite de notre projet se base sur BimSync par Catenda, puisque cette plateforme présente la possibilité de réaliser des formulaires personnalisés, une application mobile (sans réalité augmentée) et de nombreuses ouvertures pour un développement mobile externe, qui va nous permettre de produire une application mobile au plus proche des besoins métier pour la maintenance des LAC. De plus, dans le cadre de ce projet nous travaillons via des fichiers de tâches de maintenance générés au format CSV, qui seront intégrés manuellement à notre ERP.



Fig. 4.2 : De droite à gauche – formulaire d'avarie sur LAC, navigation en 2D, BIM en réalité augmentée sur surface détectée dans l'application développée dans le cadre du PFE

4. Développement d'une application mobile de GMAO

4.1. Fonctions de l'application

L'application a pour fonctions primaires l'affichage et la lecture d'attributs d'objets IFC en réalité augmentée, ainsi que la création de formulaires de maintenance en lien avec ces objets. Pour notre développement mobile nous avons donc fait le choix de travailler sur le moteur de jeu Unity, de par son intuitivité d'utilisation, ses nombreux préréglages et ses modules de réalité augmentée préexistants. De plus, le système d'exploitation iOS étant intuitif, sécurisé mais limité en termes de personnalisations, nous avons opté pour un développement sous le système d'exploitation basé sur Linux et partiellement Open Source – Android.

Les fonctions secondaires, qui ont été rendues possibles grâce à des modules annexes ou par de la programmation interne, sont :

- La conversion d'objets BIM IFC vers des objets cartographiés UV ;
- La connexion à ArcGIS Online pour les fonds de carte 2D et objets SIG 3D ;
- La lecture de coordonnées de positionnement natives du mobile ;
- La lecture des coordonnées de l'antenne GNSS connectée en Bluetooth au mobile ;
- Différents placements de notre maquette 3D en réalité augmentée :
 - Manuel sur surfaces planes détectées ;
 - Automatique sur cibles 2D détectées ;
 - Automatique via coordonnées GNSS et calcul d'orientation du smartphone ;
- La création, modification et validation de formulaires de maintenance curative et préventive ;
- La visualisation en réalité augmentée de formulaires de tâches.

4.2. Connexion avec la plateforme collaborative

Dans un but d'allègement de notre application et de communication en temps réel, nous travaillons principalement via une connexion sécurisée avec token OAuth 2.0 à notre plateforme collaborative pour lire, écrire ou modifier les objets IFC de la maquette BIM en plus des tâches de maintenance au format BIM Collaboration Format (BCF). Ceci permet donc un suivi en temps réel de l'évolution des tâches de maintenance depuis le bureau comme sur le terrain.

5. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis la mise en place d'un inventaire exhaustif des plateformes collaboratives BIM existantes et la création d'une application mobile orientée GMAO pour les LAC tpg (figure 4.2), en connexion directe avec une plateforme choisie dans le cadre de ce projet. Le choix de développement d'application mobile s'appuie sur la possibilité de création et d'envoi de formulaires de maintenance vers la base de données ERP, ainsi que sur la visualisation de la maquette BIM des LAC en réalité augmentée.

Les ouvertures futures de ce Proof of Concept (PoC) sont l'automatisation de l'intégration des formulaires à l'ERP, ainsi que l'amélioration et la diversification des fonctions secondaires de l'application, le tout adapté à une zone élargie sur le terrain. De plus, un développement plus poussé de l'application pourra permettre à long terme une compatibilité sur iOS.

À long terme, le but sera de modéliser et de permettre la maintenance mobile de l'ensemble des services tpg. Enfin, dans un but de réponse à la 7^e dimension du BIM, l'objectif à venir sera de permettre la communication avec des capteurs Internet of Things (IoT) pour optimiser le suivi de parc, les opérations sur le terrain et les prévisions statistiques de maintenance.

6. Références bibliographiques

- [1] J. Vidalenche, « Mise en place du SIG 3D des éléments aériens des lignes des Transports Publics Genevois », Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - ESGT CNAM, Le Mans, 2014.
- [2] C. Senra, « Acquisition et modélisation des infrastructures de transport public dans le cadre d'une maquette BIM orientée 7D », Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes - ESGT CNAM, Le Mans, 2022.
- [3] M. Bolpagni, « Building Information Modelling and Information Management », in *Industry 4.0 for the Built Environment*, vol. 20, M. Bolpagni, R. Gavina, et D. Ribeiro, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 29-54. doi: 10.1007/978-3-030-82430-3_2.
- [4] N. Bartels, « Systematik und Grundlagen zu BIM im FM », in *Strukturmodell zum Datenaustausch im Facility Management*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, p. 7-61. doi: 10.1007/978-3-658-30830-8_2.

Relevé et modélisation des galeries des contremines de la citadelle de Doullens (Somme)

PFE présenté par : **Théo Richalet-Chaudeur**
Société d'accueil : **Somme Patrimoine**
*Réalisé au sein du Laboratoire ICube,
Equipe TRIO, INSA Strasbourg PAGE*
Directeur de PFE : **M. Gilles PRILAUX**
Correcteur : **M. Emmanuel ALBY**
Encadrants : **M. Pierre GRUSSENMEYER**
M. Samuel GUILLEMIN



1. Contexte et objectifs de l'étude

En novembre 1530, lorsque François 1er ordonne la fortification de plusieurs sites à la frontière nord de son royaume, la première page de la citadelle de Doullens va s'écrire. Cette ville située à 20km au nord d'Amiens, dans le département de la Somme, va alors renforcer son enceinte médiévale pour accueillir des unités d'artillerie. Jusqu'en 1962, la structure militaire occupe une place stratégique et devient un lieu fort lors des différentes guerres frappant l'Europe. Utilisée comme prison, hôpital militaire ou encore centre de contrôle pour le lancement des missiles, l'histoire de la forteresse est riche et sa mise en valeur est donc importante. En 2017, l'Établissement Public de Coopération Culturelle (EPCC) Somme Patrimoine acquiert le site avec pour projet de le réhabiliter afin de le faire découvrir au public. Ainsi, des travaux d'aménagement sont entrepris et la modélisation des galeries des contremines va venir compléter les données en leur possession, permettant d'accéder aux endroits les plus reculés.



Fig. 1 : Vue aérienne actuelle de la citadelle de Doullens

Le projet a été initié en 2020 lors du Projet de Recherche Technologique (PRT) d'Edouard Jund. Une campagne de levé LiDAR a été effectuée par AIRD'ECO. Le traitement (segmentation et classification), l'analyse et l'association de photos d'archives de l'IGN a permis d'aboutir à un modèle 3D extérieur de la citadelle. Le PFE vient s'inscrire dans la continuité et est consacré au relevé terrestre et souterrain (environ 1.6 km de galeries) en vue d'une modélisation globale. L'accès aux galeries n'est actuellement aménagé (sécurisé et éclairé) que dans une petite partie de l'enceinte (environ 200 m). Les plans disponibles ne sont plus à jour (éboulement, dédales manquants, ...) et ne permettent donc pas de faire visiter la totalité des contremines. De plus, des cheminées, servant à l'aération, sont présentes le long des galeries. Mesurant près de 20 m de haut et 1 m de diamètre pour les plus grandes, un risque de chute depuis la surface est présent. Si celles-ci ont été rebouchées, leur emplacement reste inconnu et les ouvertures ont été positionnées afin de pouvoir les sécuriser.

Deux campagnes de mesures lasergrammétriques de 5 jours ont été nécessaires à l'acquisition de l'ensemble des données. Le traitement des nuages de points a abouti à une animation vidéo de 5min faisant ressortir les éléments principaux. La visualisation des résultats est également disponible sous une plateforme de réalité virtuelle grâce au logiciel Faro Scene.

2. Acquisition et traitement des données

Acquisition des nuages de points

Le premier jeu de données lasergrammétriques concerne le nuage de points LiDAR, acquis par l'entreprise AIRD'ECO, et exploité par Edouard JUND lors de son PRT de 2020. Un modèle 3D réaliste, sous forme de maillage texturé, a été fourni et permet de visualiser les sols et bâtiments de l'enceinte. On constate cependant que les murs de la citadelle ne sont pas correctement représentés. Les deux semaines d'acquisition (février et mai 2022), ont donc permis de réaliser un levé complémentaire de l'extérieur (au scanner laser statique) ainsi que de mesurer l'intérieur (aux lasers scanners statiques et mobiles) des galeries.

La première étape du traitement a servi à rassembler l'ensemble des nuages de points. Le modèle issu des données LiDAR étant géoréférencé dans le système de coordonnées Lambert 93, il était préférable de continuer dans ce même système. Le canevas polygonal a donc été calculé dans cette projection conique, conçue pour l'ensemble de la France. Cependant, les corrections de distance sont importantes lorsqu'on s'éloigne trop des parallèles de contact. C'est le cas à Doullens car, étant situé au nord de la France, l'altération linéaire implique une correction des distances de 1103mm/km. De plus, Faro Scene, logiciel utilisé pour le géoréférencement des nuages de points, n'applique pas de correction des distances sur les visées. C'est pourquoi les écarts provenant de la correspondance entre les coordonnées calculées avec le canevas polygonal et celles des nuages de points étaient trop importants impliquant des difficultés pour le géoréférencement en Lambert 93. Il a donc fallu passer par un système local (Lambert 93 zone 9, CC50) impliquant peu de correction (-82mm/km), avant de changer de système de coordonnées les nuages de points un par un pour les recalculer en Lambert 93.

Le détail figurant dans les galeries n'étant pas très important, un rééchantillonnage spatial a été appliqué afin de ne garder qu'un point chaque centimètre. L'étape de segmentation est ensuite venue clôturer la première partie du traitement, en séparant et en ne gardant que les données utiles du nuage de points (intérieur, extérieur, végétation et murs)



Fig. 2 : Fusion des nuages de points de la première campagne pour contrôle du bon positionnement



Fig. 3 : Fusion des nuages de points (après segmentation et classification) avec les données LiDAR

Maillage et application des textures

Le maillage 3D permet de recréer un modèle du site en utilisant le nuage de points. L'extérieur de la citadelle avait déjà été maillé lors du PRT d'Edouard Jund. Les galeries intérieures ont donc fait l'objet de l'essentiel du travail lors de ce PFE. En s'inspirant de plusieurs projets similaires, en partenariat entre l'INSA et Somme Patrimoine, deux méthodes principales sont ressorties. La modélisation des souterrains de Naours (*Maxime Balland, 2016*) a fait appel à un maillage dit « poisson ». Cette solution est utilisée afin de résoudre les problèmes de bruit et de non-uniformité d'un nuage de points. Elle vise à ajuster une fonction scalaire 3D à un nuage de points orienté, afin de créer une enveloppe formant un maillage. Cette méthode est efficace lorsque les surfaces que nous souhaitons modéliser sont complexes et irrégulières. Elle implique cependant l'utilisation de plusieurs

logiciels ainsi que le calcul des normales à chaque point, ce qui rallonge le temps de traitement et le volume de données. Les galeries souterraines des contremines n'étant pas complexes, une seconde méthode, utilisant une triangulation de Delaunay, a été préférée. La création du modèle se fait en reliant les points les plus proches, créant des facettes (triangles) grâce au logiciel 3D Reshaper. Ce logiciel propose un module complet où les paramètres sont nombreux et permettent de représenter fidèlement l'objet d'étude. En choisissant la taille des triangles, on va pouvoir régler la qualité du détail représenté faisant varier le nombre de facettes et impactant la taille du fichier stocké. Dans le cadre d'un projet d'une telle envergure, cela représente un élément important à prendre en compte. C'est pourquoi le projet a été divisé en 14 parties traitées indépendamment avant d'être fusionnées pour la création de l'animation vidéo. Pour chacune d'entre elles, les éléments du sol et des murs ont été rééchantillonnés avec une distance moyenne séparant deux points comprise entre 2 et 4 cm.

Les maillages peuvent ensuite être représentés de diverses façons, donnant plus ou moins de réalisme à la scène. Il est possible d'appliquer des couleurs unies, avec des aspects (brillance, ombre, ...), ou d'utiliser des textures. Ainsi, si la première solution permet de se rendre facilement compte de la forme globale de l'objet, elle ne met pas en avant les aspects liés aux matériaux des surfaces. Cette technique a donc été utilisée uniquement pour les éléments de détail (socles de canon et petites parties métalliques). L'utilisation de textures a été préférée pour le reste du projet. Elles proviennent de deux sources différentes, suivant la méthode d'acquisition sur le terrain et la qualité du rendu souhaité :

- des images panoramiques sont utilisées pour les zones acquises au laser scanner statique. Elles proviennent du logiciel Faro Scene, qui génère des vues planaires en intensité, s'apparentant à des photos 360° en noir et blanc. En reprenant les informations de position et de rotation du centre de l'objectif puis en supprimant les éléments indésirables des photos (sphères, gaines, ...) il est facile de projeter l'image sur la surface souhaitée pour lui donner un aspect réaliste.

- les zones couvertes au laser scanner mobile sont quant à elles texturées à partir d'une bibliothèque en ligne. Ce sont des images génériques qui sont répétées. En variant les paramètres de couleur, d'intensité et d'échelle, il est possible de s'approcher grandement du résultat souhaité.



Fig. 4 : Salle texturée à partir d'images panoramiques



Fig. 5 : Salle texturée à partir de la bibliothèque de textures

L'assemblage des maillages intérieurs et extérieurs représente une grande partie du modèle. Cependant, pour donner un aspect plus réaliste au projet, les parties extérieures de l'enceinte ont dû être complétées avec les nuages de points (végétation et murs verticaux).

3. Mise en valeur des modèles

Utilisation du nuage de points et du maillage

Pour améliorer le rendu visuel de la citadelle, un traitement au niveau de la couleur de la végétation a été effectué. En effet, pour effectuer la colorisation du nuage de points, le scanner laser associe une image panoramique et colorise ainsi chaque point en fonction de la valeur RVB associé au pixel correspondant. Lors de la colorisation de points éloignés et épars, le pixel correspondant au point est parfois légèrement décalé et une mauvaise couleur est donc représentée. Ce phénomène

est surtout visible sur la végétation, où les feuilles apparaissent d'une couleur bleue ou blanche (couleur du ciel en arrière-plan). 3D Reshaper propose un outil d'extraction de points basé sur leur couleur qui permet de séparer les nuages, en fonction de la valeur RVB associée à chaque point. Avec un logiciel d'édition de texte (Notepad++ ou Excel), on va ensuite changer les valeurs de couleur pour représenter la scène en nuances de vert.

Animation et visite virtuelle



Fig. 6 : Végétation avant (gauche) et après (droite) modification de la couleur associée à chaque point

Les modèles virtuels permettent de figer un morceau d'histoire sous forme dématérialisée et intemporelle. La manipulation et la visualisation des maquettes sont cependant accessibles au travers de logiciels spécifiques. Afin de faire découvrir le travail au plus grand nombre, les animations vidéo jouent un rôle important pour la communication. Elles rendent les données accessibles et mettent en valeur le travail fourni. La plupart des logiciels disponibles proposent des solutions de visite au travers de vidéos basées sur un chemin de caméra. Ce cheminement, faisant ressortir les aspects importants du site, a été défini en accord avec Monsieur Gilles Priloux, directeur du PFE.

Le principal outil utilisé pour la restitution a été 3D Reshaper. Le module proposant les animations vidéo est efficace lors du passage dans des maillages et a donc été utilisé pour l'intérieur des galeries. Toutefois, les paramètres vidéo ne sont pas modifiables et ne permettent pas de gérer correctement les nuages de points (nombre d'images par seconde trop faible ce qui engendre un grésillement). L'utilisation du logiciel Faro Scène a donc été nécessaire pour les passages en extérieur du modèle. C'est également avec ce moteur que la réalité virtuelle, utilisant un casque fonctionnant par stéréoscopie, a été proposée. Cette méthode a recours à des capteurs (accéléromètres, gyroscopes et magnétomètres) qui visent à reproduire les mouvements de l'utilisateur, lui permettant de se déplacer librement dans le modèle.

3. Conclusion et perspectives

La richesse de l'histoire française en fait un pays regroupant un grand nombre de monuments et sites archéologiques. La conservation du patrimoine représente des enjeux importants pour la société actuelle et les nouveaux outils numériques facilitent et accélèrent l'ensemble des procédés de recherche archéologique. La mise en valeur de la citadelle de Doullens à travers une maquette numérique représente donc une étape importante pour la prochaine ouverture au public du site. Ce travail permet également de revenir sur un aspect sécuritaire en indiquant l'emplacement et la taille de l'ensemble des cheminées d'aération.

Les deux missions de levé terrain ont permis l'acquisition d'environ deux-tiers des galeries des contremines. L'angle nord de la citadelle, ne communiquant pas avec le reste des souterrains n'a cependant pas été acquis et pourra donc faire l'objet d'une suite à ce PFE.

Levé et numérisation du château de Lichtenberg en vue d'une proposition de visite virtuelle du site à des périodes remarquables

PFE présenté par : **Maxime Rocha**

Société d'accueil : **Communauté de Communes de Hanau – La Petite Pierre**

Directrice de PFE : **Gaëlle Messang**

Correctrice : **Hélène Macher**

Encadrante : **Tania Landes**



1. Contexte et objectifs du Projet de Fin d'Etudes (PFE)

Le château de Lichtenberg a été classé aux monuments historiques en 1878 par l'administration allemande et ce classement est confirmé par les autorités françaises en 1930. Il se situe dans la ville éponyme à environ 60 km au nord de Strasbourg. Il s'agit d'une forteresse datant du 13ème siècle ne possédant pas de date exacte de construction. En effet, une simple mention signale son appartenance aux Seigneurs de Lichtenberg en 1206. Il s'agit d'une famille très puissante étant donné qu'elle possédait une cinquantaine de châteaux dans la région. Aujourd'hui, la forteresse est composée de plusieurs bâtiments tels que le corps de garde, la tour de l'horloge, la chapelle, les casemates, le pavillon des Dames et l'arsenal.

Le château n'a pas toujours été dans l'état dans lequel nous le découvrons aujourd'hui. En effet, durant les siècles derniers, il a subi de nombreuses transformations suite aux différentes guerres notamment. Beaucoup de personnages et diverses dates sont également en lien. Par exemple, en 1480, le dernier des Lichtenberg (Jacques le Barbu) décède et le château sera partagé entre ses neveux. En 1580, Philippe IV de Hanau-Lichtenberg va demander à Daniel Specklin, qui est l'architecte de la ville de Strasbourg, de transformer le château en forteresse.

L'objectif du PFE est de répondre au besoin de faire connaître le site à un plus large public au travers d'une vidéo de visite virtuelle du site à des périodes remarquables. Pour cela, nous allons utiliser le nuage de points obtenu grâce aux acquisitions, mais également à des modèles 3D construits sur la base des différentes photographies et des différents plans et dessins qui ont été archivés. Cette vidéo permettra de faire découvrir au grand public l'ensemble du site aux différentes époques. La création de ce PFE s'est inspirée d'un projet similaire réalisé par Théo Benazzi pour le château du Kagenfels (Benazzi, 2018).

Ce PFE est la suite du Projet de Recherche Technologique (PRT) effectué au premier semestre de l'année scolaire 2021-2022. Ce dernier avait pour but de mettre en place un canevas de points d'appui par topographie conventionnelle, de numériser le site par lasergrammétrie ainsi que par photogrammétrie aérienne, de traiter ces données ainsi que les géoréférencer puis d'analyser les erreurs et la qualité du modèle.

2. Acquisition et traitement des données

Bien qu'une grande partie des données ait été acquise durant le PRT, des données sont manquantes au niveau de certaines parties du site telles que les casemates par exemple. Plusieurs journées supplémentaires ont été consacrées à réaliser les différentes acquisitions lasergrammétiques et photogrammétiques venant finaliser la base de ce projet.

Une des périodes remarquables que l'on souhaite visualiser concerne le château en ruines. Pour ce passage, nous avons recueilli des données acquises lors d'une campagne photographique réalisée par l'ENSAIS (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, prédécesseur de l'INSA Strasbourg) en 1993 lorsque le château était alors en ruines. Des photographies sur plaques de verre ainsi que des photographies négatives ont été conservées. Une première étape a été entreprise pour numériser toutes ces archives. Après rehaussement des négatifs et analyse de la qualité, un nuage de points à partir de ces photographies d'archives a pu être produit par photogrammétrie multi-vues (*SFM MVS : Structure From Motion Multiview Stereo*) en utilisant un logiciel de traitement d'images. Des points de références ont été placés sur le site lors de la prise des photographies. Grâce à ces points géoréférencés, il a été possible de superposer ces nouvelles données à notre projet.

Les bâtiments ont été construits sur la base des bâtiments en ruines qui sont le pavillon des Dames et l'arsenal. On peut observer un exemple sur la figure 1, le nuage de points des ruines ainsi obtenu, en comparaison avec le nuage de points de l'état actuel.



Fig. 1 : Nuage de points des ruines (1993) en nuances de gris à gauche ; Nuage de points de l'état actuel (2022) en couleurs réelles à droite

Par la suite, nous verrons la procédure mise en place pour l'intégration de ces données dans le nuage de points actuel, et qui constituera la deuxième partie de la vidéo, à savoir une visite virtuelle dans « Le château en ruines ».

3. Modélisation 3D des bâtiments

La modélisation ne concerne pas l'ensemble du site, mais seulement certains bâtiments sélectionnés notamment pour leur importance historique. Nous avons alors effectué le choix de modéliser les plus importants. Ces bâtiments ont été définis au début du projet et sont au nombre de sept. Il s'agit des tours, de la tour maîtresse, de l'arsenal, du pavillon des Dames, de la caserne, de la tour de l'horloge et de la chapelle.

Avant toute chose, une étude des éléments à notre disposition pour la modélisation est à effectuer. Ici, nous disposons des données acquises durant les projets de l'année 2021-2022 mais également des documents d'archives (des illustrations, des plans, des photographies, ...).

La plupart des bâtiments que l'on souhaite représenter sont existants, soit ils ont subi une rénovation, soit des restes sont visibles. Il nous est alors possible d'utiliser ces données acquises pour restituer la forme globale de ces bâtiments, notamment leurs dimensions. Ces données acquises sont sous forme de nuages de points et ne peuvent être importés dans les logiciels de modélisation. C'est pourquoi il est conseillé d'effectuer un maillage préalable du nuage de points. La plupart des modèles ont été conçus de cette manière, c'est-à-dire en partant du nuage de points maillé. Les bâtiments à modéliser ont un certain degré d'incertitude en ce qui concerne la géométrie. Pour beaucoup d'éléments, nous ne disposons que de dessins ou illustrations et non d'éléments sûrs. Certains éléments comportant de nombreux détails ont été maillés afin d'en conserver un maximum. En les combinant aux primitives géométriques, nous obtenons donc un modèle hybride.

La modélisation se déroule en plusieurs étapes allant de la source des données à l'étude de l'incertitude associée à la géométrie. Ces étapes sont développées sous la forme d'un organigramme dans la figure 2.

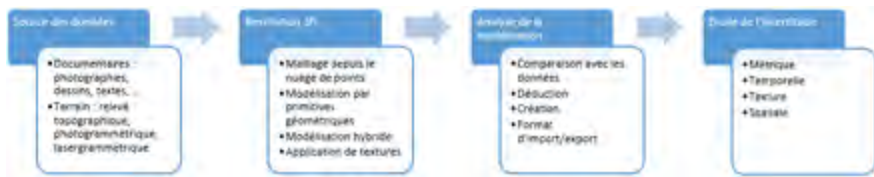


Fig. 2 : Organigramme de la modélisation des bâtiments

Modélisation par primitives géométriques

La problématique nous amène à restituer totalement des bâtiments disparus entièrement ou partiellement. Pour cela, nous devons réfléchir à la chaîne de traitements à mettre en place pour répondre aux mieux à nos besoins.

La modélisation géométrique est basée sur la construction géométrique d'éléments identifiables et descriptibles d'un point de vue mathématique dans le nuage de points. Elle consiste à représenter l'objet à l'aide de primitives géométriques (plan, cylindre, sphère, ...) que l'on vient ajuster au nuage afin de créer la forme souhaitée. Cette méthode permet un stockage beaucoup plus léger qu'un modèle maillé. Néanmoins, cela provoque une simplification de l'objet d'étude.

Modélisation hybride

Afin de répondre au mieux aux besoins, c'est à dire de simplifier la forme des bâtiments à l'aide de primitives géométriques mais de garder un niveau de détails élevé sur des parties telles que les encadrements de portes, il est possible de combiner les deux méthodes de modélisation pour obtenir un modèle hybride, qui comprend alors les avantages des deux techniques. Cette solution permet d'optimiser le modèle final du point de vue géométrique en conservant les détails souhaités sur une partie et en simplifiant une autre partie ne nécessitant pas autant de détails. Cette solution permet également d'alléger le modèle sur les zones où la géométrie est simple.

Texturage des modèles 3D

La principale méthode de texturage est la cartographie UV (Wikipédia, 2021). Elle consiste à projeter une image 2D décrite dans un repère U, V sur la surface d'un modèle 3D. Grâce à cette méthode, il est possible de texturer des formes complexes facilement. On peut pour cela utiliser des textures téléchargées sur Internet (www.textures.com) mais aussi des photographies réalisées sur le terrain. Ici, pour obtenir un résultat le plus réaliste possible, une campagne photographique a été réalisée afin d'appliquer les images provenant du site.

Lorsque l'on souhaite appliquer l'image sur le modèle complexe, le logiciel *Blender* propose une application automatique par cartographie UV. Sur la figure 3, nous pouvons observer un exemple du pavillon des Dames modélisé en 3D et texturé par cartographie UV à l'aide de photographies prises sur site.



Fig. 3 : Pavillon des Dames texturé à partir de photographies

4. Représentation de l'incertitude

La représentation de l'incertitude de restitution consiste à visualiser les éléments connus, totalement, partiellement ou imaginés à l'aide d'outils tels que des échelles chromatiques. Cela permet de comprendre comment ont été restitués les bâtiments, à savoir s'ils proviennent de déductions, de connaissances ou de documents connus. Des intervalles d'incertitudes peuvent être imaginés pour représenter le degré d'incertitude. Ici, le choix d'une échelle chromatique a été fait, allant de la couleur verte au rouge selon la certitude de la restitution, comme suggéré dans (Landes et al., 2019). La figure 4 représente l'incertitude de restitution sur le bâtiment choisi ici, ainsi que le tableau récapitulatif des couleurs attribuées aux différents niveaux de connaissance.



Niveau de connaissances			
Aucune donnée	Faible	Fort	Très fort
Ni iconographique ni document, imagination	Déduction, sources textuelles	Données approximatives, dessins	Existence des éléments, iconographie

Fig. 4 : Tableau de représentation de l'incertitude (à droite) et exemple de cette représentation sur le bâtiment de la Chapelle (à gauche) tel que suggéré dans (Landes et al., 2019)

Ce travail de représentation de l'incertitude s'appliquera sur l'ensemble des bâtiments modélisés durant ce PFE.

5. Création de la vidéo de réalité virtuelle

L'objectif de la vidéo est de permettre, à toute personne le souhaitant, de visualiser le site aux différentes périodes remarquables. La vidéo a été réalisée dans le logiciel où les différents modèles 3D ont été intégrés. Il est possible d'y créer des points de vue ainsi qu'un chemin de caméra pour en extraire une vidéo. Le donneur d'ordre souhaitant disposer d'annotations, d'une bande son, d'effets spéciaux, un traitement de la vidéo a été effectué en ce sens. Pour cela, plusieurs logiciels sont à notre disposition, tels que VSDC Video Editor ou MiniTool MovieMaker par exemple. La vidéo a été réalisée en 1980x1080 – 60 fps et dure environ 5 minutes. Elle sera diffusée sur place, dans l'auditorium ainsi que sur le site internet du château : www.chateaudelichtenberg.alsace (figure 5).

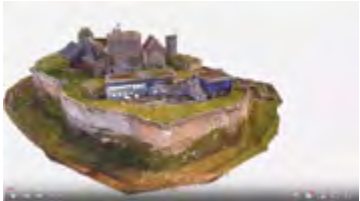


Fig. 5 : Aperçu de la vidéo durant la période actuelle

6. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de mettre en œuvre une visualisation du site au cours des siècles. Il permet de proposer une bonne compréhension de son évolution pour l'ensemble des visiteurs. D'autre part, ce livrable permet de documenter ce patrimoine et de comprendre son évolution dans le temps. Ce travail pourrait, par la suite, être complété et amélioré en l'étendant à d'autres bâtiments qui n'ont pas été modélisés durant ce projet ou encore introduire l'utilisation de la réalité augmentée.

7. Références bibliographiques

[Benazzi, 2018] Benazzi, T. (2018). Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Institut National des Sciences Appliquées (INSA), Strasbourg.
[Landes et al., 2019] Landes, T., Heissler, M., Koehl, M., Benazzi, T., and Nivola, T. (2019). Uncertainty visualization approaches for 3D models of castles restituted from archeological knowledge. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9 :409–416.
Wikipédia (2021) – Cartographie UV : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cartographie_UV

Solution de numérisation, de maillage et de modélisation d'éléments complexes et architecturaux pour une intégration au logiciel Revit

PFE présenté par : **Saphia BOUALAOU**
Société d'accueil : **PARERA**
Directrice de PFE : **Céline LAGUERRE**
Tuteur de PFE : **Pierre PEGOSSOFF**
Correcteurs(trices) : **Hélène MACHER, Emmanuel ALBY**



GROUPE
Parera

1. Introduction et contexte de l'étude

Parera est une société composée de 720 collaborateurs, elle fut fondée en 1968, et a développé ses activités autour des opérateurs réseaux. Son activité s'articule autour des métiers de la cartographie, le DAO et des SIG pour les principaux gestionnaires de réseaux, des collectivités et syndicats d'énergies. Son siège social est situé, à une trentaine de kilomètres de Toulouse (31), à L'Isle Jourdain (32) dans le Gers. Depuis 2018, Parera a pris un virage vers la maquette numérique. Pour se faire, le groupe a investi dans le logiciel Revit pour la modélisation de maquette spécifique au bâtiment. La maquette numérique et le BIM deviennent alors une source importante de revenu pour la société. C'est donc dans ce cadre bien particulier que la société cherche à être toujours plus performante et reste à l'affût des nouvelles technologies proposées dans le domaine.

C'est ainsi que ce projet se construit autour de la modélisation 3D d'éléments complexes et architecturaux qui nécessitent de la rigueur dans le lever et de la finesse dans le modèle final. Cette étude répond à une demande de l'entreprise qui propose aujourd'hui à ses clients des maquettes en LoD (Niveau de détails) 200 qui correspond au niveau de détail minimal qu'exige le BIM avec une tendance qui se généralise vers le LoD 300 à 400. Aujourd'hui Parera aimerait répondre à des exigences de détails pour des projets nécessitant une représentation proche du réel dans ses rendus, s'inscrivant dans la préservation du patrimoine notamment. Il s'articule autour d'une étape de numérisation par lasergrammétrie et par photogrammétrie permettant d'obtenir un nuage de points puis son maillage associé. Cette donnée sert de base à la production d'un modèle maillé complet construit à partir des algorithmes de Delaunay et de surface de reconstruction Poisson. Le maillage permet alors la production d'objets paramétrables optimisés, intégrables dans un logiciel de modélisation axé BIM tel que Revit.

Pouvoir intégrer des objets uniques ou récurrents avec un grand niveau de détail nécessite un grand temps de modélisation s'ils doivent être reproduits à partir de primitives géométriques. Ces objets particuliers n'existant pas dans la bibliothèque Revit de l'entreprise et les modèles en ligne n'étant pas satisfaisants ou peu représentatifs la création d'un objet modélisé est la seule alternative. Comme ceux mis en avant dans notre étude.



Fig.1 : à gauche : Photo du bénitier, au centre : Photo de la clôture de chœur, à droite : Photo du crucifix

2. Objectifs du Projet de Fin d'Etudes

Face à une demande croissante concernant le réalisme et le niveau de détail des rendus BIM, le but est d'intégrer le maillage dans la méthode mise au point par le pôle Bâtiment et Patrimoine du groupe. Les objectifs de ce projet de fin d'études sont donc :

- Proposer une adaptation de la méthode de numérisation existante pour permettre le maillage d'objets complexes ;
- Mettre en place une chaîne de traitement de la donnée pour générer semi-automatiquement un modèle numérique maillé optimisé depuis les acquisitions terrain ;
- Etablir un protocole d'intégration des modèles dans Revit pour créer des objets paramétrables.

3. Numérisation et traitement optimisé pour le maillage

La modélisation d'objets paramétrables en LoD 400 nécessite des outils adaptés, un scanner laser [...], etc. La numérisation de ces objets par lasergrammétrie et photogrammétrie sont le fruit de méthodes adaptables à l'objet et son environnement et contraignent l'usage de méthodes de traitement dédiées : consolidation, segmentation et échantillonnage disponibles uniquement dans des logiciels orientés métiers.

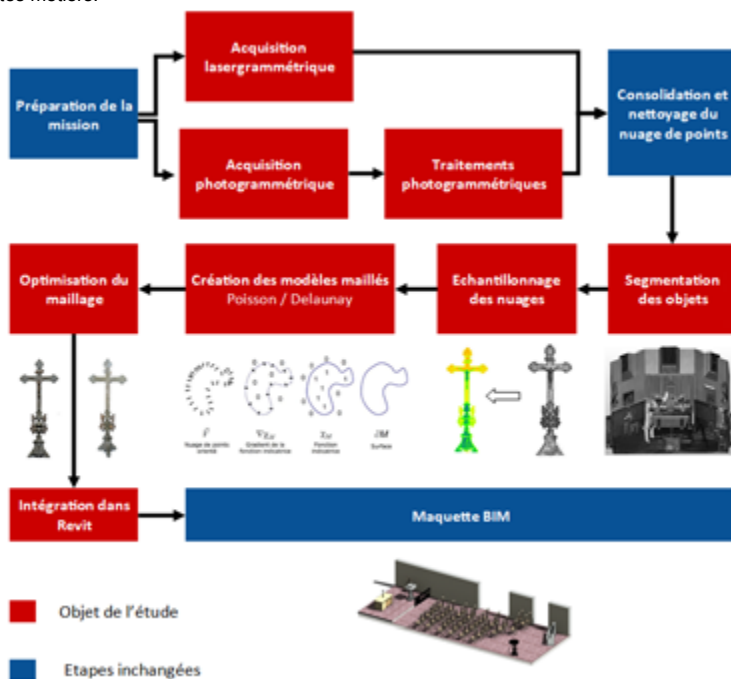


Fig.2 : Logigramme de la méthode mise au point dans l'entreprise Parera

Une fois la consolidation effectuée et validée, le nuage doit être nettoyé pour éliminer des valeurs parasites et aberrantes et ainsi limiter les effets du bruit. Ce bruit peut-être la raison d'un défaut d'alignement et donner au maillage un effet double peau, il n'est donc pas réaliste et doit être éliminé par un filtre. Pour cela, il existe des solutions d'échantillonnage. Selon la méthode utilisée, le nuage de points peut être échantillonné pour maintenir une densité de points constante, et alléger le fichier sans perte d'information.

Le processus de segmentation du nuage de points est une étape essentielle de la chaîne de traitement, elle permet de dégager les différents éléments constitutifs d'un nuage de points pour être traité, analysé, visualisé de manière indépendante.

La méthode développée ici ne nécessite que quelques positions supplémentaires pour le scanner laser et l'apport de la photogrammétrie pour un rendu photoréaliste, lors de la numérisation des éléments complexes et architecturaux. Les méthodes de traitements ont également été adaptées pour permettre la préparation des nuages de points à la réalisation de maillages complets.

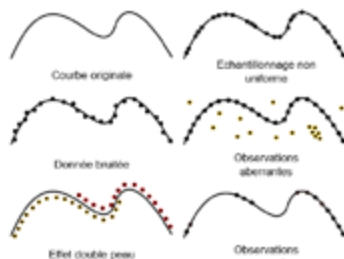


Fig. 3. Différents types de défauts pouvant affecter un nuage de points, représentés sur l'exemple d'une courbe en 2D, inspiré de (Berger et al., 2017)

4. Maillage d'éléments complexes

Afin de mettre en œuvre et d'exploiter les données acquises et traitées, le nuage de points doit être modélisé. L'optimisation et la précision étant une qualité essentielle pour le travail de modélisation d'objets complexes, les différentes représentations et simplifications ne doivent pas altérer ces paramètres. La modélisation par maillage (ou modélisation polygonale) est la méthode majoritairement utilisée car elle présente l'avantage d'être fidèle au nuage de point ainsi modélisé. Selon la définition du niveau de détail, un modèle maillé sera bien plus lourd qu'une modélisation par primitives géométriques. Cependant, cette méthode largement étudiée dispose d'une quantité de possibilités de simplifications. Pour la représentation visuelle et l'utilisation virtuelle, il est nécessaire de créer des liens, en reliant les points entre eux et en formant ainsi des faces, généralement des triangles, des quadrilatères ou des polygones convexes simples, pour obtenir un modèle de maillage qui représente topologiquement l'organisation du nuage.

Cette modélisation est réalisée sur le logiciel open-source Meshlab. Cet outil permet également d'effectuer de manière semi-automatique les calculs nécessaires à l'élaboration du maillage comme le lissage Laplacien et manuellement comme la réparation des géométries avec la clôture des mailles, utilisés dans le cadre de ce projet. La chaîne de traitement de maillage se trouve ci-dessous.

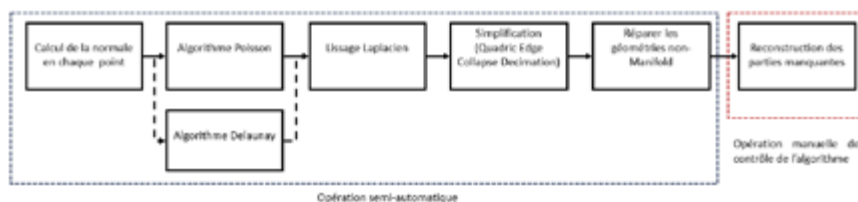


Fig. 4 : Logigramme du script Meshlab d'automatisation du maillage

Avant de commencer le traitement, il est nécessaire de compiler une liste des différentes méthodes de maillage disponibles. La reconstruction de surface comme solution à l'équation de Poisson (Kazhdan et al., 2006) serait ici la plus adéquate pour les objets considérés comme des solides complexes. L'algorithme utilisé est une solution globale et robuste dans l'approximation des données bruitées et permet de créer une surface lisse à l'objet maillé.

Dans le cas d'objets plans comme des boiseries ou des clôtures avec des détails en reliefs, la triangulation de Delaunay des nuages de points 3D fournit des résultats de meilleure qualité. En 2D : À partir d'un ensemble de points E dans le plan, la triangulation fonctionne de telle sorte qu'aucun de ces points ne soit à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles. En trois dimensions, le principe est le même, mais on utilise une sphère circonscrite.

Les opérations que la chaîne de traitement comprend ont été automatisées afin de faciliter la production des modèles en limitant le temps opérateur par l'augmentation du temps machine. Les modèles maillés permettent la restitution fidèle et exhaustive des détails des objets complexes. Cependant ils nécessitent une optimisation pour être intégrés dans des logiciels orientés BIM. Afin de faciliter son intégration dans Revit, le nombre limite de faces des objets ne doit pas dépasser 150 000. Ainsi, il est possible de valider la conformité de notre modèle via le logiciel CloudCompare en comparant le maillage à son nuage de point original. On fixe l'erreur maximale acceptable à 5 cm mais considérons un maillage comme fidèle s'il atteint une précision σ de 1 à 3 cm.

5. Intégration de l'objet dans le logiciel Revit

L'étape d'intégration au logiciel est la dernière de la chaîne de traitement, elle consiste à intégrer notre maillage dans le logiciel Revit comme élément complémentaire à une maquette 3D. Pour cela l'outil Dynamo qui est un outil de programmation intégré à Revit permet de mettre en place des routines pour les chaînes de traitement complexes.

L'intégration du maillage dans l'environnement Revit passe par un export du maillage en format *.obj contenant la description de la géométrie 3D vers le plugin. Le script d'intégration mis en place sous forme de programmation visuelle permet désormais d'intégrer des objets paramétrables dans la maquette numérique. Il est possible de renseigner des informations telles que leur catégorie, nom, échelle etc. Comme il est possible de le voir dans l'illustration suivante :



Fig.5 : Logigramme du script Dynamo pour Revit d'automatisation du maillage

6. Conclusion et perspectives

Cette étude met en place une chaîne de traitement complète. Elle permet la modélisation des objets complexes par maillage en comprenant les étapes de la numérisation à l'intégration dans le logiciel Revit. Les étapes de cette chaîne comprennent une génération semi-automatique de modèle maillés optimisés intégrables dans Revit, cela permet la minimisation des ressources nécessaires à la création de ce nouveau type de livrable.

Le projet a alors permis d'offrir une veille plus précise concernant les logiciels de maillage et de modélisation depuis des nuages de points, une meilleure connaissance du comportement des appareils pour des acquisitions nécessitant un grand niveau de détail. Elle a également permis de renforcer les compétences de l'équipe Patrimoine en programmation notamment dans Dynamo. La réalisation de rendus photoréalistes a également permis de proposer une autre méthode de texturage pour les rendus sous Lumion. Bien que cette étude permette déjà l'intégration de modèles optimisés d'objets complexes exploitables dans Revit, il est possible d'aller plus loin et d'intégrer un mappage de texture aux objets pour garantir un rendu photoréaliste dans les logiciels orientés BIM.

Berger, M., Tagliasacchi, A., Seversky, L. M., Alliez, P., Guennebaud, G., Levine, J. A., Sharf, A., Silva, C. T. (2017). A survey of surface reconstruction from point clouds. *Computer Graphics Forum*, 36(1) :301–329

Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H. (2006). *Poisson surface reconstruction*. Baltimore : Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing. June, pp 61-70

Initialisation de la pose de l'utilisateur en réalité augmentée par la reconnaissance de l'environnement



PFE présenté par : **Nathan KASTLER**
Société d'accueil : **TT Géomètres-Experts**
Directeur de PFE : **Guillaume BERSON**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**
Encadrant : **Guillaume BERSON**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Au cours de ses nombreuses campagnes d'acquisition, la société TT Géomètres-Experts a accumulé une grande quantité d'informations (données 3D) issues de l'environnement urbain. On retrouve parmi ces données des modèles 3D provenant des nombreux travaux de modélisation de maquettes BIM, ou encore, provenant des modélisations des diverses entités de voirie, tels les réseaux enterrés. On retrouve également des nuages de points denses de l'environnement de la voirie, résultants de différentes campagnes de relevés réalisés au scanner dynamique (voir figure 1).



Fig. 1 : Visualisation des données issues de l'environnement de la voirie

TT Géomètres-Experts a désormais pour objectif d'afficher et de visualiser ses modèles 3D directement sur le terrain, au travers d'une technologie de réalité augmentée (RA). L'objectif de ce PFE est alors de définir une méthode permettant la pose (positionnement + orientation) précise de ce contenu en milieu urbain, étape nécessaire à une visualisation fidèle à la réalité. Ce PFE donnera ainsi suite à la mise en place d'une solution finale relative à la création d'une application de RA, mettant en application la méthode définie au cours de ce PFE.

La solution recherchée devra alors fournir une pose précise des éléments virtuels dans la scène (précision de 10 cm), tout en restant compatible avec le plus grand nombre d'appareils de RA (smartphone, et tablette). Il sera alors nécessaire de se limiter à l'utilisation de technologies et composants disponibles sur la grande majorité de ces appareils. La première étape de ce projet a alors consisté à rechercher les différentes solutions et méthodes existantes permettant la pose de contenu virtuel en RA, dans le but d'établir l'état de l'art.

2. Méthodes d'initialisation en milieu extérieur

Dans le contexte de la RA, l'initialisation d'un contenu virtuel désigne l'étape où la pose de l'objet virtuel dans la scène est calculée, aboutissant au placement et à l'affichage de l'objet dans la scène à l'instant t . La pose de l'objet virtuel étant directement liée à celle de la caméra de l'appareil, le calcul de la pose de ce dernier est la phase la plus importante de l'initialisation. Une fois cette étape réalisée, l'objet est maintenu dans la scène via le suivi de l'appareil dans la scène au cours du temps. L'objet virtuel peut ainsi être visualisé en RA au cours de l'étape d'augmentation (voir figure 2).



Fig. 2 : Etapes d'une session de réalité augmentée

En milieu extérieur, on retrouve principalement deux méthodes d'initialisation :

▪ **Initialisation par méthode GNSS :**

Cette méthode est majoritairement utilisée par les solutions commerciales, recherchant à afficher des infrastructures géoréférencées (voir exemple figure 3). Une antenne GNSS est utilisée et permet de garantir un positionnement centimétrique de l'appareil. Le tableau ci-dessous décrit les principaux avantages et inconvénients de cette méthode.



Fig. 3 : Solution Trimble SiteVision

Avantages	Inconvénients
○ Positionnement précis du contenu virtuel (jusqu'à 1 cm) ○ Initialisation rapide	○ Nécessite un contenu virtuel géoréférencé ○ Nécessite une antenne GNSS externe ○ Perte de précision en milieu non dégagé

▪ **Initialisation par reconnaissance de la scène :**

Son application nécessite l'acquisition au préalable d'informations issues de la scène en question. Dès lors, au cours d'une expérience de RA dans cette scène, ces informations seront comparées à celles détectées en temps réel par l'appareil. La mise en correspondance de ces dernières permettra de ce fait une reconnaissance de la scène, et la détermination de la pose de l'appareil au sein de cette dernière. Le tableau ci-dessous décrit les principaux avantages et inconvénients de cette méthode.

Avantages	Inconvénients
○ Un unique appareil de RA suffit, aucun dispositif supplémentaire n'est nécessaire ○ Contenu virtuel non nécessairement géoréférencé	○ Travail de préparation de la session de RA : - Acquisition préalable des informations issues de la scène - Définition de la pose de l'objet virtuel relativement à la scène. Cette étape définit l'emplacement auquel sera affiché l'objet en RA.

3. Solution retenue et méthodes envisagées

La solution résultante de ce PFE vise à déterminer une méthode d'initialisation permettant à toute personne possédant un simple smartphone de pouvoir visualiser un contenu virtuel avec précision sur le terrain, sans nécessité de se munir de matériel supplémentaire. Cet argument constitue l'une des raisons principales qui nous ont poussé à nous intéresser à la deuxième méthode présentée, et l'on notera d'ailleurs que TT Géomètres-Expert possède déjà des informations issues de la scène. Cependant, il a été constaté que l'ensemble des solutions existantes réalisent cette reconnaissance de la scène via une mise en correspondance d'informations issues de données 2D. Pour ce faire, elles utilisent des points clés, qui sont des points ayant été détectés dans une image, puis décrits. Si la détection permet l'obtention des coordonnées (x, y) dans l'image, la description du point vise à lui attribuer une description visuelle de la zone de l'image à laquelle il fait référence. Cette description a pour but de le rendre unique, et discernable des autres. Ainsi, la reconnaissance de la scène est réalisée par l'appariement des descriptions visuelles des points clés acquis au préalable avec celles des points clés détectés en temps réel.

Dans notre cas, les seules données préalablement à disposition sont des nuages denses de l'environnement de la voirie, connus en intensité (voir figure 1). Les scans ayant été réalisés sans prise de photos, il n'est alors pas possible d'obtenir directement des descriptions visuelles. L'étude de la littérature scientifique nous a alors permis de définir deux pistes de développement toutes deux basées sur une initialisation via une reconnaissance de la scène par une mise en correspondance de données 3D.

3. 1. Initialisation basée sur la triangulation de points clés

Les données 3D prises en compte dans cette partie correspondent aux coordonnées 3D des points clés dans l'espace, calculées par triangulation. En fonction de l'algorithme utilisé pour leur

détection, ces points auront davantage tendance à se situer au niveau de zones spécifiques dans l'image, comme les coins proéminents par exemple (voir figure 4). Ainsi, pour une telle initialisation, le cas idéal nécessiterait que les points détectés en temps réel soient exactement les mêmes que ceux détectés lors de l'acquisition préalable. Il serait de plus nécessaire que l'estimation de la position 3D des points dans la scène puisse être suffisamment précise pour une mise en correspondance 3D. Les résultats obtenus au cours des expérimentations ont démontré que dans ce cas de figure, une telle initialisation est possible.

Cependant, il a pu être constaté qu'un tel cas ne peut être obtenu dans des conditions réelles, ce qui est notamment dû aux angles de vue de l'appareil, aux conditions d'éclairage, ainsi qu'à l'échelle de la scène. Ainsi, cette piste de recherche pourrait aboutir à une solution finale où l'utilisateur parcourrait au cours d'une session de RA un trajet prédéfini, et ce, dans des conditions d'éclairages prédéfinies, ce qui n'est pas envisageable.

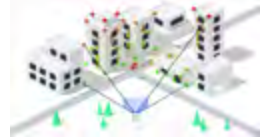


Fig. 4 : Détection de points clés dans la scène

3. 2. Initialisation basée sur une numérisation 3D

La méthode de mise en correspondance 3D décrite ici vise à mettre en relation une numérisation 3D de la scène réalisée en temps réel par le smartphone avec une numérisation réalisée au préalable. Cette dernière serait alors issue d'un scan au scanner laser, et la correspondance serait établie en utilisant une approche de consolidation de nuage de points. La précision de la pose de l'appareil à la fin d'une telle initialisation dépendrait alors directement de la précision de cette consolidation.

Pour réaliser cette numérisation 3D avec un simple smartphone, il a été décidé de se pencher sur la technologie des cartes de profondeur. Cette dernière a été rendue accessible sur un très grand nombre d'appareils grâce à l'API Raw Depth de ARCore, et permet d'estimer des cartes de profondeur à partir d'une simple caméra RVB monoculaire en mouvement, et cela à une distance maximale de 65m.

3.2.1. API Raw Depth de ARCore

ARCore est un SDK développé par Google, permettant de concevoir tous types d'applications de RA. Son API de profondeur Raw Depth, quant à elle, fournit des données de profondeur, dans l'optique de permettre à ARCore d'améliorer sa compréhension de l'environnement.

Dans le domaine de la vision par ordinateur, une carte de profondeur peut être perçue comme une image contenant des informations relatives à la distance entre le capteur d'acquisition et les éléments de la scène. Une telle distance est alors calculée pour l'ensemble des pixels de l'image. Le processus de génération de cette carte est alors décrit dans la figure 5.



Fig. 5 : Génération d'une carte de profondeur

Durant ce processus, tout en garantissant le suivi de la pose de l'appareil, ARCore acquiert au cours du temps des images dans la scène, et cela à une fréquence relative aux capacités du smartphone (30 à 60 ips). Dès lors, la création d'une image stéréo est réalisée par la mise en correspondance de l'image reçue en direct avec une image clé. Cette dernière est choisie parmi les images précédentes de manière à se retrouver dans des conditions proches du « cas normal ». Ce terme sous-entend que les axes de prise de vue des images sont parallèles et perpendiculaires à la base photographique. Les disparités peuvent alors être déduites, et décrivent le mouvement apparent des objets entre deux images stéréo. La carte de disparités permet alors d'estimer aisément la carte de profondeur, et ce via la définition mathématique découlant du « cas normal » en photogrammétrie. A ce stade, il est dès lors possible de déterminer pour chaque pixel les coordonnées 3D d'un point de la scène, de manière à générer un nuage de points.

3.2.2. Génération du nuage de points

Dans le but d'obtenir un tel nuage, une application basée sur cette API a été développée. Elle a pour but la détection en temps réel de point dans la scène, et l'export de l'ensemble des informations relatives à ces derniers au sein d'un fichier txt. Parmi elles, on retrouve notamment les coordonnées 3D, les informations RVB, ainsi que les valeurs de confiance. Bien que la documentation ARCore ne précise pas comment sont calculées ces valeurs, cette confiance se veut comme étant une estimation de l'exactitude d'un point, avec une valeur variant de 0 à 1, 1 représentant le niveau de confiance maximal. Cette valeur dépend principalement de la présence de textures dans la scène, les surfaces de couleur unie fournissant généralement une confiance de 0.

Au-delà de la texture, il a été remarqué qu'il existe un bruit de mesure fortement lié à la distance d'acquisition. Le tableau 1 traduit ce phénomène, et résulte d'une expérimentation au cours de laquelle l'utilisateur se déplace parallèlement à un mur tout en scannant ce dernier, et cela pour différentes distances d'acquisition. Pour une valeur de confiance de 0,5, on obtient différents nuages de points, décrivant un écart-type dont la valeur augmente relativement à la distance d'acquisition.

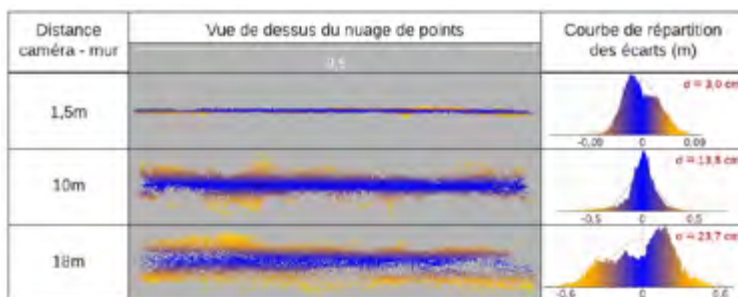


Tableau 1 : Influence de la distance d'acquisition sur la qualité du nuage

3.2.3. Mise en relation numérisation 3D smartphone / LIDAR

Cette mise en correspondance a dans un premier temps été réalisée dans un contexte en intérieur. Une pièce (de 55m² de surface) a ainsi été scannée via un smartphone puis à l'aide d'un scanner laser. Nous avons alors fait le choix de réaliser une consolidation de nuages de points via l'utilisation de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point). Afin de simplifier les calculs, les deux nuages ont été préorientés manuellement, et sous échantillonnés. Nous considérons les données issues du scanner laser comme étant les valeurs vraies, de manière à pouvoir évaluer l'exactitude de la numérisation réalisée via le téléphone. Bien qu'une correspondance ait pu être établie entre les deux scans, les résultats obtenus ont démontré que la précision du positionnement souhaitée est difficilement atteignable. Par ailleurs, une procédure similaire a par la suite été suivie dans un contexte en extérieur, sans qu'aucune correspondance ne puisse être établie.

4. Conclusion et perspective

L'objectif de ce PFE était de déterminer une méthode d'initialisation permettant à l'utilisateur de se repérer précisément dans un environnement extérieur, tout en se limitant aux technologies disponibles sur la majorité des smartphones. Il a été démontré dans cette étude qu'une initialisation basée sur une mise en relation de données 3D de la scène est possible mais ne permet pas d'atteindre les objectifs fixés. La génération de données 3D via l'utilisation de cartes de profondeur permet l'obtention de nuages de points relativement denses, dont la qualité varie fortement en fonction de la portée d'acquisition. De ce fait, une telle méthode serait à proscrire en milieu extérieur.

Cependant, les technologies de numérisation 3D par téléphone sont assez jeunes et commencent à peine à se développer. Il reste alors important de suivre l'évolution de ces dernières, qui a récemment fait un grand bon avec l'intégration d'un système LiDAR dans les récents iPhones. Il s'agit là d'une véritable avancée technologique et nul doute qu'un tel système fera partie intégrante de la norme en matière de smartphone dans un avenir proche.

Mise en place d'un prototype de cadastre 3D des réseaux gérés par les Services Industriels de Genève à l'échelle d'un quartier

PFE présenté par : **Valentin FRACHET**
Société d'accueil : **Services Industriels de Genève**
Directeur de PFE : **Gaëtan GIVORD**
Correcteur : **Mathieu Koehl**



1. Les objectifs de l'étude

Les Services Industriels de Genève (SIG) sont un établissement autonome de droit public du canton de Genève. Ils ont la charge de la distribution en eau, en gaz, en électricité, en chaleur et froid à distance (CAD/FAD) aux foyers sur l'ensemble du canton. Ils ont aussi en charge la gestion de ces différents réseaux. Le capital est reparté entre l'État de Genève (55%), la ville de Genève (30%) et les communes genevoises (15%).

Ce Projet de Fin d'Études se déroule dans l'unité Cadastre des Réseaux et Géomatique (CRG) et sa direction Smart City. L'unité CRG a pour principales missions le relevé, la mise à jour et la diffusion des données géographiques et administratives multi-fluides liées aux différents chantiers impactant le sous-sol sur le domaine public.

L'objectif de ce PFE est de créer un prototype de cadastre 3D du sous-sol en s'appuyant sur la base de données des SIG avec une visualisation en trois dimensions de leurs principaux réseaux.

La maquette devra également contenir des éléments de contexte tels qu'un modèle numérique de terrain, les bâtiments en 3D, la végétation et des données LiDAR.

L'entreprise travaille actuellement sur la plateforme ESRI et la version 10.2.8 d'ArcMAP avec une sur-couche ARCFM-UT. Cette plateforme permet aux collaborateurs de l'unité CRG de saisir et mettre à jour les informations sur le terrain. De ce fait, le rendu du prototype se fera sur le logiciel ArcGIS PRO. Cela permet de garantir une interopérabilité avec les données existantes. Qui plus est, ArcGIS PRO est un produit reconnu pour la gestion de scènes 3D.

Le but est donc d'élaborer différentes procédures de transformation des données, représentées en 2D, vers la 3D mais aussi de faire des hypothèses permettant de combler l'actuel manque d'informations sur les réseaux existants.

Il y aura également une comparaison de la modélisation effectuée durant ce stage avec d'autres jeux de données. Des données obtenues à la suite d'un relevé géoradar et modélisées dans un environnement BIM, des données lidar issues d'un projet de veille nommé RAR (Reconnaissance Automatique des Réseaux) où ces données sont acquises par photogrammétrie ainsi que des données issues de la plateforme du Système d'Information du Territoire à Genève (SITG) également au format IFC. Ces dernières serviront à mesurer la qualité des hypothèses prises.

Pour l'entreprise accueillante, l'objectif en fin de stage est de préparer une migration de la 2D vers la 3D en fournissant un aperçu des outils et hypothèses permettant de reconstruire la troisième dimension à partir des données existantes. Cette étude s'inscrit dans la continuité des évolutions menées à court-terme au sein de la chaîne de production de l'unité afin de collecter une donnée en

3D, de la modéliser et de la contrôler. Cela peut par exemple permettre de vérifier la cohérence des altitudes de chacune des pièces, dans le cadre du processus de validation, et ainsi détecter une hauteur de canne mal renseignée.

Enfin le prototype aura pour but de promouvoir la donnée gérée par l'unité CRG de manière transversale au sein de l'entreprise en communiquant largement autour des résultats du PFE.

2. Le cadre de l'étude

La base de données SIG contient environ 1.75 millions d'objets correspondant à de l'électricité et 1.23 millions d'objets pour les réseaux d'eau, de gaz et thermiques. Ainsi, la maquette a été limitée à l'échelle d'un quartier. Celui qui a été retenu porte sur ce secteur où il y a un chantier multi-fluides actif avec des fouilles ouvertes durant la période du stage.



Fig. 1 : Quartier retenu

3. Modélisation 3D des différents réseaux

Historiquement, l'entreprise était divisée en plusieurs secteurs et chacun de ces derniers gérait un réseau (Eau, Electricité ou Gaz). Comme ces réseaux ne sont pas gérés de la même manière, les informations contenues dans la représentation ne sont pas les mêmes. Ainsi, il faut modéliser ces réseaux de manière indépendante. Depuis la création des Services Industriels de Genève, l'entreprise fournit le chauffage à distance ainsi que la climatisation urbaine.

Après concertation et discussion avec mon directeur de PFE, il a été décidé de retenir le logiciel FME. Ce logiciel est un ETL (pour Extract, Transform and Load) et il a la capacité de traduire des données géographiques. Ainsi, ce logiciel offre des fonctionnalités de transformation spatiales, ou non, permettant de déplacer les données d'une base de données, ou d'un SIG, à une autre.

De plus ce logiciel est déjà utilisé dans l'entreprise ce qui facilite l'intégration des scripts effectués pendant ce PFE.

Les réseaux modélisés en 3D auront la possibilité d'être représentés soit sous forme squelettique, soit sous forme volumique.

Le choix du logiciel de visualisation s'est porté sur ArcGIS Pro. Ce logiciel permet de garantir une interopérabilité des données actuelles puisque les collaborateurs saisissent les données issues du travail effectué sur le terrain dans la version d'ArcMAP avec une sur-couche ArcFM-UT. Qui plus est, ArcGIS Pro est un logiciel reconnu pour la gestion de scènes 3D.

Un troisième logiciel est utilisé dans cette étude. Il s'agit du logiciel CloudCompare. Ce logiciel permet de créer le Modèle Numérique de Terrain en extrayant uniquement les points du sol. Ce programme a l'avantage d'être gratuit et le plug-in CSF Filter est reconnu pour extraire les zones du sol avec un nuage de points comme données de bases.

La modélisation en 3D suit des règles et hypothèses communes pour les réseaux d'eau, de gaz, de chauffage et climatisation à distance. Cela est permis grâce à leurs propriétés physiques. En effet, ces réseaux sont constitués de tuyaux. Avec cette particularité, on peut donc mettre en place des hypothèses similaires que ce soit pour mettre les différents objets en 3D d'un point de vue spatial ou volumique.

En parallèle, le réseau électrique suit d'autres règles de modélisation puisque les éléments le composant sont différents. On retrouvera des ensembles de tuyaux passant dans une zone bétonnée appelé « nappes » Ainsi, la façon de modéliser ce réseau sera différente.



Fig. 2 : Une nappe électrique en cours de pose avec deux épaisseurs de quatre tubes à gauche ainsi qu'une conduite d'eau à droite

Sur l'illustration ci-contre, on peut se rendre compte de la différence de composition du réseau et en fonction de la présence de données altimétriques, ou non, les hypothèses pour reconstruire le réseau en trois dimensions seront différentes.

4. Création d'un extracteur

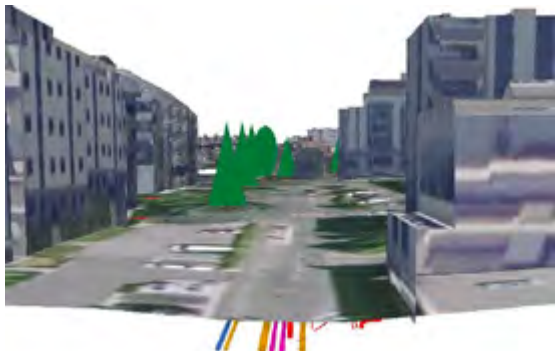
Afin de simplifier et d'améliorer la prise en main des scripts développés avec FME pour les utilisateurs, un extracteur avec une interface a été mise en place. Ainsi, pour obtenir les réseaux en trois dimensions sur une zone souhaitée, il suffit de renseigner plusieurs choses. La première est la zone à modéliser soit sous forme de coordonnées X et Y mini et maxi soit sous forme d'un rectangle au format Shapefile enveloppant le projet dessiné au préalable dans ArcGIS Pro. Il faut choisir les réseaux à extraire en remplissant la boîte de dialogue ci-dessous par « Oui » ou « Non » et intégrer un Modèle Numérique de Terrain de l'étendue à modéliser.

User Parameters	
CAD : Oui = Modélisé / Non = Rejeté / Valeur actuelle :	Oui
FAD : Oui = Modélisé / Non = Rejeté / Valeur actuelle :	Non
EAU : Oui = Modélisé / Non = Rejeté / Valeur actuelle :	Non
GAZ : Oui = Modélisé / Non = Rejeté / Valeur actuelle :	Non

Le fait de regrouper les scripts permet de gagner du temps lors de la phase de fonctionnement du script car il n'y a besoin de paramétrer qu'une seule fois la boîte de dialogue.

Fig. 3 : Paramètres permettant de choisir quels réseaux seront modélisés

5. Premiers résultats des modélisations



L'illustration ci-contre permet de visualiser les différents réseaux présents dans le périmètre du prototype. On peut relever la présence d'une conduite d'eau représentée en bleu, les tuyaux de gaz en orange, le chauffage à distance en magenta et le réseau électrique en rouge.

Le modèle 3D texturé permet de se rendre compte visuellement de la profondeur à laquelle se trouvent les conduites, suivant l'angle de vue, et rend la localisation plus évidente (sous trottoir, route, bande végétalisée, etc.).

Fig. 4 : Représentation en 3D des réseaux sous le domaine public avec un modèle 3D texturé transparent

6. Conclusion et perspectives

L'ensemble des recherches et des développements ont permis d'obtenir des résultats concluants d'un point de vue technique avec la modélisation en 3D des différents réseaux dans différents formats (GIS, BIM). De plus, la mise en place d'une maquette nous a permis de visualiser les différentes données de réseaux en sous-sol de façon très précise. Cela présente un grand intérêt pour l'unité CRG afin de fournir des prestations 3D dans la phase de conception et de préparation en amont des futurs travaux en sous-sol.

En effet, ce prototype de cadastre 3D des réseaux pourra être utile à l'entreprise lors de projets de pose de nouveaux réseaux principalement via une modélisation de l'existant. Cela permettra une visualisation en 3D du projet et des potentiels conflits entre conduites et ainsi éviter de perdre du temps lors de la phase de travaux.

Ainsi, l'entreprise a un outil d'export temporaire permettant de générer soit un squelettique 3D soit des données volumiques intégrées à une maquette. Cela permet donc de répondre à des besoins croissants en attendant d'avoir une solution mature. En effet, les Services Industriels de Genève sont dans une phase d'étude préalable sur la migration des données existantes vers un environnement 3D afin de l'industrialiser.



Fig. 5 : Représentation en 3D des réseaux sous le domaine public

Développement d'un module de compensation de réseau dans le logiciel TopTools

PFE présenté par : **Solène Ignaccolo**
Société d'accueil : **TPLM-3D**
Directeur de PFE : **David Desbuisson**
Correctrices : **Tania Landes**
Hélène Macher



1. Contexte et objectifs de l'étude

TPLM-3D est une société française spécialisée dans la mesure 3D et la métrologie au service de l'industrie, de la construction, du patrimoine et de l'architecture. Elle fut fondée en juin 2004 par deux ingénieurs géomètres de l'ENSAIS, David Desbuisson et Stéphane Hopp. Reconnue pour ses prestations de qualité, elle mène à bien des projets topographiques sur des chantiers qui peuvent être très spécifiques et qui nécessitent par conséquent une haute précision de mesure. Désireux de pouvoir maîtriser les calculs effectués afin de pouvoir s'assurer de la qualité des livrables, le logiciel TopTools est en continuel développement depuis plusieurs années. Il permet actuellement de réaliser divers calculs topométriques et l'objectif de ce projet est d'y ajouter un module de compensation de réseaux de points mesurés à l'aide d'une station totale.

Actuellement, TPLM-3D utilise le logiciel LTOP pour compenser des réseaux de points. C'est un logiciel principalement utilisé par les géomètres en Suisse. Il dispose de nombreux indicateurs de fiabilité et de précision, et autres fonctionnalités faisant sa force. Ce logiciel, gratuit depuis peu, est assez peu intuitif à utiliser. Pour le moment, seule une interface pour LTOP est présente dans le logiciel TopTools. Elle permet de faciliter le lancement des calculs et l'analyse des résultats.

Il existe de nombreux autres logiciels de compensation, qui sont plus ou moins performants. Par exemple, le logiciel Covadis, largement utilisé par les géomètres en France ne permet pas de prendre en compte la précision des mesures théoriques et aucun indicateur ne permet de détecter l'éventuelle présence de fautes dans les mesures.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif est d'implémenter un calcul de compensation par la méthode des moindres carrés afin de minimiser, après itération, les résidus sur les observations. Cette méthode, réalisée sous forme matricielle, nécessite le remplissage de trois matrices initiales dont découleront les calculs de compensation. C'est donc le calcul des coefficients des matrices A, K et P qui va être déterminant pour la suite des calculs, notamment pour la prise en compte du modèle stochastique. Une étude théorique et effective est réalisée afin d'évaluer la qualité des mesures et des points d'appui.

Il s'agit alors de mettre en place les éléments suivants :

- Calcul **libre, libre-ajusté et contraint** : ceci permettra d'analyser séparément les mesures et les points d'appui, avant d'insérer le réseau dans un système de coordonnées général.
- Calcul en **2D+1** : le calcul planimétrique sera calculé séparément du calcul altimétrique.
- Prise en compte du **modèle stochastique** du jeu de données : cela signifie que l'on souhaite pondérer les observations en fonction de leur erreur moyenne *a priori*. Il faudra alors implémenter des indicateurs pour évaluer si les erreurs moyennes *a priori* sont proches des erreurs moyennes *a posteriori* et les ajuster en conséquence.
- Indicateurs de **fiabilité** : à ne pas confondre avec la précision, ils permettront d'évaluer la structure géométrique du réseau et sa redondance.
- Option de **calcul robuste** : elle permettra de détecter d'éventuelles fautes dans les mesures ou les points d'appui.

3. Développement du calcul de compensation

Afin de maîtriser chaque étape, le développement de la méthode de calcul a été réalisé dans un premier temps sur le logiciel Excel. Pour des raisons pratiques nous avons pris, pour support de travail, un petit réseau mesuré par l'entreprise il y a quelques années. Ce réseau est composé de 10 stations avec un total de 31 visées. Il faut noter qu'il comporte des visées très inclinées et que les références ne sont visées que depuis une station (stationnée deux fois), ce qui est un cas assez peu courant. Dans cette partie, nous allons présenter les points spécifiques que nous avons décidé de développer dans le module de compensation.

3.1 Calculs libre, libre-ajusté et contraint

Le **calcul libre**, dans un premier temps, consiste à compenser le réseau de points en s'affranchissant des contraintes liées aux points d'appui. Tous les points sont alors compensés sans distinctions entre points inconnus et points d'appui comme illustré dans le croquis de la figure 1.a). Pour réaliser cela, il est nécessaire de fixer un point et une direction. Ceci permet d'analyser exclusivement les mesures réalisées, sans l'influence des erreurs de rattachement, afin de pouvoir ajuster le modèle stochastique des observations ainsi que de détecter l'éventuelle présence de fautes dans les observations.

Le **calcul libre-ajusté**, quant à lui, permet de prendre en compte la précision des points d'appui en considérant que leurs coordonnées sont des pseudo-observations, susceptibles d'être corrigées. Ils sont également compensés ce qui signifie que tous les points du réseau subissent un déplacement (fig. 1.b)). Ce mode de calcul permet de vérifier que les points d'appui ne sont pas entachés de fautes.

Le **calcul contraint**, correspond à ce que propose un moteur de compensation « classique ». Les points d'appui sont fixes et les points inconnus subissent un déplacement tout en respectant ces contraintes (fig.1.c)).

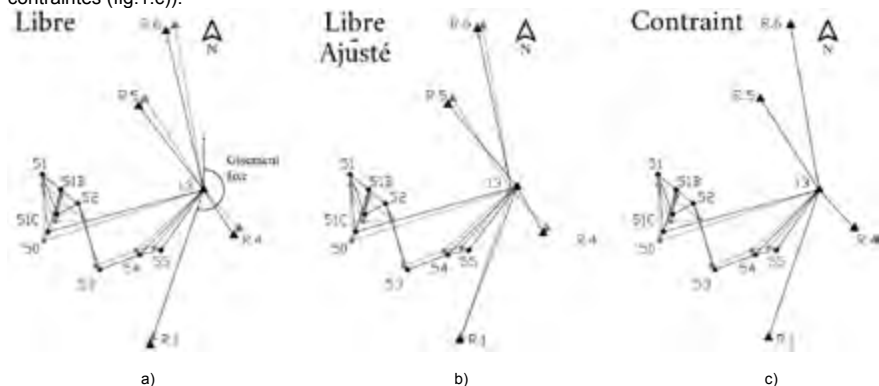


Fig. 1 : Croquis sans échelle du réseau avant et après compensation dans les différents modes de calcul. Les déplacements que subissent les points suite à la compensation sont représentés en rouge.

3.2 Calcul 2D+1

Nous avons fait le choix de réaliser la compensation en séparant le calcul planimétrique du calcul altimétrique. De cette manière, il sera possible d'analyser séparément les mesures planimétriques (angles horizontaux et distances) et les mesures altimétriques (angles verticaux).

La compensation planimétrique nécessite des distances horizontales. Il faut alors **réduire les distances inclinées à l'horizontale** grâce aux angles verticaux. C'est à cette étape que nous pouvons choisir de prendre en compte ou non les corrections liées à la réfraction atmosphérique, la sphéricité de la terre, et de, dans ce dernier cas, choisir de prendre en compte une sphère ou l'ellipsoïde de référence. L'entreprise étant amenée à traiter des chantiers assez peu étendus, il n'est pas nécessaire de prendre en compte l'ellipsoïde de référence. En revanche, nous avons choisi de tenir compte de la réfraction atmosphérique et la sphéricité de la Terre, car elles risquent d'avoir une influence sur des visées d'une longueur supérieure à un kilomètre.

La particularité de la compensation planimétrique, par rapport à la compensation altimétrique, est que nous travaillons avec deux types de données bien distincts : les angles et les distances. Pour cela,

nous procédons à une opération permettant de considérer temporairement les écarts en distance comme des écarts angulaires à une certaine distance.

À la suite de la compensation planimétrique, nous disposons des distances horizontales compensées, que nous utilisons pour la compensation altimétrique. La compensation altimétrique consiste à compenser des dénivelées entre le point stationné et le point visé. Nous traitons alors des dénivelées issues d'un calcul trigonométrique.

3.3 Modèle stochastique

Le calcul de compensation avec prise en compte d'un modèle stochastique signifie que les calculs vont se baser sur des notions probabilistes. Le plus courant, dans la méthode de calcul des moindres carrés par les intermédiaires est de considérer que les résidus sont répartis selon une distribution normale. Ces résidus existent par la présence inévitable d'erreurs accidentelles lors de la prise des mesures. Afin d'être plus fidèle à la réalité, il est possible de prendre en compte la précision des instruments de mesure et des points d'appui. Grâce à ces informations données, entre autres, par les constructeurs des instruments de mesure, nous pouvons calculer une erreur moyenne *a priori* pour chaque observation. Cette information servira, dans un premier temps, à pondérer les observations en fonction de leur erreur moyenne quadratique théorique. Dans un second temps, il sera possible de comparer les erreurs moyennes *a priori* et *a posteriori*. Nous avons donc évalué les erreurs moyennes *a priori* en prenant en compte différents éléments, notamment :

- les **précisions de mesure** de l'appareil données par le constructeur de l'appareil utilisé ;
- les **erreurs de centrage** de l'appareil et du prisme en planimétrie, estimés ;
- les **erreurs sur la mesure de hauteur se station et de réflecteur** en altimétrie ;

En altimétrie, comme expliqué plus haut, nous prenons en compte la réfraction atmosphérique et la sphéricité de la Terre. De plus, nous compensons des dénivelées, et non directement les angles verticaux. Nous sommes alors passés par un calcul de la transmission d'erreurs moyennes à partir de la fonction de calcul des dénivelées utilisant les distances et les angles verticaux.

3.4 Fiabilité

Cette notion va permettre de discerner si un grand résidu ou une mauvaise précision est inquiétante ou non. Nous avons emprunté ces notions au cours de P. Cattin (2012).

Fiabilité interne

Relative aux observations, elle se traduit par le calcul de trois principaux indicateurs. Les **erreurs résiduelles normées** (w_i), calculées à partir des résidus, permettent de les normaliser afin de pouvoir plus facilement les comparer entre eux. La **redondance partielle** d'une observation est un pourcentage permettant d'évaluer si l'observation est assez redondante ou même si elle l'est « trop ». En effet un réseau « trop » redondant signifie qu'il aurait été possible de faire moins de mesures et donc de perdre moins de temps sur le terrain.

Enfin, la **plus petite faute détectable** (V), repose sur la précision théorique de l'observation et sa redondance partielle. Elle va permettre d'évaluer l'ordre de grandeur des fautes qu'il sera possible de détecter en fonction de la configuration du réseau.

Fiabilité externe

Relative aux inconnues, elle se traduit par l'affichage d'un rectangle de fiabilité pour chaque point (fig. 2). Ce rectangle enveloppe tous les vecteurs qu'une plus petite faute détectable générerait individuellement sur la position d'un point en planimétrie. Plus le rectangle est grand, moins les coordonnées de ce point sont fiables. Cet indicateur est calculé uniquement à partir de données théoriques.

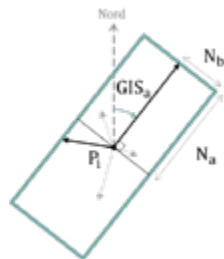


Fig. 2 : Schéma d'un rectangle de fiabilité.

3.5 Calcul robuste

Le calcul robuste, encore en cours d'élaboration, vise à détecter les observations aberrantes, c'est-à-dire d'éventuelles fautes de mesure. Nous avons choisi de mettre en place le M-estimateur de Huber, car sa méthode de calcul est très similaire à celle des moindres carrés. Afin de pouvoir comparer les résidus des différents types d'observations nous analysons les erreurs résiduelles normées. Cet estimateur va bloquer l'influence des observations pour lesquelles l'erreur résiduelle normée est supérieure à la valeur 2,5. Cela correspond à la valeur en dessous de laquelle environ 99% des $|w_i|$ devraient se situer. Si une erreur résiduelle normée dépasse 2,5, alors on peut suspecter la présence d'une faute.

Le calcul se fait de manière itérative. Dans un premier temps, il faut lancer un calcul « classique », c'est-à-dire avec la pondération suivant le modèle stochastique. Ensuite, nous identifions les observations dont le $|w_i|$ est suspect. Il est alors possible d'appliquer un ajustement directement sur l'observation et réitérer le calcul de compensation.

4. Résultats

Les résultats obtenus par notre module intégré à TopTools sont comparés aux résultats de deux autres logiciels, reconnus pour leur qualité, qui seront considérés comme valeurs de référence. Tout d'abord, nous avons choisi LTOP, car c'est le logiciel actuellement utilisé et que notre module fonctionne de manière similaire à celui-ci. Puis, nous souhaitons comparer nos résultats au logiciel Comp3D, car il présente des caractéristiques similaires telles que la prise en compte du modèle stochastique et la possibilité de calcul libre, libre-ajusté et contraint.

Le module est, à ce stade, encore en cours de développement. Nous n'avons donc pas encore de résultats finaux à présenter. Le lecteur pourra se référer au mémoire de PFE afin de prendre connaissance de l'évaluation des résultats.

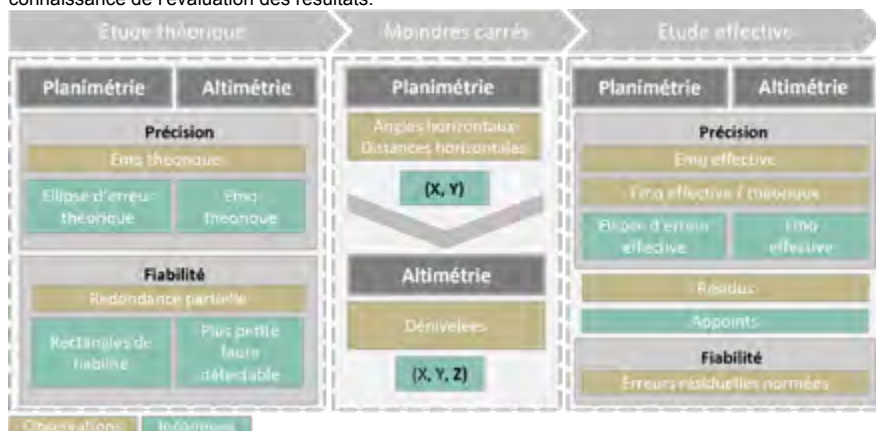


Fig. 3 : Organigramme des éléments calculés par le module de compensation.

5. Conclusion

Au cours de ce PFE, nous avons développé un module, dans le logiciel TopTools, qui permet de compenser un réseau de points topographiques par les moindres carrés. Nous avons pu intégrer plusieurs spécificités afin de pouvoir analyser le jeu de données et les résultats de manière approfondie.

Un schéma, figure 3, permet d'identifier ce qui a pu être mis en place dans ce module. Il présente alors ce qui est calculé avant et après la compensation par les moindres carrés. Ainsi, il est possible de savoir si les indicateurs font référence à la structure du réseau ou bien aux mesures effectivement réalisées.

Nous allons également intégrer une interface graphique dans laquelle seront représentés le réseau, les rectangles de fiabilité et les ellipses d'erreur moyenne, géoréférencés dans un fichier *.dxf. En outre le calcul des ratios d'erreur moyenne quadratique effectifs sur théoriques, pour l'analyse du modèle stochastique, est également en cours d'élaboration afin de pouvoir calculer un ratio par type d'observation.

Enfin, la mise en place du calcul robuste n'est pas aboutie et nécessitera plus de temps pour que cette option soit utilisable. Il serait également intéressant de développer un module de pré-analyse permettant d'évaluer la qualité du réseau configuré, c'est-à-dire avant de prendre les mesures.

Référence bibliographique : Cattin, P. (2012). *Méthodes d'estimation, Version 3.2*. Cours à la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Département Environnement Construit et Géoinformation, Orientation Géomatique.

Approche mixte de levé d'intérieur pour le compte de la CTS (site gare)

PFE présenté par : **Mathis Bouquier**
Société d'accueil : **CTS**
Directeur de PFE : **Olivier Barrot**
Correcteur : **Emmanuel Alby**
Encadrant : **Mathieu Koehl**



L'objet de ce projet de fin d'étude est le relevé et la modélisation des infrastructures souterraines de la gare de Strasbourg. Il est réalisé pour et en collaboration avec la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS).

Sous la gare de Strasbourg, se trouve une station de tramway du réseau CTS. Autour des couloirs qui mènent à cette station de tramway, il existe un complexe de bureaux et de locaux techniques en tout genre. Ces locaux, propriété de la CTS, sont actuellement laissés en friche à la suite d'infiltrations d'eau. La CTS a pour objectif de les réhabiliter. C'est pourquoi, l'entreprise souhaite disposer d'un modèle 3D du complexe ainsi que de l'ensemble des infrastructures souterraines de la gare de Strasbourg. Ce modèle devra permettre de visualiser le gros œuvre du bâtiment ainsi que des principales gaines techniques du site. Il devra ainsi permettre de retrouver un plan des réseaux techniques qui traversent le site, préalable indispensable au projet de réhabilitation.

La zone d'étude s'étend du premier sous-sol, où l'on trouve quelques commerces, jusqu'au quatrième sous-sol, étage niveau où est située la station de tramway. Celle-ci comporte donc des parties ouvertes au public ainsi que des parties privées telles que les commerces ou les infrastructures techniques sous la responsabilité de la CTS. Il s'agit donc d'un espace de grande envergure, qui comporte des caractéristiques techniques complexes et de diverses natures du fait de la diversité des infrastructures qui la composent. C'est pourquoi il a été décidé de mener cette opération d'acquisition et de modélisation sur deux années à travers deux projets de recherches technologiques (PRT) et deux projets de fin d'étude.

1. Objectifs de l'étude

Ce projet s'articule autour de 3 principaux objectifs : l'acquisition des données, la définition d'une démarche permettant la modélisation du site et la mise en œuvre et l'évaluation de celle-ci.

La définition d'une démarche de modélisation en est l'objectif prioritaire, dans le sens où, à l'issue de ce projet, une démarche permettant la modélisation du site et de toutes ses caractéristiques devra être présentée. Pour répondre à cet objectif, il était attendu de définir, en échangeant avec la CTS, les informations qui devaient être contenues dans le modèle. Cette discussion a permis de définir les attendus en termes d'informations à faire figurer sur le modèle, qui sont listés en **Figure 1**, et de fixer une maquette numérique BIM comme modèle 3D à obtenir.

Le but de la recherche était alors d'évaluer les solutions existantes permettant d'aboutir au modèle souhaité à partir de nuages de points et de s'intéresser à des solutions permettant d'automatiser une partie de la modélisation. Des recherches bibliographiques, portant sur l'automatisation du processus scan-to-BIM ont alors été menées. Celles-ci se sont concentrées sur les procédures permettant de récupérer des informations contenues dans un nuage de points et en particulier sur la classification des points en fonction de leur appartenance à des éléments de structure du bâtiment. Cependant, le bâtiment à modéliser présente des pièces irrégulières, et est ainsi très différent des bâtiments sur la base desquels les procédures automatiques ont été établies. En effet celui-ci présente des pièces

dont les murs ne suivent pas deux directions orthogonales ou des pièces avec différentes hauteurs de plafonds. Ainsi une adaptation des méthodes abordées est nécessaire.

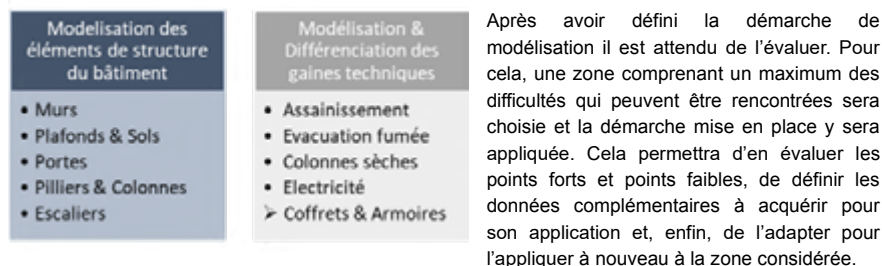


Figure 1 : Informations à faire figurer sur la maquette numérique BIM

2. Campagne de levé

En réponse au premier objectif de ce PFE, une campagne de levé a été menée afin de compléter le jeu de données à notre disposition. Elle a consisté, à la fois, à compléter le réseau de polygonation qui avait été mis en place au cours du PRT qui précédait, et à acquérir des nuages de points en grand volume. Entre 7 et 10 jours d'acquisition ont été nécessaires afin de numériser entre 60 et 70% de la zone d'étude, principalement les parties fermées au public et situées aux premier et deuxième sous-sols du site.

Les numérisations ont été obtenues à l'aide du scanner statique à différence de phase FARO Focus X330 et du scanner à main ZebRevo GeoSLAM. Le géoréférencement de ces dernières a été réalisé selon la démarche qui avait été établie au cours du PRT. C'est-à-dire en procédant d'abord à la consolidation et au géoréférencement basés sur des cibles pour les scans obtenus avec le FARO Focus X330 puis en effectuant une consolidation de nuage à nuage pour les scans issus du ZebRevo GeoSLAM.

Les nuages de points géoréférencés, ont alors été rassemblés afin de former le nuage de points projet de la zone d'étude qui sert de base à la modélisation.

3. Recherche d'outils permettant l'automatisation de la modélisation

Pour répondre aux objectifs définis en début de projet, des solutions permettant d'automatiser une partie de la modélisation ont été explorées. Des recherches bibliographiques combinées à des tests ont permis d'établir une procédure en 4 étapes principales, permettant de générer des entités qui puissent figurer dans une maquette numérique BIM. Celle-ci est détaillée sur la **Figure 2**.

La première partie de cette chaîne de traitement est menée manuellement. Elle a pour objectif le nettoyage du nuage de points et la mise en place d'une nomenclature qui permet aux fichiers d'être nommés de manière unique. Le nuage projet est alors divisé en étages, puis en zones et enfin en pièces afin que chaque pièce soit traitée séparément par le script Matlab. Les nuages de points des pièces sont alors nommés selon la nomenclature qui a été définie. Des informations sur le nombre de plafonds, sols, murs et discontinuités au sol ou au plafond présents dans cette pièce sont également indiqués dans le nom du fichier afin de guider le processus automatique.

La deuxième étape du processus mis en place vise à récupérer des informations sur les éléments de structure du bâtiment directement dans le nuage de points. Des recherches bibliographiques ont fait état de l'utilisation d'algorithmes RANSAC pour extraire des segments plans, c'est-à-dire des portions

du nuage qui représentent un plan, dans les nuages de points. CloudCompare intègre une fonction utilisant RANSAC, qui permet de classer les plans en fonction de ce qu'ils représentent.

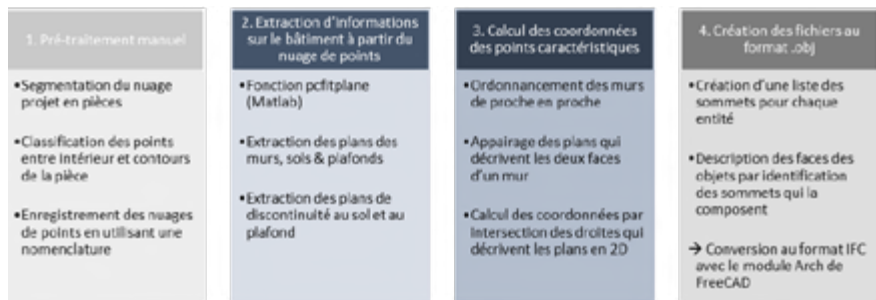


Figure 2 : Procédure de modélisation utilisant des outils d'automatisation

Des ambiguïtés sur les résultats proposés par l'algorithme RANSAC ont été identifiées, ce qui nous a amené à considérer l'estimateur robuste MLESAC qui permet de retenir la solution qui maximise la vraisemblance. Les segments plans extraits sont alors classifiés en fonction de leur verticalité et leur horizontalité. Ainsi des segments plans horizontaux décrivent un sol ou un plafond et ceux qui sont verticaux décrivent un mur. Des fonctions utilisant cet estimateur sont intégrées à Matlab. Cela permet donc d'extraire les segments plans correspondant aux murs, sols et plafonds à partir du nuage segmenté de chaque pièce en tenant compte des informations, sur le nombre de plans à chercher, contenues dans le nom du fichier.

A l'issue de cette étape, des segments plans correspondant aux murs, sols et plafonds sont alors obtenus et classifiés selon leur horizontalité ou verticalité. Un critère portant sur l'altitude moyenne du plan horizontal permet de distinguer les nuages des sols de ceux des plafonds. Les nuages des murs



Cet ordonnancement des murs permet de calculer les coordonnées des points d'intersection entre les murs en 2D. Une recherche de l'altitude du sol et du plafond au niveau de ce point permet d'obtenir les coordonnées des angles de la pièce.

Figure 3 : Schéma présentant la méthode d'ordonnancement des murs de proche en proche.

Cette méthode permet de décrire les plans correspondant à chaque mur de la pièce. Cependant, un mur est décrit par 2 plans. C'est pourquoi il a fallu rechercher, pour chaque plan, le pan de mur opposé afin de décrire l'objet mur par un solide. Pour répondre à cet objectif, un critère de parallélisme et un seuil de distance sont utilisés afin d'obtenir les pans de murs opposés pour chacun des murs. Lorsqu'il y en a plusieurs, ceux-ci sont ordonnés en comparant la position de leurs extrémités. A l'issue de ce processus, les coordonnées des points caractéristiques des entités à modéliser sont alors connues. Il s'agissait alors de créer des entités dans un format qui puisse être intégré dans une maquette BIM. Des recherches ont permis de mettre en lumière la nécessité d'utiliser le format d'échange libre et gratuit qu'est le format IFC (Industry Foundation Classes) pour exporter des entités dans une maquette numérique BIM.

Matlab, logiciel utilisé pour réaliser l'ensemble des développements, ne permet pas l'export au format IFC. Une étude des méthodes permettant de générer des entités dans un tel format a alors été menée. Le logiciel libre FreeCAD peut être utilisé pour transformer des entités du format .obj au format IFC à partir de son module Arch. Des fonctions de Matlab permettent de générer des entités au format .obj en identifiant des sommets appartenant à chaque entité et en décrivant chaque face de l'objet. Les coordonnées calculées précédemment sont alors réutilisées pour décrire chaque objet. L'étape de conversion des entités du format .obj au format IFC est réalisée manuellement.

4. Création manuelle d'une maquette numérique BIM

Les procédures définies dans la partie précédente ont été mises en place et appliquées progressivement. Afin d'évaluer les résultats obtenus, une maquette numérique de référence est nécessaire. Une maquette numérique BIM a alors été réalisée manuellement avec le triple objectif :

- établir une référence qui permet de comparer la position des entités dans les différentes maquettes,
- établir une référence en termes de structure du bâtiment
- évaluer la durée d'une modélisation manuelle afin d'estimer le gain de temps permis par les procédures automatiques.

La modélisation est alors réalisée sur le logiciel Revit sur la base du nuage de points du projet, restreint à la zone qui a servi de support aux processus automatiques testés.

5. Conclusions et perspectives

La mise en œuvre des démarches qui ont été détaillées dans le présent résumé ont mis en lumière des erreurs ou des omissions liées à l'application d'une procédure automatique. En l'état, le traitement ne permet pas de générer des entités qui représentent fidèlement les contraintes de structure du bâtiment alors qu'il s'agit d'un requis d'une maquette numérique BIM. La complexité du site implique également qu'une partie des configurations ne soient pas prises en compte par le programme.

La procédure décrite dans ce résumé peut donc être améliorée. D'une part, en appliquant une méthode de mise à jour d'une partie du modèle lorsqu'une nouvelle acquisition est réalisée. D'autre part, en mettant en place une deuxième procédure qui permet de joindre des entités afin de tenir des contraintes sur la structure du bâtiment dans le but d'obtenir une maquette BIM cohérente comme celle qui a été réalisée à la main.

La recherche menée porte principalement sur la modélisation des éléments de structure du bâtiment. La modélisation et la différenciation des gaines techniques étant un autre requis, il devra s'agir d'un axe important des recherches qui seront réalisées pour la suite de ce projet.

Construction automatique d'un jumeau Numérique 3D sémantique du territoire à partir de nuage de points (LiDAR ou Photogrammétrie 3D)



PFE présenté par : **Méline Michaud**
Société d'accueil : **IGO**
Directeur de PFE : **Philippe BOUR**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**
Encadrant : **David DARBOUSSET**



1. Contexte et objectifs de l'étude

En plein développement depuis quelques années, le jumeau numérique est un sujet d'actualité. Il a réussi à faire sa place dans la conception, l'ingénierie et la maintenance dans de nombreux domaines allant de l'aéronautique aux travaux publics. C'est sur un jumeau numérique territorial que porte mon projet de fin d'études.

Celui-ci permet de simuler, à travers un écran, le fonctionnement d'une ville. Il peut donc mesurer des phénomènes (niveaux de pollution, trafic routier, etc.), faciliter l'aménagement urbain (rénovation d'un quartier, conséquences de la fermeture d'une route, etc.), ou encore simuler des événements (incendies, inondations, urgences médicales, etc.). Il permet donc de mieux anticiper les événements d'une ville et ainsi de s'adapter en conséquence.

En 2020, l'IGN a initié un programme national de couverture LiDAR Haute Densité (HD) sur tout le territoire français, afin de disposer de données 3D homogènes et accessibles à tous. Celui-ci devrait couvrir l'intégralité du territoire national d'ici 2025. Aujourd'hui, plus de 20% du territoire a été acquis et des données brutes sont d'ores et déjà disponibles. Ainsi, ce projet de fin d'études est étroitement lié à celui du LiDAR HD de l'IGN. Il s'appuie sur la valorisation 3D des données issues de ce programme. L'objectif est donc de générer automatiquement un jumeau numérique 3D sémantique du territoire, en se concentrant plus particulièrement sur le bâtiment, la végétation et le Modèle Numérique de Terrain (MNT) sémantique.

Les tests nécessaires à l'étude sont réalisés à partir d'images aériennes et de nuages de points LiDAR acquis par l'IGN, d'une densité moyenne de 10 points par mètre carré, préalablement segmentés et classifiés. De plus, l'entreprise possède un échantillon de Landcover (carte d'occupation des sols) sur une zone de 10 km², située à Montpellier (34), obtenus à l'aide d'orthophotographies. 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 nuages de points.

2. Mise en place du processus de production automatisé

La maquette numérique du territoire est composée de trois couches : le MNT, les bâtiments et la végétation. Ainsi, ce projet s'est construit suivant ces trois axes, auxquels nous avons ajouté une partie supplémentaire : la triangulation 3D.

La triangulation 3D

L'objectif de la triangulation 3D est d'obtenir un premier visuel du nuage de points, une maquette 3D texturée et exploitable, contrairement à un nuage de points brut.

La première étape est le découpage des nuages de points en plusieurs tuiles pour traiter efficacement les projets. Elle est suivie de la préparation des nuages avec, notamment, le calcul de normales aux points, qui rendra possible le maillage.

Le maillage est l'étape qui consiste à relier les différents points du nuage entre eux afin de former la surface de l'objet. Plusieurs algorithmes existent pour arriver au résultat escompté. Mais pour un rendu visuel lisse, homogène et sans trou, c'est l'algorithme Poisson qui a été choisi pour venir à bout de cette mission. Cette méthode permet de poser une surface close au plus près des points, tout en interprétant les endroits où la donnée est manquante. C'est donc une surface étanche à l'eau qui est créée. La création du modèle se termine avec l'apport d'une texture au maillage, réalisé à partir d'images aériennes, comme l'illustre la figure 1.



Fig. 1 : Résultat de la triangulation 3D au niveau de la Place de l'Europe à Montpellier

Le choix final du logiciel qui sera utilisé pour ce projet national, se base sur l'aspect visuel, la justesse du maillage, mais aussi sur le temps de calcul et la taille de la maquette finale. La taille est étroitement liée avec la précision, que l'on détermine notamment avec les écarts de distances entre le nuage et le maillage, ou encore avec le nombre de triangles le constituant.

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Un MNT est une représentation 2,5D de la surface d'un terrain. Il décrit uniquement la surface au sol et ne prend donc pas en compte les objets qui se trouvent en "sur-sol". Ce modèle sera sous forme de réseaux de triangles irréguliers (TIN) qui permet de générer une surface à partir de points irréguliers. Similaire à l'étape de la triangulation 3D, les points sont reliés les uns les autres en formant des triangles. C'est, cette fois, la triangulation de Delaunay qui est utilisée. Cette méthode a pour but de relier les points les plus proches en s'appuyant sur le diagramme de Voronoï.

Pour ce projet, l'objectif est de mettre en place un MNT sémantique afin de pouvoir apporter une information supplémentaire à la maquette, comme on peut le voir sur la figure 2. Cette notion de sémantique est apportée grâce au Landcover qui est utilisé pour découper la surface maillée en fonction de la nature du sol (route, herbe, trottoir, etc.), et permet, lorsqu'on clique sur un élément, de connaître la catégorie à laquelle elle appartient.

Une fois le maillage créé, un lissage s'impose puisque la triangulation de Delaunay n'élimine pas le bruit. De ce fait, une réduction du nombre de triangles est réalisée dans le but d'éliminer les pics afin d'obtenir un maillage plus esthétique. Pour finir, il est également possible de texturer ce MNT grâce à une orthophotographie.

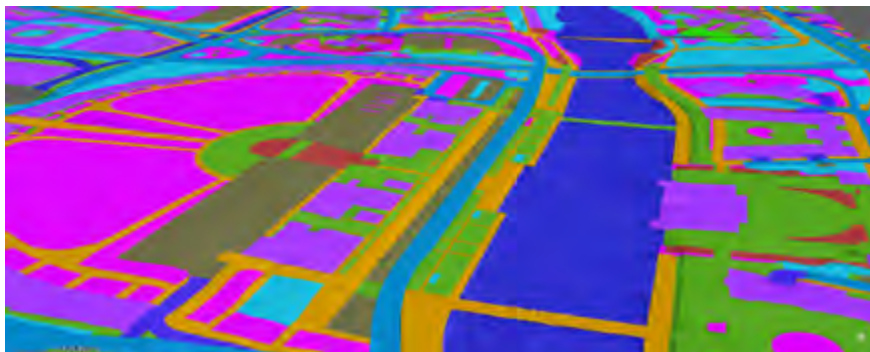


Fig. 2 : Vue du MNT sémantique de la Place de l'Europe à Montpellier

La modélisation de bâtiments

L'échelle territoriale de ce projet implique un nombre important de données. Le format CityGML est donc utilisé puisqu'il permet l'interopérabilité entre les différents logiciels et acteurs modélisant et exploitant une maquette numérique à l'échelle urbaine. Il est actuellement considéré comme le format de référence.

Le CityGML présente deux caractéristiques principales : la modélisation thématique au travers d'une large gamme de composants urbains (bâtiments, réseaux de transports, relief, occupation du sol, ...) et la gestion multi-échelle qui permet de modéliser à différents niveaux de détails (LoD). Il existe 5 LoD, allant d'une représentation 2D de l'emprise au sol, à la modélisation complète et détaillée de l'architecture intérieure 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.

La première étape dans la modélisation de bâtiments est la détection des structures de toits. Pour cela, nous avons dû détecter les différents plans qui apparaissent dans le nuage segmenté, dans le but d'obtenir un plan par pente de toit (figure 3). Ces plans sont détectés à l'aide de l'algorithme RANSAC.

Chaque plan est numéroté de 1 à n sous l'attribut *local_idx* et transmet à tous les points du nuage le constituant, son attribut. Ainsi, nous pouvons trianguler le nuage de points en fonction du *local_idx*. Cette triangulation est par la suite découpée par la couche bâtiment du Landcover afin de nettoyer le maillage de son bruit. Afin d'obtenir une seule surface, et donc un seul polygone par pan de toit, tous les triangles dont le *local_idx* est identique, sont joints entre eux. Finalement, les contours seront simplifiés pour obtenir des bordures de toitures lisses.



Fig. 3 : Détection des plans de chaque toiture

Cette méthode, en créant ces toitures triangulées directement dans le nuage de points plutôt que de détecter les différentes lignes de toits pour ensuite créer une surface, permet la modélisation de bâtiments à la géométrie simple, mais aussi les géométries les plus complexes, puisqu'elle utilise chacun des points du nuage, et se base donc sur la vérité terrain.

L'étape suivante est la modélisation finale des bâtiments. Le but est de reconstruire les façades, à partir des surfaces de toits précédemment modélisées, en réalisant une extrusion verticale jusqu'au MNT, comme on peut le voir sur la figure 4. Pour terminer, les modèles peuvent être texturés par de simples couleurs ou par une orthophotographie, avant leur export au format CityGML.



Fig. 4 : Résultat de bâtiments modélisés automatiquement

La végétation

Dans l'objectif d'obtenir une maquette complète et représentant au mieux les paysages variés du territoire, le dernier point de ce Projet de Fin d'Etudes porte sur la modélisation de la végétation. C'est la mise en place de symbole à l'échelle au sein de la maquette qui a été envisagé.

Un outil déjà présent dans l'entreprise permet de détecter le point haut de chaque arbre dans un nuage de points classifié, autrement dit son sommet. Pour pouvoir insérer les symboles à l'échelle dans des logiciels de visualisation, tels que Terra Explorer, le logiciel utilisé par l'entreprise, il est nécessaire que chaque arbre ait sa hauteur en attribut. Pour pouvoir la déterminer automatiquement, nous avons dû extraire la coordonnée Z de chaque sommet d'arbre, pour ensuite projeter ces points sur la surface au sol, c'est-à-dire sur le MNT. À partir de là, nous extrayons une nouvelle fois la coordonnée Z du point qui correspond au point sol de l'arbre. Après une soustraction, la hauteur de chaque arbre est définie et intégrée en attribut. La figure 5 montre le résultat de la maquette finale avec la végétation sous forme de symbole.



Fig. 5 : Résultat de la végétation insérée à la maquette

3. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de mettre en place un premier jumeau numérique 3D sémantique automatisée au sein de la société IGO, à partir d'un nuage de points uniquement. Les nombreux tests effectués ont permis d'obtenir des résultats très encourageants.

Afin d'améliorer cette maquette, une méthode de contrôle pourrait être développée avec la détection des principales erreurs de modélisation. Une reconstruction 3D des lignes de toits grâce à un développement interne qui reprendrait les méthodes que l'on peut retrouver dans les articles scientifiques, pourrait également être une perspective d'amélioration intéressante. La triangulation de la végétation permettrait, aussi, d'obtenir un résultat plus fidèle à la réalité.

Auscultation par mesure de nuages de points

PFE présenté par : **Louis Schaepeilynck**
Société d'accueil : **Sixense Monitoring**
Directeur de PFE : **Rémi Fejoz**
Correcteur : **Gilbert Ferhat**



1. Contexte et objectifs

Sixense Monitoring est une entreprise qui propose à ses clients des solutions d'instrumentation et de monitoring pour les chantiers et les ouvrages. Dans un contexte d'urbanisation et de densification du territoire, l'auscultation ponctuelle ou en continu est adoptée par de nombreux constructeurs, maîtres d'ouvrages et exploitants. Ce suivi permet la prise de décision adéquate pour assurer un bon fonctionnement de l'infrastructure et la sécurité de ses utilisateurs tout au long de son cycle de vie. La redondance des mesures demandées par les clients, allant d'une fois par semaine à plusieurs fois par jour, et la nécessité de mesurer à moindres frais motivent les équipes à développer des solutions d'acquisition et de traitement de données innovantes.

La surveillance topographique se fait majoritairement par mesures sur cibles. Cela permet de déterminer l'évolution de la position d'un objet par rapport à un référentiel défini. Cependant, le recours à l'installation de prismes sur les infrastructures implique de nombreuses difficultés : impossibilité d'installation, longs délais pour les autorisations, nécessité d'avoir un personnel formé et compétent, etc. Elles engendrent des investissements humains, en temps et financiers importants. L'entreprise a alors développé une méthode de mesure sans cible à partir de visées laser, mais de nombreuses informations sont perdues et la redondance des mesures n'est pas aussi fiable qu'avec les prismes.

Sixense Monitoring est détentrice d'un parc de stations totales conséquent parmi lesquelles certaines proposent des options de mesures type scanner. Les dernières avancées technologiques sur ces stations et la démocratisation des scanners poussent l'entreprise à maximiser l'exploitation de son matériel tout en investissant dans un procédé de mesure innovant.

En conséquence, à partir de récents développements sur les logiciels internes de calcul et d'acquisition, l'objectif de ce projet de fin d'études est de réaliser un retour d'expérience sur les mesures réalisées avec les nuages de points issus des fonctionnalités scanner des stations totales.

2. Le principe de l'algorithme

Les tachéomètres Trimble S7 et S9 proposent des fonctionnalités de numérisation. C'est-à-dire qu'on peut acquérir avec ces appareils des nuages de points de densité faible à raison de quelques points par secondes. L'objectif est de modéliser des plans de petites surfaces à partir de ces nuages pour pouvoir ensuite les comparer. On détermine un plan de référence, qui est issu de la concaténation de plusieurs nuages définis, et un plan ausculté, qui est issu d'un autre nuage acquis lors d'un cycle de mesures. A partir de cette comparaison de plans, on extrait des données topographiques : des vecteurs, des angles et des distances, qui sont ensuite utiles à l'interprétation des mouvements de l'objet ausculté.

Sixense Mapping, en concertation avec Sixense Monitoring, a développé un algorithme permettant la comparaison des nuages de points par la création de plans. L'objectif des expériences réalisées sur le banc de test est de déterminer les limites et d'établir les possibilités qu'offre cet algorithme.

3. Les expérimentations sur le banc de test

Le banc de test est constitué d'un tachéomètre Trimble S7 posé sur pilier, avec 5 cibles de référence placées autour de façon uniforme, et une maquette placée à une vingtaine de mètres de la station supportant un plan en contreplaqué de 60cm² inclinable et translatable. Cette maquette est fabriquée en acier inoxydable et en aluminium, ce qui lui permet de résister aux intempéries et d'avoir une rigidité suffisante pour d'éventuels tests avec des plaques en matériaux plus lourds.



Fig. 1 : Maquette du banc de test



Fig. 2 : Tachéomètre sur pilier

3.1 Utilisation des logiciels internes

Dans un premier temps, nous avons remarqué après une première campagne de tests que les fonctionnalités de la solution web pour le pilotage du tachéomètre ne permet pas la création de nuages réguliers et rectangulaires. Les nuages acquis peuvent prendre des formes polygonales à 4 ou 5 côtés en fonction des tests. On remarque aussi que les temps d'acquisition et les nombres de points estimés sont très différents des temps d'acquisition et des nombres de points réels. En conséquence, pour une vitesse nominale affichée par le constructeur de 15 points par seconde, nous en avons en réalité, dans le cadre de nuages d'une taille maximale de 60cm², moins de 2 points par seconde. Ensuite, l'expérience a montré que les nuages d'une taille inférieure à 200 points ne permettent pas l'utilisation de l'algorithme. Ce qui limite le nombre de nuages acquis par heure. A titre comparatif, un cycle d'auscultation classique par prisme ou par visée directe permet l'acquisition d'une soixantaine de mesures par heure. Dans notre cas, si l'on tient compte d'une dizaine de minutes pour le cycle dédié aux cibles de référence, cela permettrait d'acquérir au mieux 15 nuages par heure. Enfin, les données fournies par l'algorithme, à savoir les angles et les distances, sont strictement positives. L'interprétation des résultats doit être faite en conséquence.

3.2 Les mesures réalisées sur le banc de test

Comme suite à la détermination des limites des logiciels internes de calcul et d'acquisition, on peut désormais les utiliser afin de réaliser des mesures. Une campagne d'acquisition comporte deux parties. Une partie pendant laquelle on enseigne à la station les cibles et les directions qu'elle doit viser (on appelle cette partie '*le learn*') et une partie durant laquelle la station totale effectue automatiquement ses mesures. Ensuite, un script python suit la procédure suivante :

- Importation des fichiers de coordonnées et du Vo de la station issus d'un algorithme de compensation par les moindres carrés.

- Calcul des coordonnées XYZ de chaque nuage.
- Calcul des différences de distances et d'angles entre le plan de référence et le plan ausculté.
- Export des données sous un format exploitable par un logiciel de visualisation.

L'acquisition et le traitement des données sont automatiques et fonctionnent en permanence. Cela permet d'avoir des données en fonction des cycles du jour et de la nuit, mais aussi en fonction de la météo. La visualisation se fait sur l'outil Geoscope, un logiciel interne de visualisation et d'analyse de données.

Pour déterminer si la méthode est fiable ou non, nous avons fait un test de répétabilité sur le plan de la maquette. L'analyse s'est principalement concentrée sur la distance entre les plans. Les angles fournis présentent une importance moindre dans l'analyse d'un mouvement d'un plan par rapport à un autre. L'expérience montre que les mesures issues des visées sur les prismes sont bien corrélées avec les distances obtenues par l'algorithme. De plus, les sauts de mesures liés à un déplacement du plan ausculté sont visibles, mais de nombreux bruitages persistent. Pour réduire ces écarts et pouvoir estimer au mieux les mouvements, on a calculé la norme entre les coordonnées de la station et les points de référence des plans puis on les a comparés. Ces points de référence sont fournis par l'algorithme avec une précision millimétrique. Cela devait permettre de déterminer le signe de la distance entre les deux plans, et donc la direction du mouvement. Cette méthode manque de précision puisque pour des mouvements inférieurs ou proches du millimètre, les points de référence sont bien souvent confondus. Ces écarts sont aussi dus à la dilatation de l'aluminium et de l'acier sur le banc de test, au léger mouvement d'oscillation du plan sur la maquette (lié au vent notamment) et aux gradients de température.

Pour maximiser les expérimentations, nous avons utilisé l'environnement voisin au banc de test. Cela a permis d'analyser différents aspects, notamment les textures, les distances et la taille des nuages. Ces tests nous permettent de faire des hypothèses intéressantes concernant les nuages de points :

- Les incidences faibles n'ont pas d'influence sur les distances et les angles fournis par l'algorithme.
- Le nombre de points et le nombre d'inliers (points caractéristiques permettant la création d'un plan) sont corrélés, et que plus le nombre d'inliers est grand, meilleure est la précision des mesures.
- La rugosité des surfaces augmente le bruit des mesures.

4. Les mesures réalisées sur le chantier

Les essais réalisés sur banc de test ont laissé supposer la possibilité d'utiliser ce type de mesure sur chantier. En conséquence, il a été décidé de tester en conditions réelles ce type de mesure et de le comparer à des mesures classiques sur prismes et à des mesures directes.

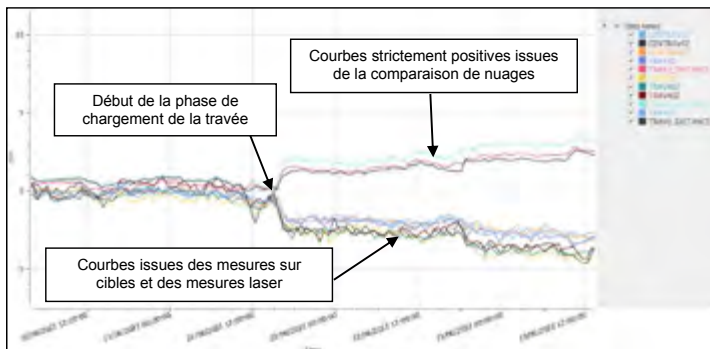


Fig. 3 : Déplacement altimétrique de la travée d'un pont en fonction du temps.

Le pont ausculté est divisé en 7 voussours en dessous desquels on a installé un prisme, réalisé une visée directe et acquis un nuage de points. Les nuages comportent entre 300 et 500 points. Chaque cycle de mesure dure une quarantaine de minutes.

La figure 3 montre l'évolution de la position des cibles, des visées laser et des nuages, par rapport à une date de référence, en fonction du temps. Le saut que l'on peut observer est dû à l'essai de charge qui a été réalisé sur le pont. Les valeurs strictement positives correspondent aux données « TRAVI_DISTANCE » (avec $i=\{2,4,6\}$), qui sont les données issues de l'algorithme. Les données « TRAViZ » correspondent aux cibles et « CENTRAViZ » aux visées directes. On remarque une corrélation parfaite entre les positions obtenues par mesures sur cibles et celles obtenues par mesures directes, tandis que des écarts non-négligeables sont à noter concernant les nuages. Ces écarts oscillent entre 0.5mm à 1.5mm selon les mesures, et des écarts entre 30 et 50% lors de la phase de chargement. Bien que l'on puisse observer les mouvements de la travée, il n'est pas possible de conclure sur les valeurs exactes des déformations à partir des données des nuages.



Fig. 4 : Installation du tachéomètre à proximité de la travée du pont

5. Conclusion et perspectives

Les mesures sans prismes offrent des opportunités intéressantes dans le domaine de l'auscultation. Elles permettent de s'affranchir de l'installation de cibles qui peut s'avérer chronophage et onéreuse. La méthode de visée directe existe déjà et est appliquée à de nombreux travaux d'auscultation. Cependant, cette dernière est sensible aux mouvements de la station totale et de l'objet ausculté. L'auscultation par comparaison de nuages de points se veut moins sensible à ces mouvements et permet d'extraire des données de comparaison de plans a priori plus fiables. Les résultats obtenus à ce jour ne permettent pas de remplacer les cibles sur le terrain parce que les écarts entre les données issues de l'algorithme et les données issus des cibles sont trop importants. Les nombreux tests réalisés tentent d'éclaircir des zones d'ombres concernant les conditions d'utilisation d'une telle méthode. Il est encore difficile d'en tirer des généralités.

En revanche, la méthode de comparaison de plans créés par nuages de points présente cependant de nombreuses perspectives.

Les nuages ont été acquis avec des tachéomètres qui n'ont pas vocation à être utilisés en tant que scanner. Le temps d'acquisition et la densité de points sont faibles. Ces paramètres jouent un rôle dans la viabilité économique du système : plus les nuages sont acquis rapidement, plus le processus est intéressant. Les nouvelles multistations proposées par Leica ou Trimble offrent une alternative à étudier dans un futur proche.

Au-delà du système d'acquisition des données, l'algorithme de traitement des nuages présente quelques faiblesses. Celui-ci ne permet pas le traitement de nuages d'une taille inférieure à 200 points et ne converge pas pour des nuages de plus de 500 points. La plage des possibilités est réduite et joue un rôle sur la précision des mesures. De plus, l'algorithme fournit les coordonnées des barycentres des nuages au millimètre. Cette donnée est inexploitable lorsqu'on cherche à obtenir une précision au dixième de millimètre. Enfin, les temps de calculs sont longs et lourds. L'algorithme peut encore être optimisé pour pouvoir calculer tous types de taille de nuages avec des temps réduits tout en fournissant des données complètement exploitables.

Pour finir, le script python créé pour lier les nuages, les coordonnées compensées de la station et l'algorithme de calcul, n'est pas optimisé. Plusieurs solutions sont en développement pour automatiser ce traitement sans utiliser ce script et des phases de tests sont prévues.

En conséquence, il est aujourd'hui possible de conclure que la mesure par comparaison de nuages de points est possible sous certaines conditions et peut être intégré à des travaux d'auscultation dans un futur proche. Encore loin de remplacer les cibles dans les travaux d'auscultation, les nuages de points peuvent apporter une alternative à certaines installations. L'amélioration du traitement des nuages ainsi que la création d'un outil fiable de data management peuvent en être la clé.

Je vous renvoie à mon mémoire de fin d'études pour plus de précisions.

ACQUISITIONS, TRAITEMENTS ET INTEGRATION DE DONNEES

CARTOGRAPHIQUES HETEROGENES DE L'OBJET AU

TERRITOIRE : CAS D'ETUDE DE LA PETITE CAMARGUE ET DE

LA TOUR CARBONNIERE (30)



PFE présenté par : **Tom Serviere**
Société d'accueil : **Global Geomatic France**
Directeur de PFE : **Remi Girardon**
Correcteur : **Gilbert Ferhat**



1. Contexte et Objectifs du Projet de Fin d'Etudes

Ce Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans la réflexion technique et conceptuelle que mène Global Geomatic France (GGF) sur l'articulation entre maquette territoriale et jumeaux numériques. La zone d'étude se concentre sur la commune de Saint-Laurent-d'Aigouze (territoire) et sur la Tour Carbonnière (objet) dans le Gard. L'objectif est d'analyser et de mettre en lumière les difficultés techniques liées à l'intégration de données cartographies hétérogènes et multi-sources. Le choix de la plateforme, la pertinence de l'échelle de restitution et des objectifs attendus (opérationnel, valorisation du territoire...) sont les éléments que reprendra le mémoire pour aboutir à une réponse concrète.

Cependant la problématique d'exploitation des données massives dans un contexte de course à la précision est de plus en plus prégnante et ne doit pas impacter les livrables fournis aux clients. Dans le cadre du projet, une solution alternative au format 3D Tiles (norme OGC, « *Open Geospatial Consortium* ») sera étudiée. Le mémoire reprendra et approfondira les différents aspects que proposent ces formats. Le projet s'étendra de l'acquisition des données aux rendus clients en passant par le traitement de celles-ci.

La Tour Carbonnière (fig. 1), construite sur la fin du XIII^{ème} siècle, en même temps que les remparts d'Aigues-Mortes, présente un intérêt sur le plan architectural et historique. Elle est située sur le territoire de Petite Camargue, entourée de marais et canaux dont le canal du Rhône à Sète. Il y a encore cent quarante ans, la route départementale passait au milieu de cette tour solitaire. Impossible à éviter c'était le seul moyen, par voie terrestre, de se rendre dans la cité médiévale de Louis IX.



Fig. 1 : Tour Carbonnière (Source : GGF)

2. Acquisitions et traitements des données

A la date d'écriture du résumé, toutes les données ont été acquises à l'exception des données de l'escalier en colimaçon de la Tour Carbonnière.

Une campagne d'acquisition laser statique au Faro Focus 3d pourra également être programmée pour comparer les résultats.

• Cheminement polygonal

Un cheminement polygonal, d'une longueur de 156.00 m a été réalisé, à l'aide d'un Topcon OS101, avec visées en points rayonnés sur les cibles. Les références servant au géoréférencement ont été levées par méthode GNSS NRTK (« *Global Navigation Satellite System* » ; « *Network Real Time Kinematic* ») Leica GS15 avec un GDOP inférieur à 5 et un CQ3D inférieur à 1.0 cm.

En utilisant les tolérances cadastrales de 1988, un canevas polygonal ordinaire, un système de référence planimétrique RGF93 – CC44, altimétrique IGN69 et en effectuant un cheminement fermé, les résultats sont les suivants (tab. 1) :

Type de fermeture	Ferm.	Tol.
Planimétrique (m)	0.011	0.100
Angulaire (gon)	0.011	0.020
Altimétrique (m)	-0.002	0.073

Tab. 1 : Récapitulatif des fermetures et tolérances obtenues à l'aide de Covadis

Les résultats sont satisfaisants au regard de la précision du GNSS. Des fermetures planimétriques et altimétriques plus faibles peuvent être obtenues par méthode GNSS statique en enregistrant les données brutes de 30 minutes à 1 heure sur chaque référence. Le post-traitement de ces données aboutira à un CQ3D plus précis qu'en NRTK. Cependant, au vu des enjeux du projet et des utilisations futures de ces données, cela n'est pas intéressant.

• Lasergrammétrie / Photogrammétrie aéroportées

Une campagne d'acquisition aérienne a été réalisée. L'ULM est équipé d'un scanner laser aéroporté Riegl VQ-480i, d'une centrale inertielle Atlans-c et d'une chambre photogrammétrique incluant une Phase One IQ180. La méthode par levé LiDAR (« *Light Detection And Ranging* ») aérien s'exécute par référencement direct. Ces données permettent d'établir une orthophotographie pour répondre à la problématique de l'objet au territoire. Le traitement s'effectuera sous Pix4D et Correlator3D.

• Lasergrammétrie statique

54 acquisitions par scanner laser statique (Riegl VZ-400i) ont été réalisées pour couvrir l'extérieur, le point de vue, la partie traversante de la tour ainsi que la salle fermée au premier étage ; salle pour laquelle une demande d'autorisation d'occupation temporaire au centre des monuments historiques a été effectuée.

Pour ces acquisitions, le pas de balayage choisi est de 0.030° soit 10 mm à 20 m. Après post-traitement, l'écart-type de la consolidation sur l'ensemble des acquisitions est de 5 mm. Le géoréférencement en RGF93 – CC44 (EPSG : 3944) admet un écart-type de l'ordre de 1.1 cm. Les boîtes (fig. 2a) dévoilent 50% du nombre total de points se trouvant dans la plage indiquée (entre 25% et 75%) avec la médiane représentée en orange. Les barres d'erreurs sur la fig. 2b contiennent 95% des points (de 2.5% à 97.5%).

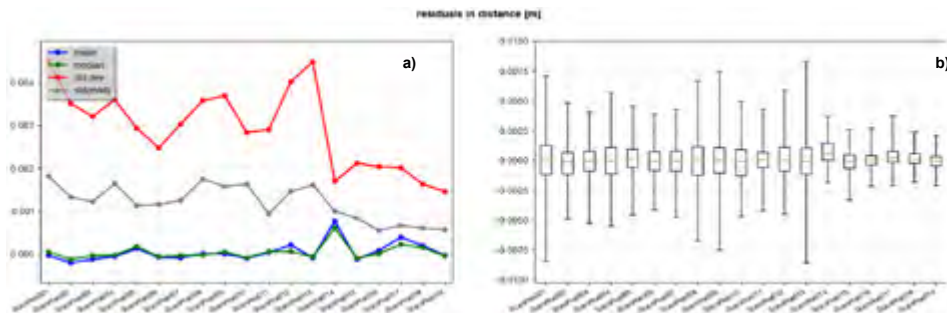


Fig. 2 : Graphiques des résidus en distance (m) obtenus après géoréférencement (en utilisant le logiciel RISCAN PRO)

- **Photogrammétrie (terrestre et drone)**

Pour traiter l'ensemble des prises de vues, le logiciel Metashape est privilégié. Trois sous-projets sont créés :

- avec l'ensemble des photographies **(1)**
- uniquement avec les images terrestres **(2)**
- uniquement avec les prises de vues par drone **(3)**

L'orientation relative des photos se fait automatiquement grâce aux bons recouvrements entre les clichés. Pour la partie géoréférencement, il suffit de pointer les cibles calculées en RGF93 – CC44 à l'aide de Covadis sur chaque image. Une erreur moyenne quadratique sur les points d'appuis de l'ordre de 0.9 cm et 0.8 pixel est obtenue. Pour les points de contrôle, l'EMQ est de 4.5 cm et 0.3 pixel. Les précédentes remarques concernant le résultat du cheminement polygonal viennent confirmer et valider ces résultats.

Sans rentrer dans les détails, les résultats pour une orthophotographie d'une même façade divergent :

- **(1)**, le logiciel annonce une taille de pixel au sol de 2 mm/px. Cette valeur retournée par Metashape omet en partie la différence de capteurs (terrestre et aérien). En effet, taille du pixel est différente et propre à chaque capteur (fig. 3).

- **(2)**, 3 mm/px concernant la photogrammétrie par drone (DJI Phantom 4 RTK). L'analyse de l'orthophotographie est concluante et permet de distinguer de multiples détails. Toutes les parties de la façade sont visibles et réalistes.

- **(3)**, 0.7 mm/px pour le Nikon D750. Cette orthophotographie possède le meilleur GSD (« Ground Sampling Distance », taille de pixel au sol). Un bémol, les clichés ont été pris du sol et ne permettent pas d'obtenir l'intégralité de la façade correctement. Une perche réglable en hauteur peut venir pallier cette difficulté.



Fig. 3 : Floutage de l'orthophotographie dû à la mauvaise gestion algorithmique des différents capteurs (Source : GGF)

Un levé topographique sera réalisé. Il servira à étudier la précision obtenue entre les différentes méthodes d'acquisitions. Les nuages de points et les maillages seront comparés avec ces points pour obtenir un écart sur l'ensemble du modèle. Un tableau comparatif viendra clôturer cette étude.

3. Gestion des données massives

Le format 3D Tiles (norme OGC utilisée par Cesium par exemple), fournit un contenu restituable avec une structure de données hiérarchiques et un ensemble de formats de tuiles. Ce format utilise les notions de parent/enfant dans le but d'augmenter le niveau de résolution.

Dans le cadre du PFE, nous allons analyser les performances de deux solutions alternatives à ce format. L'une fournit par la société Arskan, société labellisée Deeptech et qui fait partie du groupe auquel appartient GGF ; l'autre provenant du partenaire IGO, la solution TerraExplorer. La plateforme Arskan et le logiciel TerraExplorer développent, d'autres solutions afin d'obtenir une fluidité accrue dans la visualisation des données. Arskan, avec son format .p3dw, travaille sur un seul modèle maillé qui contient toute l'information tout en permettant un affichage haute résolution en compressant/décompressant l'objet.

Arskan fait actuellement évoluer sa solution afin de fluidifier la lecture des modèles maillés quelle que soit leur taille.

Nous avons travaillé sur l'algorithme d'Arskan en cours de développement. Cette solution permet de gérer en ligne de façon optimale des maillages (fig. 4) très haute résolution obtenus à partir d'un rééchantillonnage des points de 1 mm. Notre réflexion porte sur la possibilité de fournir un modèle maillé proche de l'échelle 1.



Fig. 4 : Visualisation des triangles du maillage (Source: Arskan)

Des premières versions des maillages de l'extérieur de la Tour Carbonnière et de la salle sont visibles gratuitement sur la plateforme d'Arskan. Les QR Codes (tab. 2) et les liens renvoient aux premiers essais des maillages sur ce monument. Par la suite une orthophotographie sera insérée en réponse à la problématique de visualisation de l'objet au territoire. Le mémoire reprendra plus en détail l'ensemble de ces informations pour en tirer des conclusions.

Explication	Salle (1) Technologie actuellement en vente sur la plateforme Arskan	Salle (2) Technologie en R&D	Tour extérieure (3) Technologie actuellement en vente sur la plateforme Arskan	Tour extérieure (4) Technologie en R&D
QR Code				

Tab. 2 : QR code des premières versions des maillages de la Tour Carbonnière visualisable en ligne (Arskan)

Liens :

- (1) <https://viewer.arskan.com/objects/share/62b9a96d4d81d46f60badc88>
- (2) <https://movi3d.dev.arskan.com/movi3d/2039b39e-25dd-4a5d-bab8-470fa57adb1>
- (3) <https://viewer.arskan.com/objects/share/62b95e554d81d46f60bad062>
- (4) <https://movi3d.dev.arskan.com/movi3d/a10124d0-6c73-4656-b87a-ec45eb07fe2c>

4. Conclusion et perspectives

L'analyse de notre problématique jumeau numérique sera élaborée à partir des plateformes Arskan, Cesium et du logiciel TerraExplorer. Les données massives à traiter sont de l'ordre de 25 Go pour un simple nuage de points colorisés de la Tour Carbonnière. A cela, il faut ajouter l'ensemble des campagnes d'acquisitions effectuées.

Ces trois plateformes offrent des fonctionnalités différentes en matière d'agrégation, d'exploitation, d'utilisation et de visualisation des données. A partir des données géospatiales acquises sur le territoire de Saint-Laurent-d'Aigouze, nous espérons pouvoir identifier les avantages et inconvénients de chaque solution au regard de notre réflexion sur la construction de jumeaux numériques.

Nous disposons de l'ensemble des données de terrain nécessaires à notre étude. Les maquettes pourront être enrichies par les résultats des différentes campagnes de relevés archéologiques et architecturaux associés sur la zone d'étude.

Mise en œuvre du modèle 3D de référence à partir de données photogrammétriques pour le site du monastère de Saint-Hilarion, bande de Gaza



PFE présenté par : **Toma DELLAROVERE**
Structure d'accueil : **Première Urgence Internationale**
ICube UMR 7357 – Équipe TRIO
Directeur de PFE : **René ELTER**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Emmanuel ALBY**



1. Mise en contexte du projet

Le monastère de Saint-Hilarion est un site archéologique majeur situé dans la municipalité de Nuseirat dans la bande Gaza en Territoire palestinien occupé. Ce site, qui fait environ 1,5 Ha, a été découvert lors d'un projet immobilier au début des années 2000. Depuis cette découverte, une collaboration franco-palestinienne s'est développée et perdure aujourd'hui pour ce site, mais également pour d'autres dans la région. Du fait de la situation géographique et de son instabilité, la conservation du patrimoine en ruine est un enjeu majeur pour l'archéologue en charge du site, René Elter. De plus, il est également impossible d'envoyer sur place une équipe de topographes et photogrammètres français confirmés ainsi que leur matériel. L'ensemble de ces contraintes rend la gestion du projet plus complexe et crée de nouveaux défis qu'il convient de relever. Les divers objectifs associés sont :

- Organiser le grand jeu de donnée à notre disposition. En effet, ce projet photogrammétrique se base sur près de 80 000 images qu'il convient d'organiser et de stocker.
- Optimiser et automatiser la chaîne de traitement. Du fait de l'étendue du site et du nombre d'images, il convient d'automatiser au maximum les traitements manuels redondants.
- Développer une stratégie de création du modèle 3D de référence du site
- Assurer la pérennité du projet qui sera orientée vers le SIG en préparant les différents produits à une réutilisation.



Figure 1 : Situation géographique du site archéologique

Le site du monastère se décompose en deux grands pôles, l'un ecclésiastique au sud autour des églises, et l'autre au nord autour des bains et de l'hôtellerie. Le pôle ecclésiastique est divisé en quatre secteurs et comprend des églises, une crypte, un atrium, des baptistères, etc. L'ensemble du bain et de l'hôtellerie forme un seul secteur où l'on retrouve au nord de celui-ci la partie hôtellerie et au sud la

partie des bains. Pour ce projet, nous avons cinq secteurs à traiter où chacun possède ses particularités. Par exemple, la partie bain est plus complexe, car les fouilles ne sont pas rebouchées et de nombreux détails sont à modéliser, alors que l'atrium lui est principalement plat, car les fouilles ont été réalisées par le passé.

2. La photogrammétrie au service de la conservation du patrimoine

Voyons à présent dans quelle mesure la photogrammétrie peut être utile pour la conservation du patrimoine.

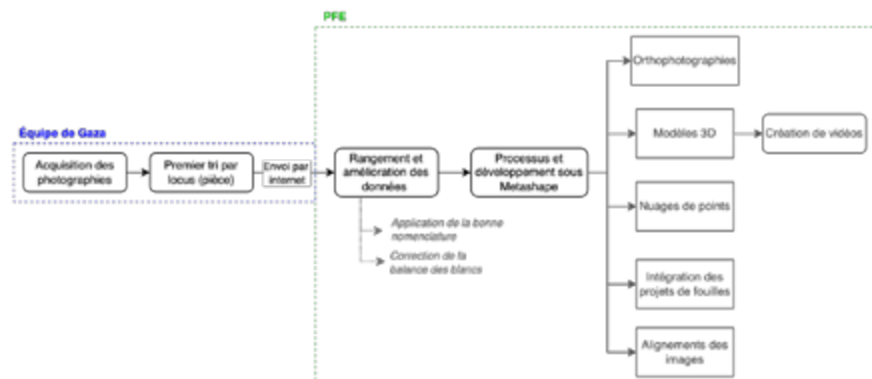


Figure 2 : Chaîne de traitement simplifiée du projet

a. Acquisition de la donnée

Du fait de la situation régionale complexe où se trouve le site, il fut impossible pour ce projet d'envoyer sur place une équipe de topographes et photogrammètres confirmés. Il a fallu alors trouver une alternative qui reposait sur la formation à distance de locaux travaillant sur le site. Pendant près d'un an, une équipe a été formée par nos soins aux techniques d'acquisition photogrammétriques, ainsi qu'aux divers processus de calcul. Une fois cette formation passée avec succès, les acquisitions du site ont pu commencer au drone et à la caméra terrestre pièce par pièce, secteur par secteur.

L'ensemble des images a été pris à l'aide d'un drone de la marque DJI ou d'une caméra terrestre de la marque Canon. Le format d'image utilisé pour ce projet est le JPG, qui permet de limiter la taille des fichiers grâce à la compression sans pour autant perdre trop d'information et réduire la résolution finale de l'image. Comme on peut le voir sur la figure 2, une fois les images triées par acquisition et par pièce, elles sont envoyées par paquet via Internet. Le choix du format JPG est donc d'autant plus pertinent afin de rendre ces transferts plus rapides.

b. Chaîne de traitement principal

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait le choix d'utiliser le logiciel Metashape qui est un logiciel de nouvelle génération, qui se base sur des algorithmes de vision par ordinateur. Ces nouveaux types de logiciels permettent de traiter à la fois des images terrestres et aériennes, et ce même si les paramètres d'orientation interne et externe ne sont pas connus ou connus partiellement. Metashape possède également les avantages d'être ergonomique, intuitif et surtout, il possède une API Python permettant de développer des scripts adaptés à notre projet et à notre objectif d'automatisation de la chaîne de traitement.

L'ensemble de la chaîne de traitement, et par conséquent la création de produits tels que des modèles 3D, nuages de points denses, orthophotographies, etc., se base sur l'utilisation des cartes de profondeur (depth maps). Cette méthode permet de réutiliser les mêmes cartes calculées durant tout le processus de traitement et permet également d'obtenir des résultats robustes, car les algorithmes cherchent à utiliser au moins cinq cartes de profondeur pour créer un point. Néanmoins, on notera que cette chaîne de traitement comporte beaucoup de tâches manuelles, comme la correction de la balance des blancs, le nettoyage des modèles 3D, des nuages denses ou encore des orthophotos. Pour pallier cette répétition de tâches, de nombreux scripts python ont été développés grâce à l'API proposé par le logiciel.

c. Gestion et amélioration des données

L'une des principales contraintes et problématique de ce projet est le nombre d'images à notre disposition. En effet, nous avons pour la campagne 2021-2022 près de 86 000 images, soit près de 6 images par m², ce qui représente beaucoup d'information. De plus, l'ensemble de ces données n'ont pas été prises dans les mêmes conditions et avec le même savoir-faire, car l'équipe sur place peaufinait leurs méthodes au fur et à mesure.

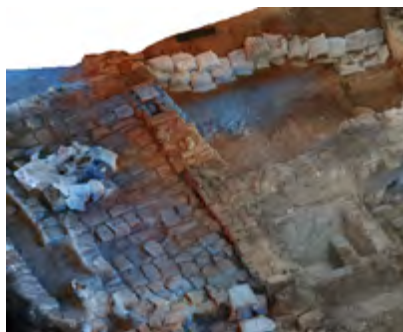


Figure 3 : Modèle 3D texturé avant l'application de la balance des blancs.

Nous avons cherché dans un premier temps à mettre en place une gestion efficace de la donnée en passant par la création d'une nouvelle nomenclature et arborescence des dossiers et fichiers. L'ensemble des images sont regroupées par date de vue, par pièce et par secteur. Une fois la gestion mise en place, nous avons cherché à améliorer la donnée brute à notre disposition. Cette amélioration est passée par la correction de la balance des blancs de chaque image à l'aide de l'algorithme Retinex, mais aussi par la réduction du recouvrement à l'aide d'un pré-modèle 3D et d'un algorithme proposé par Metashape.

3. Création d'un modèle 3D de référence pour le site

Une fois que les données ont été acquises et améliorées, il convient de s'intéresser à la création d'un modèle 3D de référence pour le site. Avant d'aller plus loin, il est important de rappeler l'utilité d'un tel modèle. En effet, bien que l'acquisition d'images permette de documenter le site, il est important de créer un modèle 3D afin de visualiser l'état des ruines à un instant t , de permettre de créer des vues et des coupes ainsi que des orthophotos vraies, mais aussi de pouvoir géoréférencer dans l'espace l'ensemble des 86 000 images du projet. Le modèle 3D est donc l'élément central, reliant toutes les données et produits.

a. Création du modèle

La création du modèle 3D passe tout d'abord par l'alignement des images et le géoréférencement du projet. Parmi l'ensemble des ordinateurs du laboratoire, aucun ne permet de calculer efficacement des projets à plus de 80 000 images. Nous avons alors dû trouver diverses stratégies permettant d'arriver à nos fins. Si on calcule le projet sur uniquement un ordinateur, une première stratégie est de calculer chaque secteur indépendamment des autres puis d'éventuellement de les fusionner par la suite. Une variante de cette stratégie est de calculer le projet par tuiles, c'est-à-dire qu'on s'affranchit des secteurs et de leur signification dans le calcul. Si on souhaite calculer des projets avec plus d'images et plus efficacement, il convient de s'intéresser au calcul en réseau, qui permet de distribuer les calculs en sous-tâches aux nœuds qui le composent. Cette dernière stratégie est celle que nous utilisons dans

ce projet, car plus adaptée à un lourd projet. Par exemple, l'alignement de 26 000 images drone prend 20 heures à l'aide d'un réseau constitué de 11 nœuds contre 3 jours et 12 heures pour une seule machine performante.



Figure 4 : Modèle 3D texturé d'une des pièces du secteur ecclésiastique.

Une fois le modèle produit, diverses étapes adjacentes sont nécessaires pour réduire le nombre de faces du modèle, ainsi que pour le nettoyer. Les faces d'un modèle produit sous Metashape sont généralement surabondantes par rapport à nos besoins. Bien que Metashape propose un algorithme de réduction, nous ne savons pas comment celui-ci fonctionne. Nous avons alors décidé d'utiliser l'algorithme *Quadratic Edge Collapse Decimation* de MeshLab, qui est un algorithme itératif cherchant à supprimer à chaque itération des sommets en fonction de leur poids et de l'impact sur l'erreur quadratique. Le nettoyage quant à lui se fait à l'aide de sélections manuelles ou semi-automatiques.

Enfin, dès que le modèle est amélioré, le calcul des textures vient terminer le processus de création du modèle 3D de référence. Il est alors possible de créer des vidéos de rendus de modèle ou de l'exporter avec ses textures dans différents formats dont le plus connu OBJ.

b. Le modèle 3D comme base d'autre produit

Comme introduit précédemment, le modèle 3D ne sert pas uniquement à avoir une vue de l'état des ruines dans le temps, il permet également de produire différents supports qui seront très utiles pour les recherches archéologiques associées au site. En effet, le modèle 3D nous permet de créer des orthophotos vraies, c'est-à-dire des images rectifiées géométriquement et géoréférencées, du site, mais aussi des fouilles archéologiques qu'il est possible d'intégrer après le calcul général à l'aide d'une méthode développée par nos soins. De plus, l'extraction de certaines parties du modèle texturé nous permet de créer des coupes, qui sont très intéressantes pour la documentation archéologique, car habituellement réalisées sous forme de dessin.

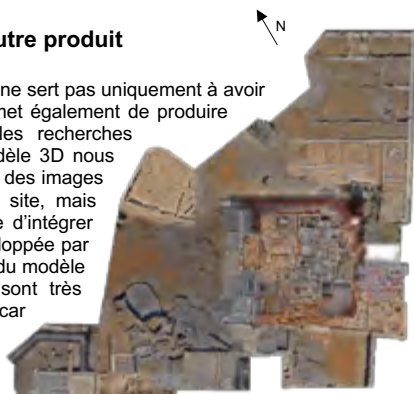


Figure 5 : Extrait de la partie hôtellerie de l'orthophoto générale du site.

4. Conclusions et perspectives

La gestion d'un projet à 86 000 images et la création d'un modèle 3D associé nous ont permis de développer une chaîne de traitement quasi-automatique et adaptée à un projet d'envergure. De plus, à travers les différents essais et manipulations, nous avons pu connaître les limites d'un tel projet comme la gestion et le stockage de la donnée ou encore le besoin en ressources pour les calculs ou l'affichage des résultats. À l'issue de ce PFE, le modèle 3D créé ainsi que les diverses coupes, vidéos ou orthophotos répondront aux besoins et aux attentes de l'archéologue en charge du site, René Elter. De plus, l'ensemble des méthodes et outils développés dans le cadre de ce projet photogrammétrique pourront être réutilisés par la suite sur d'autres sites archéologiques de la région.

Enfin, la suite de ce PFE aura une vocation SIG, c'est donc pour cela que l'ensemble des produits sont géoréférencés afin de pouvoir les réutiliser. De plus, une esquisse de base de données sera créée contenant l'ensemble des informations sur les images du projet.

Géolocalisation d'une caméra panoramique par appariement de références.



PFE présenté par : **Chahine-Nicolas ZEDE**
Société d'accueil : **INSIT**
Directeur de PFE : **Adrien Gressin**
Correcteur : **Emmanuel Alby**
Encadrant : **Adrien Gressin**



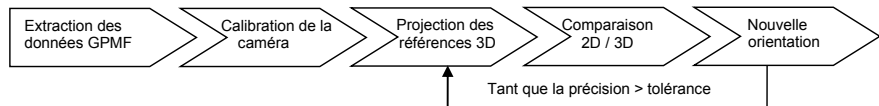
1. Contexte et objectif de l'étude

Ce projet a été proposé par le laboratoire INSIT (Institut d'ingénierie du territoire) de l'HEIG-VD, à Yverdon-les-Bains, en Suisse.

Ce laboratoire travaille actuellement sur plusieurs projets de mise à jour d'informations géographiques par photogrammétrie. Par exemple, le projet RAR (Reconnaissance Automatique des objets des Réseaux souterrains) [1] a permis d'utiliser une série d'images observant une fouille pour obtenir une classification automatique des réseaux souterrains. L'idée à l'origine de ce projet est d'utiliser une caméra panoramique afin d'utiliser les détails visibles pour améliorer la localisation, là où des phénomènes de « canyon urbain » rendraient le positionnement par GNSS pas assez précis.

Le sujet de ce Projet de Fin d'Études (PFE) est donc la géolocalisation d'une caméra panoramique par appariement de références. La caméra retenue au cours des projets précédents du laboratoire est la GoPro Max. C'est une solution low-cost qui permet d'obtenir des paires d'images fisheyes (avant/arrière) en haute définition. Les références géographiques que nous utilisons peuvent avoir plusieurs formes (LiDAR, BIM, MNT, Ortho photo etc.), l'objectif principal étant de convertir la présence d'obstacles en informations utiles pour affiner la position de la caméra.

Afin d'atteindre cet objectif, nous proposons une méthode composée des 5 étapes ci-dessous :



Au début de ce projet, un algorithme d'extraction des métadonnées de la GoPro découpe le format vidéo en images fisheyes en projection stéréographique, a déjà été réalisé. Il permet d'extraire les coordonnées GNSS de chaque image. Une étape préliminaire a été d'adapter ce programme pour obtenir les valeurs des autres capteurs (magnétomètre, accéléromètre, gyroscope etc.). On peut ainsi connaître une orientation et une position approchée de chaque prise de vue de l'appareil. Sur la Figure 1, le vecteur noir est le sens du vecteur gravité donnée par l'accéléromètre et le vecteur rouge correspond aux mesures du magnétomètre, soit un azimut sud. A partir de ces deux vecteurs, on peut construire un vecteur z en vert par inversion du vecteur gravité et par produit vectoriel entre le vecteur rouge (Y) et le vecteur noir (Z), on obtient le vecteur bleu (X) qui complète notre base orthogonale normée.

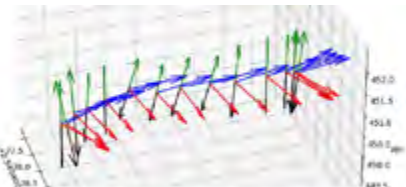


Fig. 1 : Orientation de la caméra

2. Calibration de la caméra

Afin de pouvoir passer d'une géométrie 2D à la 3D, il nous faut connaître les paramètres intrinsèques de la caméra (focale, paramètre de distorsion). Afin de contrôler la calibration, des cibles Agisoft ont été disposées dans une pièce puis levées avec une station totale. Les cibles sont détectées automatiquement et permettent de déterminer les paramètres intrinsèques, comme le montre la Figure 2. Il faut veiller à adapter la calibration au modèle fisheye d'Agisoft et de contraindre les 2 caméras géométriquement.



Fig. 2 : Détection automatique des cibles

La matrice de montage front/back a été calculée au cours de cette opération.

3. Projection des références

Nous venons d'estimer la focale, le point principal et les distorsions. On peut désormais vérifier les valeurs en projetant les points 3D des cibles, dans l'image fisheye. Le principe du calcul étant d'utiliser les équations de colinéarité et d'y appliquer les corrections de distorsion liées au fisheye. On observe sur la Figure 3 que les coordonnées pixels trouvées correspondent bien à la position attendue visible dans l'image.



Fig. 3 : Position estimée

Dans notre contrôle de calibration, les références sont levées avec une station totale mais pour la suite de notre étude, nous allons nous baser sur les données LiDAR de SwissTopo. Les avantages sont qu'elles sont accessibles gratuitement sous forme de tuile de 1km², classifiées en 6 classes avec une densité moyenne de 15 à 20 points par m². La précision des points est de 20 cm en planimétrie et de 10 cm en altimétrie. Une limite est que l'on ne traite que les éléments à proximité et que l'on perd la possibilité de travailler avec le relief des montagnes.

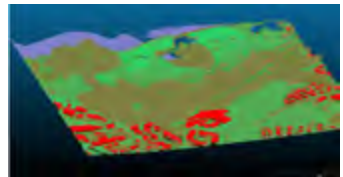


Fig. 4 : Tuile Lidar choisie

4. Appariement des références

Cette étape est déterminante puisqu'elle revient à trouver les coordonnées pixels des points d'appuis dans l'image de la Figure 5a et de positionner la vue. La difficulté réside dans l'association des bonnes coordonnées 3D au bon pixel. Notre première approche a été de travailler avec les points visibles de l'horizon. On commence par détecter les horizons sur notre image fisheyes par l'algorithme de Deep Convolutional Neural Network (DCNN) proposé par [2] pour classifier les pixels appartenant au ciel (Figure 5b). Afin de lisser l'horizon et d'atténuer les bruits causés, on applique l'opérateur morphologique d'ouverture. On obtient une série de pixel i, j (en rouge) sur la Figure 5c en suivant les variations des valeurs des pixels. La Figure 5d affiche ces points sur l'image d'origine.

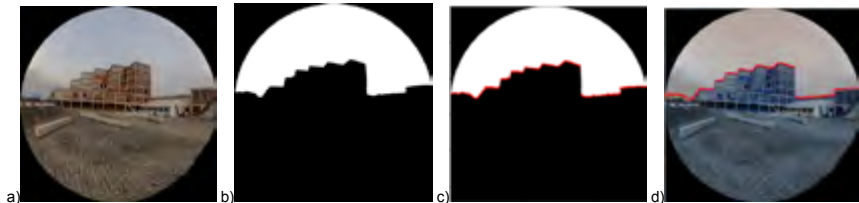


Fig. 5 : Détection de l'horizon dans l'image

On souhaite connaître les coordonnées 3D des points de cette ligne en la comparant au LiDAR. Une première méthode est de créer un environnement 3D vu depuis une caméra fictive avec la position et l'orientation de celle trouvée précédemment, Figure 6a. Afin d'obtenir un horizon plus lisse et avec moins de variations, on peut créer un maillage selon la méthode de Delaunay avec CloudCompare, Figure 6b. On obtient ainsi une image de 2720x2720 pixels et une carte de profondeur, Figure 6c, essentielle pour passer de la 2D à la 3D par la suite. De la même manière, on trouve l'horizon en suivant l'évolution verticales des valeurs des pixels, Figure 6d.

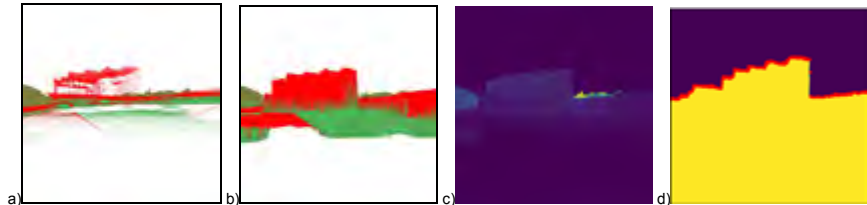


Fig. 6 : Détection de l'horizon dans le LiDAR

Nous cherchons désormais à connaître les coordonnées 3D des points d'horizon issu du LiDAR à partir de la vue générée. On isole les coordonnées terrains des équations de colinéarités. Par exemple, sur la Figure 7a, l'horizon a été détecté (en rouge) puis des coordonnées 3D en ont été calculé, la Figure 7b en est un affichage des résultats (en blanc).

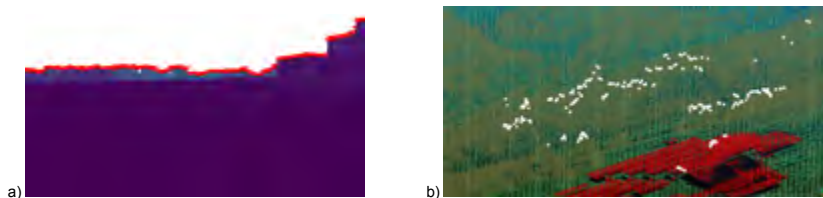


Fig. 7 : Détection de l'horizon dans le LiDAR

Cependant, cette première méthode peut impacter la précision des coordonnées planimétriques 3D des points d'appuis, parfois de 2 à 3 m.

Une seconde méthode consiste à travailler directement sur un MNT au format grille du nuage de point. En parcourant chaque angle intermédiaire du champ de vision de la caméra, on conserve comme points d'horizon les points les plus proches et ayant l'élévation la plus importantes de chaque ligne de visée. On s'affranchit ainsi des erreurs issues des projections successives en conservant les points en coordonnées polaires. Un contrôle que l'on peut faire sur les points retenus est de comparer les coordonnées calculées avec le nuage initial, or moyenne de 18 cm et un écart-type de 8 cm, voir Figure 8. Ces résultats peuvent encore être améliorés en travaillant avec un pas plus petit de rasterisation du nuage et de parcours des points de chaque ligne. Cela augmente le temps de calcul par rapport à la première méthode.



Fig. 8 : Contrôle des coordonnées 3D

5. Calculs de l'orientation

Pour résumer ce que nous venons de faire, on connaît une liste de points $[i, j]$ issue de l'image d'origine et une liste de points $[i', j', X, Y, Z]$ issue du LiDAR. L'objectif est désormais d'associer à chaque pair (i, j) au (i', j') correspondant pour obtenir les points d'appui $[i, j, X, Y, Z]$.

Cette correspondance peut être déterminée par le Direct Time Warping (DTW) qui fait coïncider deux séries temporelles [3]. Ici, ce sont les coordonnées « j » des pixels qui servent d'index « temporel » pour le DTW. Il existe plusieurs paramètres à modifier comme les patrons des contraintes ou leur poids [4]. Le module python DTW [5] permet d'appairer 2 listes de mêmes tailles en créant une matrice de « coût » lié à la distance et l'appariement sera choisi en fonction du chemin qui minimise ce coût. Une extension [6] permet d'améliorer le résultat en libérant les points de début et de fin du matching comme on peut le voir Figure 9.

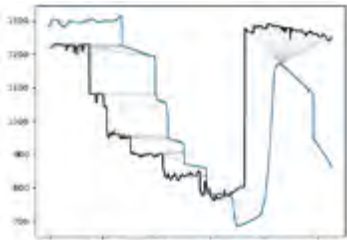
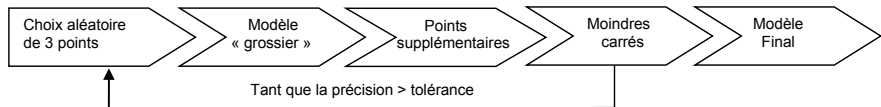


Fig. 9: Matching des points d'horizon

Pour obtenir la meilleure orientation, on peut appliquer les moindres carrés à nos équations de colinéarités et on a deux équations par point. Afin de favoriser les meilleurs résultats, on applique q'l'algorithme RANSAC pour conserver le meilleur modèle trouvé avec les meilleurs points.



Enfin, le modèle retenu sera comparé aux coordonnées du réseau de points entourant l'HEIG-VD et de points pris par antennes GNSS.

6. Conclusion et perspectives

La géolocalisation d'images par extraction d'informations visuelles combinées aux mesures des capteurs pourrait être utilisée dans de nombreux domaines. Comme le montrent les projets du laboratoire INSIT, mise à jour de cadastre souterrain par photogrammétrie et la géolocalisation en montagnes.

Ce résumé présente les différentes étapes de traitement afin d'obtenir des informations plus fidèles sur la prise de vues. Pour cela, il faut veiller à ce que chaque résultat intermédiaire ne nuise pas à la qualité globale du calcul. C'est aussi un défi d'automatisation, dont le but est de pouvoir proposer une chaîne de traitement la plus autonome possible. Actuellement, un travail préliminaire doit être fait pour obtenir les données LiDAR tuiles par tuiles mais on pourrait imaginer utiliser un outil de potreeviewer comme l'a fait le SITN [7] pour augmenter le nombre de détails utilisables.

7. Références bibliographiques

- [1] Carraud, A., Mariani, F., and Gressin, A. (2022). AUTOMATING THE UNDERGROUND CADASTRAL SURVEY: A PROCESSING CHAIN PROPOSAL. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 43, 565-570.
- [2] Zou, Z. (2020). Castle in the sky: Dynamic sky replacement and harmonization in videos. arXiv preprint arXiv:2010.11800.
- [3] Berndt, D. J., & Clifford, J. (1994). Using dynamic time warping to find patterns in time series. In KDD workshop (Vol. 10, No. 16, pp. 359-370).
- [4] Rabiner, L., & Juang, B. H. (1993). Fundamentals of speech recognition. Prentice-Hall, Inc..
- [5] Giorgino, T. (2009). Computing and visualizing dynamic time warping alignments in R: the dtw package. Journal of statistical Software, 31, 1-24.
- [6] Tormene, P., Giorgino, T., Quaglini, S., & Stefanelli, M. (2009). Matching incomplete time series with dynamic time warping: an algorithm and an application to post-stroke rehabilitation. Artificial intelligence in medicine, 45(1), 11-34.
- [7] SITN. PotreeViewer. Système d'Information du Territoire Neuchâtelois (SITN). <https://sitn.ne.ch/lidar/>

Conception d'un outil de Géoréférencement automatisé, assisté par Intelligence Artificielle, pour le report de réseaux concessionnaires DICT



PFE présenté par : **Quentin ANDRIEUX**
Société d'accueil : **GEOFIT EXPERT**
Directeur de PFE : **Christophe PIOU**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**
Encadrant : _____

GEOFIT
EXPERT

1. Problématique

La problématique initiale de ce stage de fin d'étude consiste à optimiser (voire automatiser) l'activité de **report réseaux** et de gestion de flux documentaires DICT au sein du groupe GEOFIT.

Ce besoin est impulsé par la **réglementation DT-DICT** du 1^{er} juillet 2012, réforme anti-endommagement dont l'objectif vise à mieux définir les rôles de chaque intervenant dans le cadre de travaux à proximité de réseaux, afin de prévenir les accidents et incidents qui pourraient avoir lieu à l'issue desdits travaux.



Fig. 1 : Formulaire DICT suite à la réforme anti-endommagement

GEOFIT Expert est généralement appelée par les exploitants réseaux afin de réaliser une activité de report réseaux sur la base de plans PCRS (Plan Corps de Rue Simplifié), sur lesquels les réseaux sont reportés à partir des données concessionnaires récupérées sur le portail DICT.

Cette activité, qui représente un marché conséquent pour l'entreprise, est aujourd'hui entachée d'un certain nombre de difficultés : traitement à la main laborieux par des techniciens ; manque de précision et d'analyse de précision sur les dossiers traités ; géoréférencement difficile et parfois peu précis ; démultiplication des acteurs impliqués.

L'objet de mon stage était donc d'optimiser cette activité en développant un **outil d'aide au géoréférencement**, et éventuellement de report automatique des réseaux à partir des éléments DICT.

Cependant, après des réflexions en interne, mon sujet a évolué sur la partie géoréférencement, qui représente un véritable apport de valeur pour l'entreprise, tout en ouvrant d'autres cas d'applications transversales possibles à travers les différentes activités du groupe.

Ma problématique finale est donc de trouver un moyen de **géoréférencer automatiquement un plan DICT**, quel que soit son emplacement en France, de façon précise et automatisée.

2. Solution proposée

Pour répondre à cette problématique, la solution envisagée fait appel à la notion, **d'intelligence artificielle** combinée à l'emploi de données internes au groupe. Cette solution prend la forme de l'entraînement d'un modèle de Machine Learning, une sous-catégorie de l'intelligence artificielle que nous détaillerons dans le point suivant (cf. « 3. Machine Learning »).

La méthode envisagée consiste donc à entraîner ce modèle Machine Learning grâce à **des bases de données** élaborées à partir de photos aériennes et de plans vecteurs RTGE (Référentiel topographique à Très Grande Echelle).

Ce modèle devra par la suite être capable d'identifier des éléments pouvant aider au géoréférencement d'un plan à partir d'une photo aérienne quelconque. Une fois ces éléments identifiés sur le plan et dans la base de données, l'outil établira **une correspondance** entre ces éléments qui permettra de géoréférencer le plan de façon précise (conforme classe A*).



Fig. 2 : Données exploitées : Orthophotos 5cm et Plans RTGE

3. Machine Learning

Le **Machine Learning**, ou apprentissage automatique, est une sous-catégorie de l'intelligence artificielle, qui permet aux machines d'apprendre des choses pour lesquelles elles n'ont pas été préalablement programmées.

Il existe une autre sous-catégorie d'apprentissage automatique très efficace, le **Deep Learning**, ou apprentissage profond, qui fait maintenant partie de la majorité des travaux d'apprentissage automatiques dans le domaine scientifique.

Le Deep Learning fait appel à des **réseaux de neurones artificiels**, dits « ANN ». Ce sont des systèmes d'apprentissage conçus à l'image des neurones biologiques et associés aux méthodes statistiques de pointe.

Parmi ces réseaux, nous utilisons particulièrement les **réseaux de neurones convolutifs (CNN)**, des ANN employant une répartition des poids basée sur le processus de convolution. Dans la pratique, ces réseaux sont très efficaces dans le cadre de la **vision par ordinateur**, car adaptés au traitement de données images.

C'est d'ailleurs l'un des sujets principaux du Machine Learning ces dernières années : la **détection d'objets dans une image**. Et c'est bien la thématique qui nous intéresse, puisque nous cherchons à détecter des éléments de positionnement sur une photo aérienne.

Dans l'état de l'art actuel de détection de la présence et de la position d'un objet au sein d'une image, le modèle **Faster R-CNN** fournit les résultats les plus concluants de la façon la plus efficace. C'est donc ce détecteur que nous avons retenu pour l'étude.

**Classe A : incertitude maximale de localisation inférieure ou égale à 40 cm si le réseau est rigide, ou à 50 cm si le réseau est flexible.*

4. Etapes de l'étude

Maintenant que nous avons établi la problématique, proposé une solution et que nous avons posé les bases du Machine Learning, voici les étapes à suivre dans le cadre de ce sujet d'étude :

- Récupération des données et prétraitement :

Nous commençons l'étude par la **récupération des données** nécessaires à l'élaboration de nos bases de données d'entraînement. Ici, cela représente d'une part des photos aériennes haute précision, ainsi que leurs plans vecteurs RTGE associés, et d'autre part des données concessionnaires, sous la forme de plans format raster.

L'étape suivante consiste au **prétraitement des données** avant l'étude. Nous vérifions la cohérence des données, l'exhaustivité de leur contenu, les métadonnées associées, etc. Pour les données vecteurs, un traitement a lieu afin d'isoler les éléments d'intérêts dans des fichiers distincts. Enfin, des conversions ont lieu pour produire une donnée dans un format accessible et exploitable dans l'étape suivante.

- Récupération de l'information sur les données :

Une fois les données prétraitées, nous devons ensuite récupérer l'information qu'elles contiennent. Cela est réalisé de différentes manières, en fonction de la donnée à récupérer, et du format de la source. Pour cela, un algorithme est programmé (ici en langage Python) pour « lire » les données, et en extraire les informations dont nous pourrions avoir besoin.

Ici, nous essayons concrètement d'**identifier les éléments de positionnement**, de récupérer leurs **positions géographiques** dans un système de coordonnées établi, et de les classer efficacement afin d'y accéder facilement.

Dans le cadre de l'utilisation de Faster R-CNN, le processus est le suivant : Nous créons des « bounding boxes » permettant de repérer un élément sur une orthophoto. Ces boxes servent ensuite à indiquer au modèle la présence d'un élément d'intérêt dans la zone indiquée pour l'apprentissage.

Les boxes connues en coordonnées viennent se superposer à l'élément en question sur l'orthophoto associée, ce qui permet de « montrer » à l'algorithme ce que l'on cherche à isoler.

- Constitution d'un dataset d'entraînement :

Une fois les données récupérées, classifiées et/ou générées, nous créons une base de données, ou dataset, qui contient nos données d'entraînement.

Nous distinguons trois types de datasets : le **dataset d'entraînement**, qui contient des exemples que nous allons montrer au modèle pour qu'il apprenne ; le **dataset d'inférence**, qui va permettre d'améliorer en direct notre modèle, ce dataset sera « vu » mais pas « appris » ; et le **dataset de test**, sur lequel on appliquera notre modèle pré-entraîné, et qui permettra d'évaluer sa performance.

Notre dataset doit contenir le maximum de cas possibles, tout en offrant suffisamment de robustesse sur les éléments à détecter. Des **augmentations de données** peuvent être effectuées, en altérant la donnée de base, afin d'avoir plus de volume d'information en entrée du modèle.

- Entraînement du modèle Machine Learning :

Une fois les bases de données constituées, on doit ensuite lancer l'**entraînement du modèle** Machine Learning. Pour cela, il faut réaliser un algorithme d'entraînement, que nous basons sur la bibliothèque logicielle **PyTorch**, utilisée pour les applications de Deep Learning.

On effectue les phases **d'entraînement**, **d'inférence/validation** puis de **test**, et on évalue la performance des différents modèles utilisés. En fonction des résultats obtenus, on affine le modèle, on complète les bases de données, et on ajuste l'algorithme, dans l'objectif d'obtenir de meilleurs résultats.

Une fois que l'on atteint des résultats satisfaisants, notre modèle est prêt à l'emploi.

Pour évaluer nos résultats, nous pouvons tracer des courbes d'inférences, qui vont montrer l'évolution du modèle epoch par epoch, en représentant la conformité aux données de validation, et la vitesse de convergence du modèle.

On évitera cependant l'« over-fitting », qui consiste à fausser nos résultats en démultipliant les epochs, ce qui nous conduit à « surentraîner » le modèle sur nos données, l'empêchant ainsi de fonctionner efficacement sur d'autres données.

5. Suite et Objectif final

Notre modèle de Machine Learning est maintenant capable d'identifier des éléments de positionnement sur des orthophotos ainsi que sur des plans raster concessionnaires. L'étape suivante est d'utiliser cette connaissance afin **d'établir une correspondance** entre le plan concessionnaire et la base de données internes déjà géoréférencées.

Cette partie de mon sujet étant pour le moment confidentielle, je vais me contenter de définir l'objectif final de l'étude.

Ainsi, nous avons comme objectif d'être en mesure de **récupérer et géoréférencer** un plan quelconque, en provenance de n'importe quel concessionnaire, si tant est qu'il contienne un nombre minimum d'éléments de positionnement.

Notre outil devra se montrer capable de proposer **une ou plusieurs configurations possibles** de géo-positionnement, avec une analyse d'erreur approfondie et une classe de précision associée.

En entrée, il nous suffira de fournir un ensemble de plans raster DICT, ainsi que notre base de données interne géoréférencée réalisée au préalable. On appliquera le modèle de Machine Learning pour la détection d'éléments sur les plans, qui seront ensuite associés à leur position grâce à notre base de données. On aura donc en sortie chacun des plans DICT géoréférencés, avec une analyse d'erreur pour chacun d'entre eux et une classe de précision (pour rappel, on vise la classe A).

6. Perspectives

Une fois l'objectif de l'étude atteint, de nombreuses perspectives d'évolution s'offrent à nous. Tout d'abord, nous pouvons retourner à la problématique initiale, et ajouter à l'outil de géoréférencement un **outil de report réseaux automatique**. Basé sur le même principe de détection d'objet sur une image raster, celui-ci n'aura qu'à reproduire les réseaux et les classer, étant donné que l'étape du géoréférencement sera déjà validée.

Une autre piste d'amélioration consisterait à imaginer un emploi de cet outil au-delà de l'échelle nationale. Par ailleurs, des améliorations de la donnée d'origine (typiquement, les évolutions dans le domaine photogrammétriques pour les orthophotos) permettront d'améliorer la précision de l'outil, tout en multipliant ses cas d'applications, car davantage d'éléments pourront être détectés.

Etudes de la précision du BackPack de Leica et mise en place d'une chaîne de production fiable, de l'acquisition terrain jusqu'au traitement des données. Exemples d'application dans le domaine de la topographie.

PFE présenté par : Robin Hachard
Société d'accueil : Bbass
Directeur de PFE : Maxime Most
Correctrice : Hélène Macher
Encadrant : Florent Authié



1. Introduction

Aujourd'hui, les besoins d'information géographique de nos environnements sont toujours plus complexes et la demande grandissante. Dans ce contexte le mobile mapping est un domaine en pleine évolution et la manipulation de larges jeux de données 3D font maintenant partie des compétences des cabinets de Géomètre-Expert. Le cabinet Bbass a fait l'acquisition d'un système de mobile mapping le Pegasus Backpack de Leica. Le grand avantage des MMS (Mobile Mapping System) est la possibilité de lever de larges zones en un temps restreint, car leurs principes se basent sur un balayage LIDAR et un déplacement continu du système.

Les backpacks sont un type de MMS particulier, ils se disposent sur le dos de l'opérateur pour réaliser l'acquisition des données. L'atout des backpacks se situe dans leur mobilité, en effet, tous les lieux accessibles à pied deviennent des lieux d'acquisition possibles (ruelle, escalier, plage, terrain végétalisé, ...), inaccessibles à la principale famille de plateforme mobile, les véhicules motorisés.

2. Principe de fonctionnement

Le Pegasus Backpack est un appareil multi-capteur, qui embarque les 3 technologies inhérentes à un système de mobile mapping. D'abord un système de positionnement et d'orientation autonome constitué d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle pour les levées en extérieur ainsi qu'un scanner LiDAR pour le positionnement par technologie SLAM rendant le système aussi fonctionnel en intérieur. Un second scan LiDAR est présent pour le balayage et l'acquisition de l'environnement en 3D. Enfin un système informatique embarqué (ordinateur et tablette) pour le stockage des données et la gestion en temps réel de l'acquisition.



Figure 1 : Pegasus Backpack de Leica

Outre sa composition, le BP (BackPack) de Leica dispose de méthodes d'acquisition et principes de traitement propres au mobile mapping. Pour l'acquisition, elle se réalise en deux étapes clés :

- 1) L'initialisation de l'appareil : Elle s'effectue en deux cycles, statique et dynamique dans un espace sans masque GNSS. Elle permet au système de se localiser à l'aide des observations GNSS ainsi que de calibrer sa centrale inertielle. L'initialisation est primordiale pour déterminer correctement la trajectoire. La phase statique doit durer 2 minutes, puis vient la

phase dynamique qui consiste à marcher rapidement durant 3 minutes en effectuant un patener de rectangle. Ce procédé est à répéter à la fin de l'acquisition en commençant cette fois par la phase dynamique et finir par la statique.

- 2) Le lever des zones d'intérêts, il faut garder le meilleur signal GNSS possible, réaliser des trajectoires les plus rectilignes possibles et ne pas effectuer de marche arrière, demi-tour ou virage trop brusque. L'opérateur ne bénéficie donc pas d'une liberté de mouvement total. Du début à la fin, le calcul de trajectoire est ininterrompu, mais l'acquisition 3D, elle, est périodique. C'est l'utilisateur qui lance et stop un cycle de mesure appelé Walk. Une acquisition est donc constituée de plusieurs Walks.

Une fois l'acquisition effectuée, La trajectoire du MMS est à calculer précisément, afin de connaître la position de chaque source laser émettrice et reconstituer fidèlement le nuage de points. Ce calcul s'effectue dans le logiciel de Leica *Pegasus Manager*, la solution préconisée pour le calcul de trajectoire est la méthode dite *Tightly Coupled* traduit par couplage fort. Cet algorithme robuste, utilise un filtre Kalman, il est capable de prédire des paramètres, de rectifier des erreurs en combinant toutes les informations disponibles et permet au nuage final de converger vers le résultat le plus probable. Cet algorithme part des coordonnées et de l'orientation du point précédent puis utilise les données issues du GNSS et de la centrale inertielle pour prédire, calculer puis contrôler la position suivante *figure2*. L'IMU à 200Hz permet aussi de calculer les positions intermédiaires entre les prises de mesure du GNSS cadencées à 1Hz, et défini l'orientation en tout point de la trajectoire.

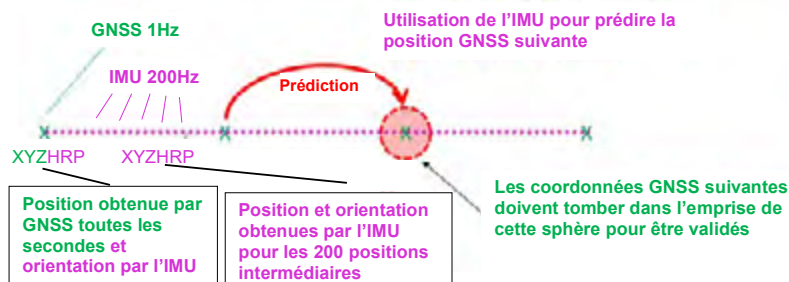


Figure 2 : Principe global du calcul de la trajectoire

3. Objectifs

Lors des premières missions réalisées par le cabinet, les limites du système, lorsque les relevés ne sont pas situés en zone « dégagée » du point de vue GNSS, ont été rapidement constatées et la précision des résultats ne correspondait pas aux attentes (3 et 5cm absolue).

Il est possible d'ajouter des points de calages ou GCP, ils sont similaires à une position GNSS connue et considérée comme vraie, ils peuvent compenser l'absence de signal GNSS. Mais mettre en place ces points de calage est souvent long (environ d'un rapport 1 pour 1 avec le temps d'acquisition au BP) et fastidieux (dû à la nécessité de placer les cibles avant l'acquisition et donc d'hypothétiser les masques GNSS). En post-traitement aussi, lors de l'ajustement du nuage, la majeure partie du temps actif de l'opérateur est consacrée à pointer les cibles. On remarque alors qu'une grande part de l'acquisition et du traitement des données brutes est consacré aux cibles, qui est de plus le seul temps optimisable, le reste étant des étapes ou des calculs incompressibles. De ce fait, en minimisant leurs nombres et en comprenant l'apport des points de calage dans le calcul, cela permettrait de gagner du temps et mieux estimer les précisions rendues.

C'est dans cette optique que le cabinet Bbass a rédigé et soumis ce sujet de PFE, afin d'étudier et de mieux estimer les précisions des travaux issus du Backpack. Le cabinet cherche également à optimiser sa chaîne de traitement, pour gagner en efficacité. J'ai d'abord analysé les calculs de trajectoires puis établi des règles pour minimiser le nombre de points de calage sur le terrain. Le second axe a été une réflexion portée sur les logiciels utilisés et la possibilité d'automatiser certaines phases du post-traitement.

4. Etudes de précisions et optimisation de l'acquisition

Dans les zones de masque, l'imprécision des données GNSS augmente, les prédictions et les positions GNSS ne correspondent plus. La trajectoire se repose uniquement sur la centrale inertielle, mais seule, celle-ci est faillible et il est probable qu'apparaisse un phénomène appelé « dérive » entre la trajectoire calculée et la trajectoire réelle. Les écarts liés à la dérive sont rapidement très élevés, car ils sont exponentiels par rapport au temps passé sans signal. Des méthodes existent pour limiter la dérive. Effectuer le calcul de trajectoire dans les deux sens (Forward/Reverse), à partir des points connus qui encadre une phase flottante. Le temps de flottement, est alors divisé par deux. Ou en déterminant des GCP, qui sont des cibles ou des points caractéristiques relever, Ils permettent d'encadrer la dérive et contraindre la trajectoire.

Mes premiers travaux sont consacrés à une étude rigoureuse du système en m'appuyant sur des méthodes comparatives issues de mes recherches bibliographiques. Pour comprendre l'influence des points de calage sur l'exactitude du nuage, trois walks, extraient d'une acquisition réalisée sur la commune de Castries (34), ont été sélectionnés comme base de travail :

1. Un premier Walk avec un état GNSS dégaî.
2. Un second avec une réception mitigée et variable.
3. Le troisième Walk avec une mauvaise réception du signal.

Un calcul d'exactitude nécessite une référence, ainsi en parallèle, une acquisition au scanner laser fixe a été effectué sur ces environnements. Pour établir des généralités d'exactitude selon les GCP, les acquisitions ont été recalculées selon différentes densités de GCP, d'abord sans recalage préalable puis avec des densités de GCP variables (tous les 100m puis tous les 50 et 25m). Ainsi, les trois zones d'étude possèdent un nuage de référence et 4 nuages d'étude issus de la même acquisition Backpack mais, calculés différemment.

Pour simplifier les comparaisons, les linéaires de corps de rue ont été divisés en profils, tous les 10 m pour les deux premiers cas et tous les 5 m pour le walk avec mauvaise réception GNSS. Afin d'étudier séparément les écarts planimétriques et altimétriques, chaque profil a été sectionné en deux groupes, un groupe comprenant les plans verticaux (mur) pour la planimétrie et un groupe comprenant les plans horizontaux (sol) pour l'altimétrie. Il est ensuite possible de les comparer à la référence à l'aide de la fonction de comparaison *Nuage/Nuages distance* dans le logiciel *CloudCompare*.

Nous obtenons les écarts des nuages avec la référence. Ces écarts sont localisés dans le temps et donc superposables à toutes les données qualité fournies par Pegasus Manager. Ces données sont d'ailleurs résumées par l'indice qualité qui compile de multiples facteurs (Nombre de GPS, Fixation des ambiguïtés, Séparation 3D, PDOP Ecart type et le facteur qualité) permettant de quantifier chaque point de la trajectoire dans une classe de précision allant de 1 à 3 (vert, jaune, rouge). Il est donc pertinent de mettre en relation les écarts avec cet indice pour comprendre quelle densité de GCP est appropriée pour chaque situation.



Figure 3 : Pegasus Backpack de Leica

Cette analyse m'a permis d'établir plusieurs règles utiles pour l'acquisition et le traitement dont voici les principales :

- Lors de longues phases de bonne réception GNSS. Le nuage brut est naturellement dans les tolérances, il n'est pas nécessaire d'introduire des GCP dans le calcul.
- L'indice qualité est fiable, les seules zones ou les nuages bruts sont hors tolérance correspondent à un indice qualité maximum.
- Introduire des GCP de manière régulière tout au long d'un levé n'est pas la bonne méthodologie. Il faut privilégier l'emplacement des GCP à leur nombre.
- Comme il est impossible de prédire en amont, l'emplacement précis des pics d'écarts pendant une phase flottante, une densité de GCP tous les 10m est idéale pour compenser ce problème dans une zone sans signal GNSS.
- Si une phase GNSS fixe est inférieure à 100m et encadrée par des phases flottantes, le nuage brut n'est pas forcément exploitable. Il faut placer des points de contrôle transformables si besoin en point de calage ou effectuer une courte initialisation dynamique pour recalibrer la centrale.

5. Etude et mise en place d'une chaîne de traitement

Le second objectif de ce PFE est d'optimiser la chaîne de post-traitement du calcul du nuage brut jusqu'au rendu final. Le cabinet Bbas utilise principalement le BP pour deux types de missions, la réalisation de MNT et la production de plan topo 2D, il peut aussi à de plus rares occasions être la source d'acquisition pour la réalisation de maquettes BIM. Actuellement, la DAO est effectuée à l'aide de Cloud2Map logiciel de traitement proposé par Sogelink permettant une interopérabilité entre Autocad et Pegasus Manager. Ce lien permet notamment d'avoir accès à toutes les fonctionnalités d'Autocad, en interagissant avec le nuage depuis une visualisation 3D. Malgré l'aspect pratique de cette solution, tout doit être fait à la main et la manipulation du nuage dans Pegasus est limitée. J'ai alors listé les logiciels existants, capables de faciliter le traitement et venir s'intégrer entre le calcul du nuage brut dans Pegasus Manager et la DAO manuelle dans Cloud2Map, les principales capacités souhaitées pour ce logiciel sont :

1. La possibilité de manipuler facilement de la données 3D (segmentation, classification, débruitage...).
2. Réussir à vectoriser automatiquement ou semi-automatiquement certaines lignes caractéristiques, comme les bordures, lignes blanches, le bâti ou encore les arbres ou poteaux.
3. Simplifier et optimiser la réalisation de MNT.

Différentes solutions ont été trouvées et jugées comme intéressantes : VisionLIDAR, RealWorks, TerraSolid, TopoDOT, Cyclone 3DR ou encore OrbitGT. À la suite d'une étude théorique sur les fonctions et le retour des utilisateurs de cette liste, deux logiciels ont été retenus en priorité, pour une phase de test pratique et un récapitulatif des fonctions disponibles, Cyclone 3DR et TerraSolid.

6. Conclusions

Mes études ont permis de constater que le Backpack a la capacité d'atteindre les tolérances souhaitées, cependant le temps et le poids du protocole à mettre en place dépendent de la nature du terrain. La finalité est d'établir des protocoles, pour pérenniser et transmettre mes travaux. Malgré la complexité des systèmes mobiles, le cabinet souhaiterait pourvoir à terme, envoyer pour l'acquisition, des techniciens géomètres non spécifiquement formés au mobile mapping. Un premier protocole résume toutes les étapes clés et les subtilités de la phase d'acquisition. De la même façon des protocoles sont établis pour la phase de post-traitement, j'y résume la méthodologie et mes résultats sur l'automatisation de la DOA qui s'avère concluant pour certain type de projet.

Evaluation des performances d'un algorithme de calcul de comparaison de nuages de points

PFE présenté par : **Sidonie LECLERC**
Société d'accueil : *ScanLab, Sixense Mapping*
Directrice de PFE : *Emilie JOUSSET*
Correctrice : *Tania LANDES*



1. Contexte et objectifs du projet

Ce stage de fin d'études est effectué dans le cadre d'un projet, lancé en 2020, commun à trois entités du groupe Sixense : Sixense Mapping, Sixense Oceania et Sixense Monitoring. Actuellement, cette dernière souhaiterait pouvoir comparer deux nuages de points dans une unique chaîne de traitements, de manière précise. Son principal contexte d'étude concerne l'auscultation des ouvrages d'art, c'est-à-dire le suivi de leur comportement dans le temps. Elle aimerait, pour ce faire, connaître les limites d'utilisation des scanners laser terrestres dans ce contexte.

C'est pourquoi une réflexion commune a été lancée, dans l'optique de créer un algorithme de comparaison de nuages de points et une chaîne de traitements complète répondant à leurs besoins. En fonction des cas d'usage, deux approches ont alors été définies pour l'acquisition des données : l'utilisation d'une station totale ou l'utilisation d'appareil multi-station de type Trimble SX10/SX12 (un scanner ayant des capacités de station totale). Ce stage de fin d'études se concentre uniquement sur l'approche par multi-station. L'objectif de ce travail est de définir les préconisations techniques à adresser aux équipes techniques lors de l'acquisition des données afin de garantir un niveau de performance adéquat à leur cas d'usage.

Aujourd'hui, l'algorithme permettant la comparaison de nuages de points, ainsi qu'un outil de visualisation des données et des résultats ont déjà été développés. Ils sont cependant en constante amélioration afin de répondre au mieux aux besoins de l'auscultation. En effet, la méthode d'acquisition des données influençant la comparaison des nuages, les logiciels doivent s'adapter aux différents cas rencontrés. C'est là qu'intervient mon sujet de projet de fin d'études pour répondre aux problématiques suivantes :

- Comment peut-on obtenir des résultats d'une précision suffisante avec l'appareil multi-station SX10, dans un contexte d'auscultation ?
- Quelles sont les préconisations à faire aux équipes techniques pour effectuer des acquisitions dans un contexte d'auscultation, avec un tel instrument ?

Les objectifs du projet sont donc de définir les limitations de la chaîne de traitements pour une multi-station, de connaître les précisions atteignables dans un tel contexte et d'établir un protocole d'acquisition complet, en fonction des différents cas d'usages retrouvés en auscultation.

2. Acquisition de données expérimentales

Afin de pouvoir évaluer les performances d'un appareil multi-station, des jeux de données expérimentaux ont été acquis en utilisant un instrument Trimble SX12 (figure1). Cet instrument a été choisi pour ses caractéristiques topographiques et de numérisation résumées dans le tableau 1 ci-dessous.

Caractéristiques topographiques	
Précision de mesure angulaire	1" (0,3 mgon)
Précision de mesure de distance	Mode Prisme : 1 mm + 1,5 ppm Mode Direct Reflex : 2 mm + 1,5 ppm
Présence de compensateur automatique de niveau	Oui
Caractéristiques de numérisation	
Principe de mesure	Scanner à temps de vol
Fréquence de mesure	26,6 kHz (26 600 points/seconde)
Portée de mesure	Jusqu'à 600 m
Pas de balayage à 50 m	6,25 mm/ 12,5 mm/ 25 mm/ 50 mm
Champ de vision	360°*300°

Tableau 1 : Principales caractéristiques d'un appareil multi-station Trimble SX12



Figure 1 : Trimble SX12

Dans le cadre du projet, des hypothèses de départ ont été émises à partir de l'état de l'art et de précédentes expérimentations :

- Les cas d'usages principaux seront, de manière non-exhaustive, des ponts, des tunnels et des façades (dans le domaine de l'auscultation).
- Utilisation de l'appareil multi-station Trimble SX10 ou SX12, vérifié et calibré avant usage.
- Les nuages de points seront relevés par géoréférencement direct, il n'est donc pas prévu d'étape de consolidation en phase de post-traitement.
- La comparaison de nuages de points servira à la détection de mouvements de l'objet scanné.
- Utilisation de la méthode de comparaison développée en interne.

Les expérimentations doivent représenter des situations auxquelles les techniciens peuvent être confrontés lors d'un relevé scanner à l'appareil multi-station dans un contexte d'auscultation. Pour cela, il est important de prendre en compte différents paramètres influençant l'acquisition des nuages de points : la distance de l'objet au scanner, son angle d'incidence, les caractéristiques de l'objet (matériau, surface, taille...). La scène numérisée est donc composée d'objets de tailles et de matériaux divers et de caractéristiques de surfaces variées. De plus, la fabrication de bancs de tests personnalisés composés de différents matériaux : planche de bois, béton cellulaire et tôle de métal, a donc été nécessaire dans le cadre de ce projet de fin d'études, afin d'obtenir des zones d'études homogènes.

Un des principaux objectifs de ces tests est d'identifier les mouvements d'un ouvrage d'art détectables lors d'une comparaison de nuages de points. Cependant, il nous est impossible de considérer l'ensemble des changements possibles dans le temps alloué aux expériences et avec le matériel disponible. En effet, comme le montre la figure 2 ci-dessous, un ouvrage, dans un contexte d'auscultation, peut être soumis à un déplacement vertical, un déplacement horizontal ou encore une rotation selon chacun des axes, voire une combinaison de plusieurs types de déplacements. Chacun de ces mouvements, d'envergure potentiellement variable, peuvent être vu selon différents points de vue, augmentant ainsi le nombre de possibilités.

Le choix des déplacements testés a donc été effectué en accord avec les attentes de Sixense Monitoring. Les bancs de tests construits sont les objets concernés par ces mouvements dans la scène globale.



Figure 2 : Types de mouvements détectables, Barras & Cannelle (2017)

3. Analyses et études de performances

Les jeux de données expérimentaux précédemment acquis constituent une base de données exhaustive permettant l'analyse des performances d'acquisition. Les objectifs de cette phase d'étude sont de :

- Evaluer techniquement les différentes étapes d'acquisition : temps de calcul, précision, performances, paramétrage, répétabilité...
- Définir les limites d'utilisation (conditions de mesure).

Pour remplir ces objectifs, deux types d'analyses sont menés.

La première consiste à analyser un jeu de données dans lequel aucun mouvement n'a été induit. Ce travail permet, dans un premier temps d'évaluer les précisions d'acquisition en l'absence de mouvement afin d'obtenir un ordre de grandeur de l'erreur sur la mesure en fonction des paramètres d'acquisition, de la géométrie d'acquisition et des caractéristiques des objets. L'étude prend en compte :

- Une analyse du niveau de bruit des nuages de points.
- Une analyse de précision en fonction notamment des paramètres d'acquisition et des caractéristiques des surfaces.
- L'impact de la distance entre la station et la zone mesurée sur la précision.
- L'impact de l'angle d'incidence de l'objet numérisé sur la précision.

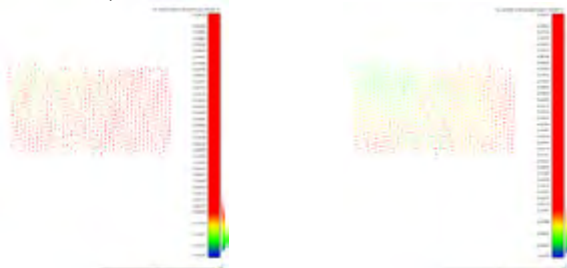
Ensuite, l'analyse se concentre sur la comparaison de deux états entre lesquels des mouvements de type et d'amplitude différents ont été induits. Ce travail permet d'évaluer les performances de détection des mouvements en fonction des paramètres et de la géométrie d'acquisition. Cette étude est l'occasion de quantifier :

- L'exactitude des mouvements détectés. Pour ce faire, les relevés 3D sont comparés à un relevé tachéométrique, considéré comme valeur vraie.
- La précision des mouvements mesurés grâce à la comparaison de plusieurs relevés 3D.
- L'amplitude minimale de mouvement détectable en fonction de la densité de la référence et/ou du nuage de points comparé.
- L'impact des caractéristiques de surface sur les performances de détection des mouvements.
- L'impact de la géométrie de mesure sur la détection de mouvements (distance scanner – objet, angle d'incidence).
- L'impact de la densité de mesure paramétrée (référence vs monitoré) sur la détection des mouvements.

Concrètement, nous pouvons voir sur la figure 3 ci-dessous, le résultat d'une comparaison d'un nuage de point en résolution « Eparsé » (50 mm à 50 m) avec une référence en résolution « Standard » (25 mm à 50 m). La figure 4 présente le résultat d'une comparaison du même nuage de point en référence une fusion entre un nuage en résolution « Standard » et un nuage en « Fine » (12,5 mm à 50m). Nous remarquons aisément que l'amplitude du mouvement détectée varie en fonction de la densité de la référence : plus cette densité est faible, plus les distances de comparaison vont être grandes. En effet, l'erreur moyenne sur l'image de gauche est de 6,404 mm, alors qu'elle n'est seulement de 4,945 mm à droite. Par conséquent, il peut être compliqué de détecter de petits mouvements dans la situation présentée sur la figure 3.

Figure 3 (gauche) : Résultat de comparaison liée à une détection de mouvements, faible résolution en référence

Figure 4 (droite) : Résultat de comparaison liée à une détection de mouvements, haute résolution en référence



Les résultats de cette expérimentation permettent la définition du protocole d'acquisition dans un contexte d'auscultation en fonction du cas d'usage. Il fixe premièrement la méthode d'acquisition du nuage de points de référence. Le protocole prend en compte différents paramètres et en fixe certains, comme :

- La géométrie d'acquisition à respecter : l'étendue de la zone à numériser et la position de la station par rapport à la zone à surveiller.
- La résolution spatiale de la référence en fonction du cas d'usage et de l'amplitude des mouvements attendus.
- Le nombre de nuages composant la référence afin de s'assurer de sa qualité tout en limitant le temps d'acquisition.

Le protocole fixe également les paramètres d'acquisition du nuage de points comparé, en fonction des types et amplitudes de mouvements attendus, et notamment :

- Le nombre total de nuages de points à relever.
- Leur résolution spatiale.
- La géométrie d'acquisition à respecter : la stabilité et la hauteur de la station.

Ce travail met également en lumière les limitations de la méthode d'auscultation par multi-station :

- L'amplitude de mouvement minimale qui peut être détectée.
- La présence d'effets de bord sur les objets numérisés.
- Le temps total d'acquisition.
- La quantité de données acquises.
- Le temps de traitement nécessaire.
- La précision globale de la méthode d'acquisition.
- Le type de mouvement qu'on peut, ou non, visualiser.
- Les conditions de mesure (distance au scanner, angle d'incidence sur l'objet).

4. Conclusions et perspectives

Pour conclure, ce résumé met en lumière les expérimentations qui ont été effectuées dans le cadre de ce projet de fin d'études, ainsi que les diverses analyses et l'évaluation de la qualité d'acquisition et de comparaison des données. Il en ressort principalement que de nombreux facteurs impactent le résultat à leur manière : angle d'incidence de l'objet, distance au scanner, caractéristiques des surfaces scannées, résolution spatiale. De plus, la détection de mouvements dans un contexte d'auscultation, placée au cœur de cette étude, dépend de paramètres liés autant à l'acquisition (comme la taille de l'objet ou la résolution spatiale du scanner) qu'à la méthode de comparaison (comme le choix de la référence).

De manière plus générale, ce sujet est centré sur l'acquisition de données scanner à partir d'un appareil multi-station Trimble SX12, dans un contexte d'auscultation. Il a donné lieu à la quantification des précisions atteignables avec un tel instrument lors des mesures et des comparaisons, ainsi qu'à l'établissement d'un protocole d'acquisition comportant les recommandations liées à son utilisation pour les différents cas d'usages rencontrés. Ce projet de fin d'études permet donc aux techniciens d'adapter leur travail, afin d'acquérir des données optimales à la détection de mouvements.

La technologie des scanners lasers évoluant en permanence, le protocole d'acquisition, ainsi que l'algorithme de calcul de comparaisons, devront continuer à être adaptés dans ces prochains temps pour optimiser les résultats.

5. Références

Barras, V., Cannelle, B., (2017). Auscultation sans réflecteur. *Revue XYZ*. No.151, AFT (Association Française de Topographie), pp.43-50.

Trimble Inc. (2017). Fiche technique Trimble SX10 Station totale scanner.

Documentation des tunnels par imagerie 3D haute-résolution

PFE présenté par : **Florian BARCET**
Société d'accueil : **Cerema**
Directeur de PFE : **P. CHARBONNIER**
Correcteur : **P. GRUSSENMEYER**
Encadrants : **P. CHARBONNIER et P. FOUCHER**



1. Contexte et objectifs de l'étude

La détection automatique d'équipements de tunnels est un projet que le Cerema a débuté il y a plusieurs années. Ce projet a pour but de permettre la surveillance et le contrôle des ouvrages d'art constituant le patrimoine routier. L'objectif est de pouvoir réaliser une documentation détaillée des tunnels afin d'obtenir un suivi précis des éléments de sécurité.

Cette problématique a été abordée sous plusieurs angles. Premièrement, l'équipe de recherche ENDSUM, a développé un système d'acquisition de données innovant permettant d'obtenir des images précises des tunnels alliant intensité et profondeur. Puis, un travail de modélisation de la forme du tunnel a été entrepris avec des ajustements de surface. Cela a ouvert aux chercheurs l'approche du *Machine Learning* permettant de détecter les équipements. Cette partie a abouti au développement d'une interface utilisable pour l'annotation de données. Dans ce contexte, l'objectif de mon stage a été de mettre au point des méthodes d'apprentissage profond pour détecter précisément les équipements dans les tunnels à partir de données. Ma contribution intervient notamment dans la constitution de la base de données labellisées, la mise en œuvre et l'évaluation d'une architecture spécifique dédiée à la segmentation d'instances, et l'utilisation des résultats pour aller vers une documentation des équipements des tunnels.

2. Présentation et gestion des données

Les données utilisées sont issues du capteur développé par l'entreprise *Pavemetrics* appelé LCMS (*Laser Cracks Measurement System*). Son fonctionnement est fondé sur une technologie innovante : un émetteur projette une ligne laser sur l'objet inspecté, et une caméra digitale se charge d'enregistrer l'intensité de retour du signal ainsi que les déformations de la ligne (traduit en informations de profondeurs). Ces profils sont capturés dans le sens du déplacement et sont agglomérés pour former des images de 2080x1500 pixels (voir fig. 1). Ce système a une résolution fine : un point par millimètre le long de la ligne, un profil tous les 2mm dans le sens d'acquisition et une précision de 0.5mm en profondeur. Il a été conçu pour être utilisé sur des routes et autoroutes, mais nous l'avons adapté aux murs (parements) des tunnels. Le Cerema a développé un prototype appelé MALT « *Mobile Acquisition with Laser in Tunnel* » (Foucher et al., 2019). Il a permis d'obtenir un grand nombre de données dans trois tunnels, utilisables pour les développements des programmes et interfaces.



Fig. 1 : Exemple d'images d'intensité (à gauche en niveau de gris) et de profondeur (à droite) : niveau de gris selon la profondeur et valeurs invalides / hors limites sont marquées en vert (Tual et al., 2021)

Un des objectifs du projet est de modéliser l'aspect du tunnel. La problématique est que la forme d'un tunnel n'est pas une structure simple de type plan ou cylindre. En effet, les murs sont souvent équipés d'éléments de sécurité (panneau de circulation, danger, incendie, etc.) ainsi que différents câbles, gaines, lumières ou encore cavités, niches et refuges. En s'appuyant sur des méthodes d'estimation

robuste, nous pouvons obtenir à la fois un modèle qui s'approche au mieux de la réalité et isoler les équipements ce qui facilite la constitution de la vérité terrain nécessaire à l'apprentissage. Le choix de la fonction mathématique permettant de modéliser la surface est aussi très importante. Maxime TUAL (Tual et al., 2021) a choisi durant son stage au Cerema d'utiliser des B-splines, car elles s'adaptent particulièrement bien à la forme d'un tunnel et à ses différentes caractéristiques. Afin de gérer l'implémentation de cet ajustement, un applicatif python a été développé. Cette interface permet de mettre en place une méthode incrémentale augmentant à chaque itération la robustesse.

Les résultats obtenus avec l'ajustement de surface ont ouvert la voie à une approche de segmentation non supervisée sur des images considérant les résidus entre la surface ajustée et les points afin d'obtenir un masque au pixel près des objets. Cette segmentation s'est réalisée avec un algorithme hiérarchique appelé HDBSCAN (Campello et al., 2015). Différents hyperparamètres sont rajoutés afin d'accélérer la segmentation, ils ont été optimisés lors du Projet de Recherche Technologique que j'ai réalisé au semestre précédent (BARCET, 2021). Pour finir, une interface a été implémentée afin de corriger les erreurs de segmentation et d'attribuer un label à chaque classe. Cela nous permet d'obtenir des vérités terrain sur l'ensemble des images de tunnels.

3. Deep Learning et Apprentissage

La reconnaissance des formes est une tâche qui se découpe en plusieurs catégories en fonction des besoins. On retrouve quatre grandes applications : la classification simple, la classification et la localisation, la détection d'objets et la segmentation d'instance. Depuis 2012, les algorithmes d'apprentissage profond (*Deep Learning*) sont devenus les plus performants pour ces tâches. Ils fonctionnent à partir de réseaux de neurones convolutifs organisés sous forme de couches. Celles-ci sont interconnectées (entièrement ou non), et elles reçoivent et interprètent les informations de la couche précédente. En tête de ces réseaux, nous retrouvons un extracteur de caractéristiques : une image est passée à travers une succession de filtres, ou noyaux de convolution, créant de nouvelles images appelées cartes de caractéristiques (*feature map*). Plus on réalise de convolutions, plus on va chercher des caractéristiques particulières dans une image. Au final, les cartes de convolution sont mises à plat et concaténées en un vecteur de caractéristiques, appelé code CNN. C'est ce code qui est connecté à la seconde partie de l'algorithme, ayant pour but de combiner les caractéristiques afin de résoudre la tâche de reconnaissance des formes considérée.

Les objectifs du stage sont de détecter à l'échelle du pixel différents objets complexes dans les tunnels. Pour cela, la segmentation d'instance est la plus appropriée. Le choix de notre algorithme s'est donc porté sur Mask R-CNN, qui est une référence dans ce domaine. Son architecture a été progressivement mise au point à travers une cascade d'articles publiés depuis 2014 avec l'architecture R-CNN (Girshick et al., 2014) dédié à la détection d'objets en introduisant des couches convolutives à certaines étapes de l'algorithme jusqu'à Faster R-CNN (Ren et al., 2016), une architecture entièrement convolutive avec l'introduction du réseau de propositions de régions (RPN). En 2018, l'architecture Mask R-CNN (He et al., 2018) ajoute l'extraction d'un masque binaire à l'algorithme Faster R-CNN permettant une segmentation d'instance (voir fig. 2).

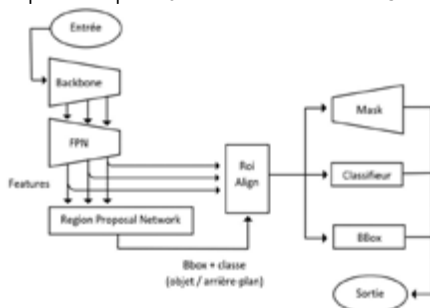


Fig. 2 : Diagramme des différents éléments du Mask-RCNN (Tual et al., 2021)

Après un travail de création de vérités terrain, j'ai développé un programme de gestion de la base de données permettant de créer des jeux de données (*datasets*) d'entraînement, de validation et de test. Le premier sert à entraîner le réseau, le second à sélectionner le modèle et le dernier à tester et confirmer les résultats. J'ai ainsi pu réaliser plusieurs apprentissages sur un réseau pré-entraîné en faisant varier les effectifs et les données de chaque groupe. Pour introduire de la variabilité dans les données, les techniques usuelles d'augmentation de données ont été utilisées sur le datasets d'entraînement. Ces méthodes consistent à appliquer des transformations géométriques et photométriques sur les images d'apprentissage.

Dans les données tunnel en notre possession, 24 classes d'objets sont considérées. Notons que les effectifs entre les classes sont très déséquilibrés (nous avons par exemple 658 objets câbles différents et 3 objets caméras). Il est difficile d'apprendre au réseau des équipements peu nombreux. Le modèle est dans un premier temps évalué image par image, j'ai mis en place un algorithme capable de calculer, pour chaque classe, les objets bien détectés (vrais positifs, VP), les non détectés (vrais négatifs, VN), et ceux qui ont été détectés mais qui n'auraient pas dû l'être (faux positifs, FP). Ces trois métriques vont nous conduire au calcul de la précision, qui va déterminer la qualité de détection de notre algorithme, et au rappel, qui montre l'exhaustivité de notre algorithme. La moyenne harmonique de ces deux outils donne le score F1 :

$$\text{Précision} = \frac{VP}{VP + FP} \quad \text{Rappel} = \frac{VP}{VP + FN} \quad F1_score = 2 * \left(\frac{\text{Précision} * \text{Rappel}}{\text{Précision} + \text{Rappel}} \right)$$

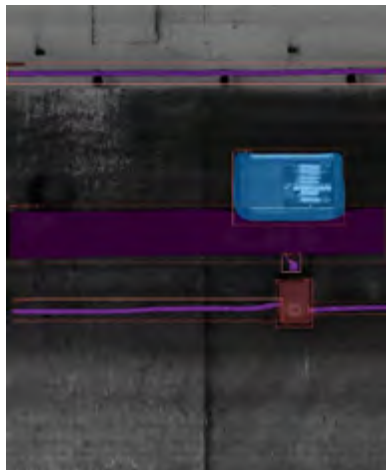


Fig. 3 : Exemple de résultat de détection sur une image contenant un câble, un boîtier électrique, un passe-câbles et un

Lors de l'évaluation des performances, on observe des résultats très encourageants (voir fig 3) sur les objets tels que les câbles, les passes-câbles et les luminaires, fortement représentés dans les données (Score f1 entre 80% et 100%). Pour les objets de fréquence d'apparition plus faible, les performances sont plus contrastées. Par exemple les caméras de surveillance qui sont représentées par trois instances dans la base d'apprentissage sont très mal détectées. *A contrario*, l'objet « prisme sos téléphone », également représenté par un faible nombre d'instances est très bien reconnu (score f1 de 100%). On n'observe pas de corrélation entre le résultat de l'évaluation et le nombre d'objets représentés dans la base d'apprentissage. Une explication possible est que certains objets peu représentés ont une forme industrielle standardisée (panneaux de circulation par exemple) pour lesquels les caractéristiques varient peu et sont facilement apprises par l'algorithme. D'autres difficultés sont apparues, par exemple, les joints de voussoir sont particulièrement mal détectés. Cela semble être dû au fait que l'objet « joint » est en arrière-plan et qu'il est régulièrement recouvert par d'autres objets du premier plan.

Afin d'entraîner un modèle et évaluer ses performances quand on a des bases de données de petite taille, une

des solutions est la validation croisée. Elle se fonde sur des techniques d'échantillonnage. Elle permet de tester la stabilité de notre modèle et d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Pour cela, nous divisons l'ensemble des données en n ensembles égaux. Le premier ensemble est sélectionné comme ensemble de validation et le modèle est entraîné sur les autres ensembles $n-1$. Le taux d'erreur est ensuite calculé après ajustement du modèle grâce aux données de validation. Dans la deuxième itération, le second ensemble est sélectionné comme validation et les autres ensembles $n-1$ sont utilisés pour l'entraînement. Ce processus se poursuit pour tous les n ensembles. En réalisant cela, j'ai pu voir que les objets les plus représentés étaient ceux ayant les résultats d'évaluation les plus stables. Certains objets sont complètement mis de côté dans certaines configurations (caméra par exemple), cela est dû au fait que le tirage aléatoire utilisé ne garantit pas que les effectifs des classes suivent les mêmes proportions que celles de la population de départ. Pour contrer cela, un nombre minimum d'objets pourrait être indiqué dans chaque classe (technique de stratification). Cela permettrait d'obtenir des performances plus stables.

4. Fusion des objets

Un problème majeur est apparu lorsqu'on doit travailler avec des images « coupées » et qu'un objet se trouve au bord. Dans certains cas, il est difficilement détecté par l'algorithme car les caractéristiques n'ont pas pu être suffisamment dévoilées, de plus j'ai remarqué de nombreuses erreurs de classification pour ces objets. Ces problèmes étant liés au découpage (arbitraire) des données sous forme d'images. Il faut cependant distinguer deux types d'objets, les objets oblongs qui filent sur plusieurs images et les objets ponctuels. L'une des idées a été de reconstruire une image intermédiaire assurant le recouvrement de la zone. Les caractéristiques du capteur d'acquisition des données font que les images

sont parfaitement contiguës les unes avec les autres. Donc pour créer les images de 50% de recouvrement lors d'un déplacement de gauche à droite, il nous suffit de prendre la moitié droite de la première image et de la concaténer à la moitié gauche de la suivante.

Lorsque nous réalisons la détection sur les images se chevauchant, on obtient le plus souvent deux détections pour un même objet. Les objets qui sont

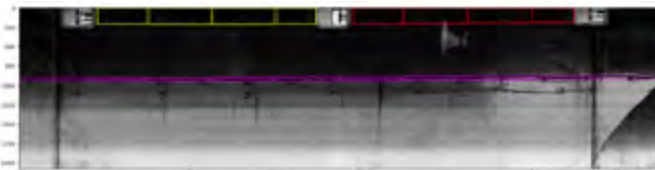


Fig. 4 : Résultat de la fusion de trois objets : câble (violet), passe-câble (rouge et

vert) détectés qu'une seule fois sont considérés comme des erreurs. Nous pouvons ensuite regrouper les détections d'un même objet (voir fig.4). Pour cela, nous passons les coordonnées de toutes les boîtes englobantes du référentiel image au référentiel tunnel. Puis nous calculons l'IoU (*Intersection over Union*) d'un objet avec tous les autres de la même classe et nous gardons la valeur la plus élevée. Ensuite, pour choisir la meilleure détection, deux cas s'ouvrent à nous. Si l'objet est linéaire, alors toutes les détections sont conservées. Si l'objet est ponctuel, seules les détections qui ont été réalisées le plus au centre de l'image sont conservées. Cette méthode permet donc de détecter les objets longs aussi bien que les objets ponctuels et de les regrouper.

Pour évaluer la fusion, la première étape est de calculer un masque binaire par objet à partir des boîtes englobantes du groupe, ainsi, nous pouvons faire une mise en correspondance entre la vérité terrain et la détection. Ensuite, deux possibilités s'ouvrent à nous. D'un côté, nous pouvons définir un seuil à partir duquel le recouvrement n'est pas suffisant pour dire que l'objet est bien fusionné. De l'autre, nous pouvons compter le nombre d'objets dans chaque groupe. La détection doit avoir, dans son groupe, deux fois plus d'objets moins un que la vérité terrain. Nous pouvons ainsi calculer les mêmes métriques que lors de l'évaluation sur une image. Ainsi, j'obtiens une précision de 87%, ce qui veut dire que les objets fusionnés le sont bien, cependant le rappel chute à 40% puisque le calcul ne prend pas en compte seulement les problèmes de fusion mais aussi les objets non trouvés par le détecteur donc dès qu'un objet n'est pas trouvé, le résultat est fortement impacté.

5. Conclusion et perspectives

Dans mon stage j'ai mis en œuvre et évalué une chaîne complète de détection d'équipement de tunnels. Pour cela, j'ai constitué une base de données annotée de 24 classes avec environ 400 images d'apprentissage. J'ai adapté pour la problématique du stage l'architecture Mask R-CNN dédiée à la segmentation d'instances, j'ai optimisé les hyperparamètres et j'ai évalué les performances sur une base de test. Les résultats sont plutôt encourageants malgré une base de données de petite taille. Puis, j'ai réalisé les premiers tests pour la fusion des objets afin d'obtenir des résultats non plus à l'échelle de l'image mais à l'échelle du tunnel afin d'aller vers une carte des équipements.

L'ouverture vers la fusion de modalité peut être intéressante afin d'ajouter la composante de profondeur à nos images et ainsi d'augmenter la performance de détection. Enfin, la modélisation de surface utilise encore des opérations manuelles qui pourraient être automatisées en exploitant la connaissance des équipements issue des développements du stage.

6. Références

- Barcet, F. (2021). Machine Learning pour le relevé d'équipements en Tunnel. Rapport de Projet de recherche technologique
- Campello, R. J. G. B., Moulavi, D., Zimek, A., and Sander, J. (2015). Hierarchical Density Estimates for Data Clustering, Visualization, and Outlier Detection. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 10(1):1–51.
- Foucher, P., Charbonnier, P., Noël, T., Fosse, Y., and Hébert, J.-F. (2019). Scanning tunnels with two very high-resolution laser devices and a stacker. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W18:39–46.
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., and Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. *arXiv:1311.2524 [cs]*. *arXiv:1311.2524*.
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., and Girshick, R. (2018). Mask R-CNN. *arXiv:1703.06870 [cs]*. *arXiv:1703.06870*.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., and Sun, J. (2016). Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *arXiv:1506.01497 [cs]*. *arXiv:1506.01497*
- Tual, M., Charbonnier, P., and Foucher, P. (2021). Robust B-spline surface estimation for tunnel lining modelling and equipment surveying. In *NSG2021 2nd Conference on Geophysics for Infrastructure Planning, Monitoring and BIM*, pages 1–5, Hybrid, France. European Association of Geoscientists & Engineers.

Creation of quality dashboard for geospatial data and services

PFE présenté par : **Camille Cossec**
Société d'accueil : **National Land Survey of Finland**
Directeur de PFE : **Antti Jakobsson**
Correcteur : **Mathieu Koehl**
Encadrant : **Antti Jakobsson**



1. Contexte de l'étude

Le monde est aujourd'hui confronté à de grands défis climatiques et environnementaux. Pour faire face à ces menaces globales et atteindre des objectifs climatiques, il est nécessaire de faire appel à des bases de données fiables provenant des secteurs public comme privé. Des systèmes d'information géographique (S.I.G.) facilitent l'analyse des conséquences sur l'environnement du changement climatique, de la perte d'habitats, de la croissance démographique et de la pollution.

Cependant, pour que des données géospatiales soient utilisables et pertinentes dans ce contexte, elles doivent être complètes et répondre à des normes de qualité.

Depuis 2020, la National Land Survey of Finland — *Maanmittauslaitos* en finnois — coordonne le projet GeoE3 — *Geospatially Enabled Ecosystem for Europe* — qui implique cinq pays partenaires en Europe : l'Espagne, les Pays-Bas, l'Estonie, la Norvège et la Finlande. Ce projet a pour but de développer une plateforme d'intégration de données (fig. 1) pour des ensembles de données et services de grande valeur, comme des données météorologiques et statistiques, ainsi que pour des entités à caractère géospatial provenant de plateformes nationales, telles que des données de bâtiments ou de réseaux routiers.

Aussi, l'objectif de ce projet d'échelle européenne est d'exploiter les données géospatiales et plateformes spécifiques à chaque pays européen afin de développer un écosystème de services, basé sur le Cloud, auquel sont intégrés des jeux de données géospatiaux et services manipulant des données géospatiales. Il s'inscrit dans le cadre de l'Open Data Initiative du D.S.I. – *Data Science Institute*. À terme, cet écosystème permettra l'intégration dynamique, en temps réel, de données et services afin de faciliter l'accès, l'analyse, la compréhension et la visualisation de ces informations pour le grand public.

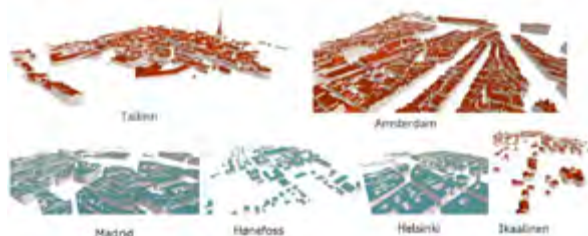


Fig. 1 : Exemple de la plateforme d'intégration de données développée pour le projet GeoE3 [1].

Les bâtiments en rouge ont un niveau de détail 2 (LoD2) ; ceux en bleu un niveau 1 (LoD1) et ont été générés en temps réel par la plateforme en utilisant des données de hauteur de bâtiments ou des modèles numériques de surface (MNS).

[1] A. Jakobsson, « GeoE3 publishes the first Data Integration Platform, connecting national, regional, and cross-border digital services », GeoE3, 27 juin 2022. <https://geo3.eu/geo3-publishes-the-first-data-integration-platform-connecting-national-regional-and-cross-border-digital-services/> (consulté le 28 juin 2022).

2. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, au sein du projet GeoE3, il a été jugé pertinent d'ordonner la création d'un tableau de bord — un *dashboard* — qui pourra être utilisé afin de mettre en avant la qualité d'ensembles de données — *data sets* — et de rendre plus compréhensibles les métadonnées de ces ensembles de données impliqués dans des cas d'utilisation préalablement définis. Ce tableau de bord doit alors rendre compte visuellement de l'évaluation de la qualité des données et métadonnées de manière à être à la portée d'utilisateurs non-initiés à ce type de données, tout en affichant une densité d'informations suffisamment techniques et complètes pour être utile à des experts en données géospatiales.

Le projet GeoE3 est développé à travers trois cas d'utilisation pertinents liés au changement climatique et à l'urbanisation (Jakobsson et al., 2020) :

- Le premier cas d'utilisation se concentre sur l'étude du potentiel d'énergie solaire et de l'efficacité énergétique des bâtiments dans le changement climatique et les villes intelligentes. Par exemple, y est incluse l'étude des crues et du potentiel des panneaux solaires grâce à des données 3D de bâtiments.
- Le deuxième cas d'utilisation étudie des systèmes de transport intelligents coopératifs (STI-C) et systèmes d'aide à la conduite menant à la conduite automatisée (ADASIS). Les données issues du trafic en voiture électrique sont utilisées afin de calculer leur consommation énergétique.
- L'objectif du troisième cas est de fournir des données et des API pour aider à la création de solutions pour les villes intelligentes (« *smart cities* ») en examinant l'utilisation de ressources en énergie renouvelable à Helsinki (Finlande) et Tallinn (Estonie).

L'objectif de notre étude est de produire un quality dashboard évaluant la qualité d'ensembles de données pour le projet GeoE3 sous forme de pilote qui rend compte des exigences des utilisateurs du cas d'utilisation n°1. Pour cela, nous avons établi un protocole en décomposant ce processus en plusieurs étapes :

- Identification des exigences des utilisateurs d'un tel produit pour le cas d'utilisation considéré ;
- Identification des fonctionnalités nécessaires au dashboard ;
- Sélection d'une plateforme dédiée pour le développement d'un pilote de quality dashboard ;
- Identification des types de données évaluées sur la version pilote ;
- Identification des indicateurs permettant la mesure de la qualité des données et métadonnées ;
- Mise en place de la version pilote du dashboard ;
- Evaluation de la version pilote du dashboard par des utilisateurs.

3. Etude préalable à la conception du dashboard

Une fiche produit relative à la création d'un quality dashboard pour le projet GeoE3 a été établie antérieurement à la présente étude. Néanmoins, nous avons approfondi les détails de ce cahier des charges. Aussi, des utilisateurs potentiels ont été recherchés et contactés afin de pouvoir confronter nos résultats et analyses avec leurs besoins et exigences réels. Par ailleurs très enthousiastes à l'idée d'avoir un quality dashboard à disposition, ces professionnels travaillant dans le milieu de l'énergie solaire ont pu éclaircir certains des besoins déjà identifiés et mettre l'accent sur des fonctions qu'ils souhaiteraient voir apparaître dans un quality dashboard.

Entre autres, il a été relevé l'importance de la vulgarisation des données que nous manipulons sur le dashboard. Celles-ci devraient être compréhensibles par n'importe quel individu intéressé par un ensemble de données types. De plus, un intérêt dans l'évaluation de la qualité du processus de traitement des données a été relevé.

Ainsi, nous avons décidé d'insérer des niveaux d'information et de complexité progressifs au quality dashboard dans un but de vulgarisation de la signification de certains indicateurs.

4. Conception du quality dashboard

Sélection d'une plateforme dédiée pour le développement d'un pilote de quality dashboard

Notre état de l'art montre que les tableaux de bord géospatiaux sont généralement dédiés à l'analyse de données elles-mêmes plutôt qu'à la qualité des métadonnées ; ils sont par ailleurs développés directement sur le web, sans plateforme intermédiaire. Ici, le choix a été fait d'utiliser une solution « prête à l'emploi ». Nous avons identifié les logiciels supportant la création de dashboard, puis établi un comparatif prenant en compte nos exigences et préférences. Le logiciel choisi pour supporter la version pilote du dashboard de cette étude est Microsoft Power BI.

Etude de la norme ISO 19157-1

Identifier les indicateurs de qualité est essentiel si l'on souhaite évaluer la qualité d'un ensemble de données car ils permettent de décrire précisément les aspects de la qualité des données géospatiales (fig. 2). Une partie de ces indicateurs est décrite de manière conceptuelle dans la norme ISO 19157-1, que nous avons étudiée.

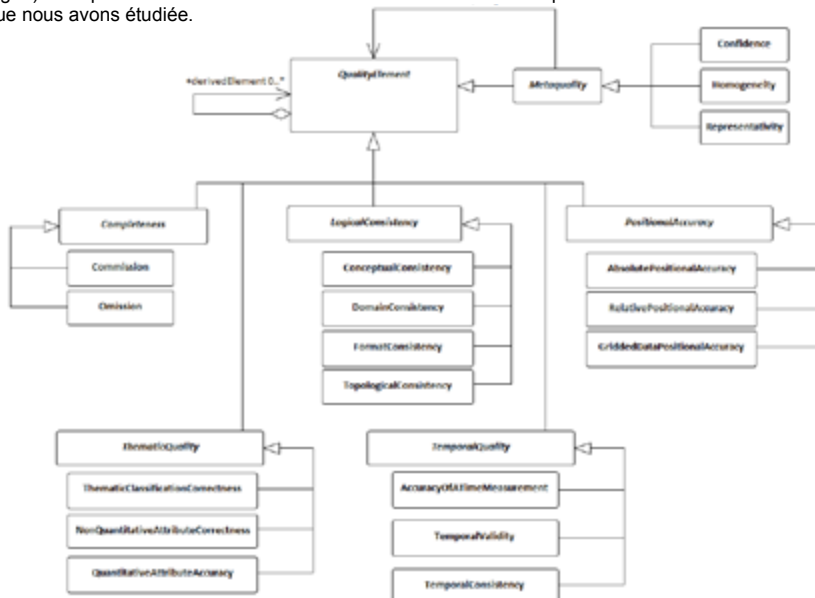


Fig. 2 : Aperçu des éléments composant la qualité des données (ISO 19157-1)

Version pilote

Trois points de vue principaux ont été identifiés et divisent le quality dashboard :

- Le point de vue utilisateur, qui affiche des indicateurs relatifs à la qualité de la description du jeu de données, sa pertinence par rapport au cas d'utilisation et sa fiabilité.
- Le point de vue concernant les services et le jeu de données, consacré aux indicateurs présents sur la figure 2.
- Le point de vue s'intéressant à l'interopérabilité, qui affiche des indicateurs relatifs notamment à la compréhension, la portabilité, la sécurité de l'information et l'accès.

Une première version du tableau de bord a été réalisée en fonction des retours des utilisateurs (fig. 3). Une page d'accueil sommaire affiche les principales catégories d'indicateurs de qualité. Dans le but d'afficher un score pour chacune, des poids sont attribués aux indicateurs mesurés ; à terme, ces poids pourront être modifiés en temps réel par l'utilisateur afin de lui permettre d'accéder à une analyse au plus proche de ses besoins. Les différents paramètres intervenant dans ces grandes catégories sont accessibles en interagissant avec le tableau de bord.



Fig. 3 : Extrait de l'interface de la version pilote du quality dashboard – page Service & Dataset view (version de juin 2022)

Cette étude sera complétée par une dernière évaluation du pilote du quality dashboard en fonction des disponibilités des utilisateurs contactés.

5. Conclusion et perspectives

Une partie importante de ce projet a été consacrée à l'identification des indicateurs de qualité de jeux de données, notamment à travers l'étude de plusieurs normes ISO. Une fois ces indicateurs identifiés, il est impératif de définir la manière dont nous voulons non seulement les mesurer, mais également les visualiser, puisque cela peut avoir un très grand impact sur l'interprétation qu'en aura l'utilisateur et donc l'usage qu'il en fera.

Travailler sur l'analyse et la représentation de la qualité de jeux de données permet de souligner le fait que l'inclusion dans les métadonnées de certaines informations est essentielle pour l'utilisateur des données. Sans ces informations, les données peuvent se révéler impossibles à utiliser pour un utilisateur dont le travail doit répondre à certaines normes de qualité puisqu'il ne peut alors pas les vérifier. Aussi, cette étude a permis de révéler que peu de producteurs et fournisseurs de données géospatiales mettent à disposition suffisamment d'informations dans les métadonnées des jeux de données. Puisque ces informations ne peuvent pas toujours être déduites directement des données, une solution pourrait consister à transmettre à ces acteurs un cahier des charges relatif à ces métadonnées.

A son terme, cette étude aura permis la production d'un pilote de tableau de bord dédié à l'évaluation de la qualité de jeux de données répondant au cahier des charges établi dans le contexte du projet GeoE3 et du cas d'utilisation numéro 1. Pour satisfaire pleinement le cahier des charges du projet, deux pistes seront à explorer. En premier lieu, le pilote développé par notre étude devra être implémenté et intégré aux plateformes déjà développées lors du projet de manière à proposer ses fonctionnalités en parallèle de celles qui sont ou seront disponibles (cf. fig.1). Par ailleurs, il faudra de plus identifier la manière la plus adéquate d'adapter le quality dashboard aux deux autres cas d'utilisation définis dans le projet. Pour cela, certaines des étapes de cette étude devront être en partie reproduites (l'identification des besoins des utilisateurs, l'identification de nouveaux indicateurs éventuellement spécifiques à ces cas d'utilisation ainsi que l'évaluation du dashboard par l'utilisateur).

Cette étude, marquée par la quête prometteuse de l'open data, cherche à démocratiser l'utilisation de bases de données en facilitant leur accès et leur compréhension par le grand public et les professionnels. Ainsi, ce sont ces acteurs qui pourront, à leur tour, participer à un impact sur les défis climatiques et environnementaux auxquels le monde fait face aujourd'hui.

Le mémoire correspondant à ce résumé est disponible en langue anglaise.

Création d'un outil d'analyse de données linéaires appliquées au guidage 3D.

PFE présenté par :

Lucas RYCKEBOER

Société d'accueil :

2AGE Conseils

Directeurs de PFE :

Bastien LAMBERT, Pierre HUGON

Correcteurs :

Mathieu KOEHL, Gilbert FERHAT



1. Introduction

1.1 – Contexte

Lors de la création ou de la rénovation de routes, d'autoroutes ou de pistes et voies de circulation aéroportuaires, de nombreuses normes de conception géométrique doivent être respectées. Ces normes sont référencées dans des ouvrages et documents techniques qui sont régulièrement mis à jour. Ainsi des éléments comme les pentes en profil en long, les pentes en profil en travers ou encore les rayons de raccordement font l'objet d'une attention particulière car ils sont essentiels à la sécurité des utilisateurs.

Les projeteurs des entreprises en charge des chantiers doivent créer leur projet en respectant l'ensemble des normes applicables. En raison des enjeux, certaines entreprises de TP font appel à 2AGE Conseils afin de réaliser le guidage des engins de chantier en 3D et ainsi réaliser les travaux avec une plus grande fiabilité et une plus grande précision.

Dans le cadre d'un chantier de guidage 3D d'engin tels que des raboteuses, des finisseurs ou encore des machines à coffrage glissant, une des conditions de bon fonctionnement de la méthode est la justesse des projets. Ces projets, généralement reçus par le cabinet sous forme de modèle numérique de terrain (MNT), doivent parfaitement correspondre aux exigences du client et aux normes de conception applicables. En effet, ces règles sont essentielles pour éviter les problèmes d'écoulement des eaux de pluie, d'adhérence, de visibilité ou encore de malformation de la chaussée.



Figure 1 : Illustration de malformation de chaussée

Ainsi avant toute mission de guidage, un contrôle du projet est effectué par Bastien LAMBERT, un des gérants de 2AGE Conseils. Ce contrôle, effectué à l'expérience et au jugé, permet de repérer une grande partie des incohérences. Néanmoins, il n'est pas infaillible et représente une charge de travail très volumineuse pour la société.

1.2 – Objectifs recherchés

L'objectif de ce projet de fin d'études est de faire gagner du temps à Bastien LAMBERT et à 2AGE Conseils en permettant l'analyse rapide, standardisée et automatisée des projets reçus dans le cadre de chantiers de guidage 3D.

A partir de polygones 3D issues des modèles numériques de terrain des différents types de chaussée, la démarche devra analyser les valeurs de pentes, de rayons et de distances afin de fournir un rapport listant les incohérences présentes sur le projet.

C'est donc principalement sous la forme d'un logiciel programmé en Python que sera réalisée l'analyse.

2. Acquisition des données

2.1 – Normes et réglementations

Avant tout début de développement, la première étape fut de rechercher et de référencer l'ensemble des réglementations relatives à la conception de chaussées routières, autoroutières et aéroportuaires.

Au sein de plusieurs ouvrages édités par le Cerema, se trouve l'ensemble des normes de conception routières et autoroutières. Les normes de conceptions pour les chaussées aéroportuaires quant à elles sont référencées dans un document international réalisé par l'European Union Aviation Safety Agency (EASA).

Ces documents techniques nous apprennent que les normes en fonction de la catégorie de chaussée. En chaussée aéroportuaire, les normes varient en fonction de la catégorie (I, II, III en fonction des installations dont dispose la piste), la longueur (code 1, 2, 3 ou 4 en fonction de la longueur) et la largeur de la piste (code A, B, C, D, E ou F en fonction de la largeur). Alors qu'en chaussée routière et autoroutière, les normes varient en fonction de la limitation de vitesse visée, du relief environnant et de la catégorie de route.

Malgré ces différences, les éléments normés sont en grande partie semblables ce qui facilitera la programmation de notre logiciel par la suite.

	Pente en long	Pente en long 1er et dernier quart	Pente en long moyenne	Rayon de courbure	Pente en travers	Variation de pente en travers	Distance entre deux pentes différentes	Variation entre deux pentes successives	Rayon de courbure en angle saillant	Rayon de courbure en angle rentrant	Symétrie
Chaussée autoroutière	X			X	X		X		X	X	X
Chaussée routière	X			X	X		X		X	X	X
Piste aéroportuaire	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Taxiway aéroportuaire	X			X	X			X			X

Figure 2 : Type de normes applicables à chaque type de chaussée

2.2 – Recollement de guidage 3D

Afin de comprendre au mieux les attentes de l'entreprise, il m'a été offert de participer à un chantier de guidage 3D sur la piste de l'aéroport de Guadeloupe. Le guidage 3D consiste à mesurer en continu la position de l'engin par rapport à la surface du projet. La position mesurée permet alors d'indiquer à la machine la pente et la profondeur à creuser pour les raboteuses ou la pente et l'épaisseur d'enrobé à appliquer pour les finisseurs.

Ma présence sur le chantier a également permis d'effectuer un relevé des surfaces issues du rabotage en guidage 3D. Ainsi, ces points, levés à l'aide d'un TS16 de chez Leica, serviront à créer un MNT de la surface appliquée qui pourra être étudiée de la même manière qu'un MNT projet. Bien que créé afin de contrôler les projets, il semble intéressant de vérifier si le recollement de

chaussée peut également être analysé par le programme et sinon quelles peuvent être les solutions le permettant. Cela sera étudié lors de la période de test lorsque le logiciel sera pleinement opérationnel. Durant cette période, j'ai pu interagir avec les chefs de chantier pour mieux cerner les enjeux économiques et sécuritaires du bon respect de toutes ces règles de conception et ainsi comprendre l'utilisation du guidage 3D.

3. Développement de l'outil d'analyse

3.1 – Structuration du logiciel

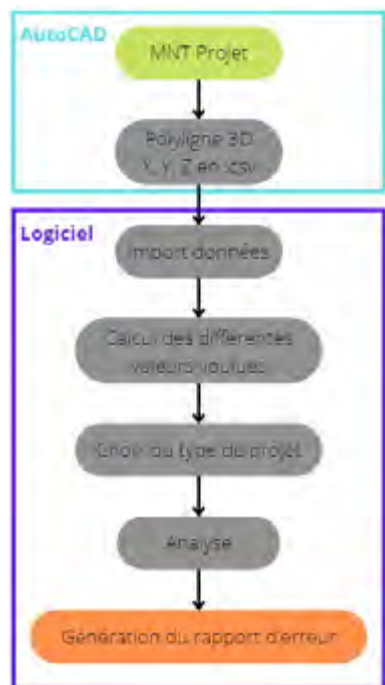


Figure 3 : Schéma de la démarche d'analyse

Réalisé sous l'environnement de développement Spyder IDE, le programme se compose de quatre grandes parties.

La première partie constitue l'importation des valeurs x, y et z des polygones depuis le fichier .csv. La difficulté de cette partie était de différencier chacune des polygones afin de les traiter séparément dans un premier temps, puis une à une dans un second temps. Les valeurs ont donc été organisées sous forme d'imbrication de listes qui seront par la suite utilisées dans de multiples calculs.

La seconde partie représente l'ensemble des calculs effectués sur les coordonnées x, y et z des sommets de nos polygones. A ces données, sont ajoutées des valeurs de pente en long, de rayon de courbure calculé en trois points, de point kilométrique dans le projet, de gisement, de pente en travers, etc. Ces valeurs seront utilisées dans la troisième partie du programme : l'analyse.

Cette troisième partie met en relation les valeurs calculées avec les différentes normes applicables au projet étudié. Chaque valeur est confrontée à la norme qu'elle doit respecter. En cas d'incohérence, le

A partir du projet sous forme de modèle numérique de terrain, une démarche permettant de créer des polygones 3D et d'en extraire les valeurs x, y et z de leurs sommets, sous la forme d'un fichier .csv, a été mise en place.

Notre logiciel doit pouvoir importer le fichier créé, en lire les données et les extraire pour réaliser les différents calculs nécessaires à l'analyse.

Une fois les calculs réalisés, le choix du type de projet permettra à l'utilisateur d'entrer les informations propres à chaque type de projet. Ces nouvelles données seront ensuite utilisées lors de la définition des normes applicables au projet traité.

Une fois l'analyse terminée, un rapport au format .pdf pourra être généré.

3.2 – Programmation

La première étape de la programmation a été de créer une commande en langage Visual LISP permettant de générer un fichier .csv standardisé depuis AutoCAD. Ce fichier sera le seul à être utilisable au sein de notre logiciel.

Initialement, le logiciel était développé sous Excel en langage VBA. Néanmoins, ce format empêchait tout futur développement du logiciel vers d'autres fonctionnalités et besoins. Le choix a donc été fait de développer le logiciel sous le langage Python. Un langage beaucoup plus puissant et laissant la possibilité d'ajouter de nouvelles fonctionnalités par la suite.

point problématique est intégré à une liste propre à chaque type d'erreur. Ces listes d'erreurs sont ensuite réutilisées dans la dernière partie du programme. Cette dernière partie est la réalisation d'un rapport qui pourra être envoyé au client pour lui faire part de l'ensemble des erreurs détectées au sein du projet reçu. Ces rapports en .pdf sont composés d'une liste des erreurs classées par catégories, mais également de graphiques illustrant les erreurs et leur position dans le projet.

3.3 – Interface utilisateur

Afin de rendre le logiciel utilisable, une interface utilisateur a été réalisée à l'aide de la bibliothèque Python PyQt5 et son outil de création QtDesigner. Ces différents outils ont permis de réaliser de multiples fenêtres permettant une utilisation simple et rapide par l'utilisateur. En effet l'utilisation de boutons, de zones de texte ou encore de menus déroulants rend l'utilisation du logiciel très semblable à d'autres déjà existants. L'ajout de fonctionnalité comme un mot de passe d'authentification ou encore des fenêtres d'aide ont également pu être ajoutés.

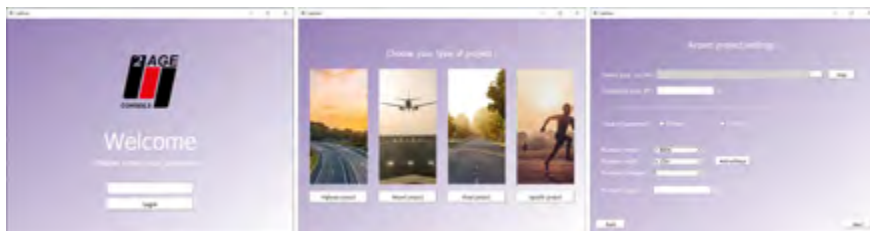


Figure 4 : Interface utilisateur du logiciel

4. Mise en service

A la fin de ce PFE, le logiciel devra être capable de traiter les différents projets type qui lui seront proposés. Ces projets seront choisis pour les erreurs qu'ils contiennent par Bastien LAMBERT. Le résultat fourni sera comparé à son analyse poussée afin d'en déduire si le travail a été fait correctement ou si des perfectionnements sont encore possibles. Ces tests seront également une opportunité d'étudier le comportement du logiciel face à une grande quantité de données et d'y répondre en conséquence.

Le logiciel sera également confronté aux données récoltées sur le chantier guadeloupéen afin de savoir s'il est également utilisable sur des données issues de recollement. Si des problèmes sont rencontrés, il faudra étudier la situation pour essayer d'y trouver des solutions.

Utilisant une programmation python et de nombreuses bibliothèques python, une notice d'installation devra être fournie avec le logiciel pour permettre la bonne utilisation de celui-ci.

5. Conclusion et perspective

Ce projet de fin d'études aura permis la création d'un outil d'analyse permettant à la société 2AGE Conseils de progresser dans sa manière de traiter les données liées au chantier de guidage 3D et de standardiser sa démarche.

L'automatisation de calculs simples et la quantité de temps qui peut être gagnée sont des enjeux trop souvent sous-estimés par les petites et moyennes entreprises. L'ampleur des possibilités offertes par le langage Python représente une source de progrès facilement accessible. On peut donc entre ouvrir la porte à l'ajout de nouvelles fonctionnalités à ce premier logiciel afin d'aider encore plus l'entreprise dans ses diverses tâches.

Utilisation de l'apprentissage profond pour la détection d'artefacts archéologiques dans des données LiDAR.

PFE présenté par : **Raphaël Moreau**
Société d'accueil : **Archéologie Alsace**
Directeur de PFE : **Fuchs Mathieu**
Correctrice : **Landes Tania**
Correcteur : **Koehl Mathieu**
Encadrant : **Basoge Florian**



1. Contexte et introduction

Depuis quelques années, le développement rapide de la technologie LiDAR a apporté de nombreuses innovations au domaine de la topographie. Parmi les conséquences de ce changement, la donnée sous forme de nuage de points est devenue de plus en plus accessible et fréquente. Un exemple de ce changement est la campagne de mesures LiDAR HD entreprise par l'IGN qui a pour but de créer une cartographie 3D de l'ensemble du territoire français d'ici à 2026 (@IGN, 2022).

Pour Archéologie Alsace, qui est capable d'utiliser ces données pour détecter des artefacts archéologiques, cette source de données libres est une aubaine. Un artefact archéologique est un objet ou un élément du paysage qui a été modifié ou créé par l'homme. Un champ antique rentre dans cette catégorie, au même titre que les ruines de Pompéi ou encore un couteau en obsidienne trouvé dans une fouille. C'est également sur la base de ces artefacts que les archéologues construisent leurs hypothèses concernant l'histoire connue. Et si les artefacts les plus petits ne sont pas visibles dans des nuages de points LiDAR, les plus grands, comme les champs, le sont.

Toutefois, le processus est aujourd'hui entièrement manuel : il n'existe aucun outil sur le marché capable de détecter des artefacts archéologiques dans des nuages de points. Or, la quantité de données qui va être produite par l'IGN est trop importante pour qu'un opérateur puisse se charger de l'exploiter. Cela a donc mené à la création de ce PFE (Projet de Fin d'Etudes), dont le but est d'automatiser la détection d'artefacts archéologiques dans des nuages de points LiDAR.

Ce PFE fait suite à un PRT (Projet de Recherche Technologique) dont le sujet était de savoir si l'apprentissage profond (*Deep Learning*, en anglais) était pertinent pour répondre à cette problématique. La réponse est positive, l'apprentissage profond est adapté à la détection d'objets dans un nuage de points. Par conséquent, le sujet du projet fut créé en ce sens : "Utilisation de l'apprentissage profond pour la détection des artefacts archéologiques dans des données LiDAR"

2. Artefacts considérés

Pour cette étude, le choix de l'artefact avec lequel expérimenter s'est porté sur les tumulus présents dans les forêts alsaciennes. Un tumulus est un monticule de terre recouvrant une sépulture, datant généralement de 2 000 à 4 000 ans (et donc construit dans les 2 000 années précédant l'an 0). Seule la partie monticule est visible sur les levés LiDAR, mais celle-ci est suffisante pour être détectée. Un monticule de tumulus peut mesurer de 10 à 40 mètres de diamètre pour une hauteur comprise entre 0.5 et 5 mètres.



Fig.1 : Exemple de Tumulus. Source : wildaboutdenmark.com

Le choix de l'objet d'étude a été fait pour plusieurs raisons, les deux principales étant le nombre de tumulus disponibles en Alsace et dans la forêt de Haguenau (qui a été notre site d'étude tout au long du projet) et les caractéristiques géométriques particulières de ces artefacts. Le premier a permis d'entraîner un réseau d'apprentissage profond en utilisant seulement les éléments détectés sur la forêt de Haguenau, sans avoir à recourir à l'augmentation de données (la création artificielle de données d'entraînement), tandis que le second a permis de valider les résultats sans avoir besoin de la validation d'un expert pour l'ensemble des tumulus détectés.

Dans un second temps, le processus de détection pourra être adapté et élargi pour couvrir d'autres types d'artefacts. Les tumulus sont, pour le moment, les seuls artefacts considérés afin de simplifier le développement de l'algorithme et de réaliser une démarche scientifique complète. De plus, les bases de données recensant les autres types d'artefacts n'ont pas encore été créées.

3. L'apprentissage profond

L'apprentissage profond (*Deep Learning*, en anglais) est une sous-catégorie de l'apprentissage machine (*Machine Learning*, en anglais), elle-même une sous-catégorie de l'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence*, en anglais).

L'intelligence artificielle est définie comme l'ensemble des systèmes, machines et méthodes mis en place dans le but d'imiter l'intelligence humaine. Elle trouve des applications dans de nombreux domaines, comme la finance, la logistique et l'informatique. La communauté scientifique s'accorde pour faire commencer l'histoire de l'intelligence artificielle moderne avec les travaux d'Alan Turing en 1950 et son article « Computing Machinery and Intelligence » (Mind, 1950).

L'apprentissage machine est une sous-catégorie de l'intelligence artificielle qui concerne l'ensemble des algorithmes capables d'apprendre par eux-mêmes. Cela peut prendre plusieurs formes, la plus commune étant un algorithme entraîné sur des données. Par exemple, un "chatbot" (un automate de réponse en ligne) utilise ce type d'algorithmes.

Enfin, l'apprentissage profond est la sous-catégorie qui contient l'ensemble des algorithmes fonctionnant avec des réseaux de neurones ou tentant d'imiter la manière de fonctionner d'un cerveau humain.

Un réseau de neurones est un ensemble de neurones organisés en couches successives, comme montré dans la figure 2. Cette organisation permet à un réseau de neurones, en supposant que celui-ci dispose d'assez de neurones, d'approximer n'importe quelle fonction. (@Alom et al, 2019)

Le réseau est constitué de trois composantes : la couche d'entrée, la couche de sortie et les couches cachées. La couche d'entrée sert à transformer l'entrée de la fonction (qui peut être une image, un vecteur ou toute autre forme de données) en valeurs numériques interprétables par le réseau. La couche de sortie va avoir l'effet inverse, c'est-à-dire transformer les valeurs numériques en informations interprétables par l'utilisateur. Enfin, les couches cachées servent à transformer l'information d'entrée vers l'information de sortie. Le nom de ce type de réseau est "Réseau Complètement Connecté" ou "Réseaux de Neurones Denses".

Ce type de réseau est, historiquement, le premier. Toutefois, des modèles plus optimisés pour le traitement des images sont aujourd'hui disponibles, tel que le réseau de neurones

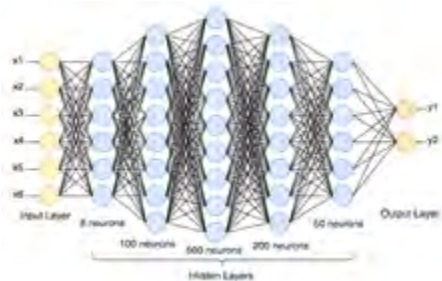


Fig.2 : un réseau de neurones simple.

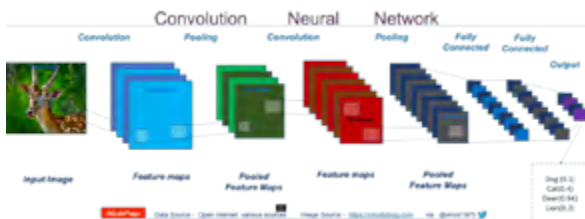


Fig.3 : Schéma d'un CNN (réseau de neurone convolutif).

Source : <https://vinodsblog.com>

convolutif, qui est utilisé pour ce projet.

Ce second type de réseau est plus récent que le premier et fonctionne de manière similaire : le principe est de transformer l'information pour la traiter dans un réseau de neurones dense.

Dans le cas du réseau de neurones convolutif (*Convolutionnal Neural Network* en anglais, ou CNN), l'entrée est généralement une image sur laquelle va être appliqué un "kernel" (un noyau) qui va, pour chaque position possible (soit l'ensemble des pixels à l'exception des colonnes et lignes de bords) créer un nouveau pixel. Cette étape, appelée convolution, va ainsi créer une nouvelle image à partir de l'image d'origine. Une fois la convolution effectuée, une étape de "pooling" (mise en commun en français) est effectuée, c'est-à-dire une réduction de la dimension de l'image créée par l'étape de convolution. Cette réduction de dimensions se fait en regroupant les pixels par 4 (matrice de 2 par 2) et en attribuant à ce nouveau pixel une valeur issue des pixels sources (maximum ou moyenne). À la fin de cette étape, l'image a donc eu ses dimensions divisées par deux. Pour chaque image d'entrée à l'étape, plusieurs images sont créées par convolution et toutes voient leur dimension réduite par "mise en commun".

Cette étape est répétée plusieurs fois, afin d'obtenir plusieurs images de faible dimension dont les valeurs de pixels sont assimilables à un vecteur, qui est alors utilisé comme entrée dans la seconde partie du réseau, une partie complètement connectée.

Pour l'utilisation de l'apprentissage profond dans ce PFE, le modèle de CNN qui est utilisé est retinane, qui fonctionne légèrement différemment de ce qui est expliqué avant, même si le principe est le même.

Dans le cas de l'entraînement et de l'utilisation de ces modèles, le principe est d'entraîner un détecteur sur un ensemble de données (appelées données d'entraînement) par un processus itératif empirique. L'ensemble des données d'entraînement sont passées dans le modèle (qui est initialisé avec des valeurs aléatoires) et le résultat est comparé au résultat théorique. Le modèle est ensuite mis à jour en fonction de la différence constatée jusqu'à ce que l'amélioration du modèle ne soit plus perceptible ou passe en dessous d'un seuil défini.

Quelque chose à savoir est que l'entraînement d'un modèle est soumis au hasard : deux modèles entraînés sur la même base et avec les mêmes données d'entraînement ne seront pas les mêmes, ce qui amène à devoir multiplier des entraînements pour obtenir des "séries d'entraînements", ce qui permet de réaliser des statistiques sur ces séries (moyennes, écart-type) qui caractérisent l'entraînement.

4. Entraînement du modèle de détection

Comme présenté plus haut, l'entraînement d'un modèle de détection passe par la création de données d'entraînement. Le but du projet étant de détecter les tumulus, ce travail a donc été réalisé à la main dans le nuage de points de la forêt de Haguenau issue de son obtention du label "Forêt d'exception" afin de pointer environ 400 entités sur les 200 km² composant la forêt. Une fois ces données converties dans un format utilisable, plusieurs modèles ont été entraînés sur ces données d'entraînement. Parmi ces modèles, ceux présentant la meilleure précision (il s'agit de la métrique utilisée, c'est une indication du taux de détection du modèle sur les données d'entraînement) ont été sélectionnés et comparés les uns aux autres lors de tests dits "d'inférence" (des tests sur des données réelles, vérifiées à la main) afin de ne garder que le modèle qui répond le mieux à notre problématique.

5. Méthode et Algorithme de détection

Dans un premier temps, il avait été évoqué la possibilité de travailler exclusivement dans des nuages de points. Toutefois, cette idée s'est avérée inappropriée à cause de la nature des tumulus : étant un monticule de terre, les tumulus sont trop semblables au sol pour être détectés de manière correcte. Dans les premiers tests effectués, tous les éléments présentant une forme convexe dans le nuage de points étaient détectés comme des tumulus. Par conséquent, la détection est désormais effectuée

dans des images issues de ces nuages, dans lesquelles les tumulus sont plus facilement distinguables.

L'idée est de profiter de l'information XYZ formée par la donnée LiDAR en la convertissant en "ortho-images" et d'utiliser ces images comme base pour la détection (@Guyot et al, 2021). Ainsi, les points caractérisant le sol sont extraits du nuage de point et sont transformés en carte d'altitude, carte de pente et en quatre cartes d'ombrages. Une fois cette étape réalisée, l'ensemble des images est assemblé en une unique image multi-canaux, qui est alors utilisée en entrée au modèle d'apprentissage profond pour la détection des tumulus.

Le modèle de détection par apprentissage profond donne, comme résultat, une couche d'entités ponctuelles représentant les tumulus qui ont été détectés, avec la probabilité (selon le modèle de détection) que l'objet soit, sur le terrain, un tumulus. En effet, le modèle pourra produire des entités ponctuelles ne représentant pas obligatoirement des tumulus. Afin de mitiger des résultats "faux positif", une étape de post-traitement a été créée. Quand le modèle de détection par apprentissage profond s'appuie principalement sur la géométrie des objets, cette étape de post traitement s'appuie sur les connaissances que nous avons concernant la manière dont ont été construits les tumulus, issues des recherches archéologiques qui ont été effectuées. Cette étape prend pour base la valeur de détection (probabilité) fournie par le modèle de détection et module cette valeur en fonction d'un certain nombre de règles afin d'obtenir un score de détection. Par exemple, il est connu des archéologues que les tumulus sont construits en grappe. L'étape de post-traitement accordera donc aux éléments détectés faisant partie d'un groupe local un score de détection plus important que celui accordé aux artefacts isolés.

La figure 4 présente la chaîne de traitement mise en place pour détecter les tumulus dans un nuage de points. La première étape, l'extraction du sol dans les nuages de points est faite sous Cloud Compare, tandis que l'ensemble des étapes suivantes sont effectuées sous ArcGIS Pro, qui inclut un module d'apprentissage profond.

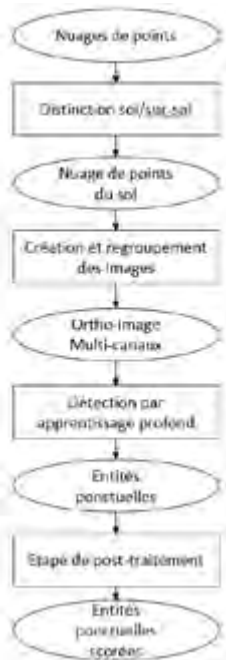


Fig.4 : Schéma de la chaîne de traitement mise en place

Après les premiers entraînements, le réseau entraîné atteint une précision de 67%. Cette valeur devrait pouvoir être augmentée en augmentant le nombre d'éléments utilisés pour l'entraînement, par exemple en détectant et en ajoutant les tumulus de la forêt de la Hardt à l'entraînement du modèle.

6. Conclusion et perspectives

Pour résumé, la détection automatique d'artefacts archéologique passe, dans un premier temps, par la conversion du nuage de points en images, qui sont utilisées par un modèle de détection par apprentissage profond pour identifier les artefacts.

Toutefois, les subtilités liées à l'entraînement des modèles de détection par apprentissage profond sont un sujet complexe, qui mériterait d'être approfondi. Enfin, ce PFE se concentre sur les tumulus afin de prouver l'efficacité de ce type de traitement. L'extension à d'autres artefacts sera possible dans le futur.

Références :

- (@IGN, 2022) : Site de l'IGN : <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>, consulté en 2022
- (@Alom et Al, 2019) : Alom, M.Z., Taha, T.M., Yakopcic, C., Westberg, S., Sidike, P., Nasrin, M.S., Hasan, M., Van Essen, B.C., Awwal, A.A.S. and Asari, V.K. (2019) 'A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures', *Electronics*, 8(3), p. 292. Doi:10.3390/electronics8030292.
- (@Guyot et al, 2021) : Guyot, A., Lennon, M., Lorho, T. and Hubert-Moy, L. (2021) 'Combined Detection and Segmentation of Archeological Structures from LiDAR Data Using a Deep Learning Approach', *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 4(1), p. 1. doi:10.5334/jcaa.64.

Evaluation de solutions de métrologie sans contact basées sur la génération d'un nuage de points 3D en temps réel pour le suivi d'infrastructures sous-marines.

PFE présenté par : Alice Noyez
Société d'accueil : TotalEnergies
Directeur de PFE : Frederic Auger
Correcteur : Pierre Grussenmeyer



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le thème principal de cette étude est la métrologie sous-marine dans le milieu de la production d'hydrocarbures. Les métrologies consistent en des séries de mesures effectuées au fond de l'eau sur les infrastructures sous-marines et ce qui les entoure. Il existe déjà plusieurs solutions bien maîtrisées pour réaliser des métrologies sous-marines. Toutes les méthodes existantes nécessitent d'installer des équipements sur les structures étudiées. Or cette manipulation demande du temps, qui est un facteur clé dans le milieu d'exploitation d'hydrocarbures offshore. Une idée pour réduire la durée des mesures est de créer des solutions «sans contact». C'est-à-dire de travailler avec des appareils qui n'ont pas besoin de point de contact avec les structures pour mesurer les valeurs demandées lors d'une métrologie. De plus, cela offrirait également la possibilité de travailler sur des champs encombrés.

Les entreprises *VAARST* et *ZUPT* ont toutes deux mis au point des systèmes destinés à répondre à cette problématique. Leurs solutions associent un algorithme *SLAM* (*Simultaneous Localization And Mapping*) à la stéréovision afin de créer un nuage de points en temps réel. Lors du post traitement, un nuage de point dense est obtenu puis texturé et les mesures demandées en sont directement extraites. Cependant, les méthodes que ces entreprises proposent sont nouvelles dans ce domaine et n'ont été que peu testées.

Le but de cette étude est de déterminer si ces solutions sont envisageables pour réaliser des métrologies sous-marines. Il s'agit d'abord de définir si les systèmes permettent de mesurer les éléments demandés ou non. Par la suite, quatre critères pourront servir à évaluer les solutions proposées :

- Leur efficacité opérationnelle, c'est-à-dire le temps de mesure comparé aux méthodes usuelles.
- Leur précision : est-ce que la précision des mesures correspond aux attentes de *TotalEnergies*?
- Leur praticité : quelle est la facilité d'utilisation des systèmes ?
- Leur maturité : est-ce que les solutions sont fiables et s'adaptent à différents environnements ou configurations ?

2. Métrologies sous-marines

Au sein d'un champ de production d'hydrocarbures, différentes infrastructures sont placées au fond de l'eau. Elles sont reliées entre elles grâce à des conduites, connectées aux structures via des *hubs*. Comme ces conduites sont rigides, elles ne peuvent pas s'adapter à leur environnement. En effet, elles doivent être construites spécifiquement pour les structures à relier afin de pouvoir se brancher correctement aux connecteurs et qu'il n'y ait pas de fuites.

Le but des métrologies sous-marines est de collecter toutes les données nécessaires à la bonne conception de ces conduites. Nous pouvons différencier cinq types de mesures qui sont listés ci-dessous :

- L'attitude de chacun des connecteurs : le cap, le tangage et le roulis (ou *Heading, Pitch, Roll* en anglais),
- La distance horizontale qui les sépare (L),
- Leur différence d'altitude (ΔZ),
- La différence angulaire entre leur cap et leur ligne directe (α, β),
- Le profil bathymétrique le long de la route de la future conduite.

La Figure 1, ci-contre, illustre certaines de ces mesures.

Les précisions requises lors des métrologies sous-marines dépendent du type de conduite et de connecteur. Elles restent cependant dans les mêmes ordres de grandeurs. Dans la plupart des cas, la tolérance sur les attitudes relatives d'un *hub* par rapport à l'autre est de 1° et d'environ 8cm sur les distances.

De nos jours, la solution la plus utilisée par *TotalEnergies* pour réaliser des métrologies est la méthode inertielle. Une centrale appelée *C-PINS* permet d'obtenir deux éléments. D'une part, les attitudes des connecteurs mais aussi leurs positions, utilisées pour calculer la distance horizontale entre eux. Le profil bathymétrique ainsi que la différence d'altitude sont mesurés à l'aide d'un capteur de pression (appelé « *digiquartz* »). La redondance des données est assurée par la réalisation de boucles. Le temps de réalisation d'une métrologie avec cette méthode dépend du nombre de boucles effectuées. En général, le bateau est mobilisé une dizaine d'heures. Les mesures sont envoyées en temps réel à bord, ce qui permet d'effectuer un contrôle qualité (QC) des résultats quasiment simultanément.

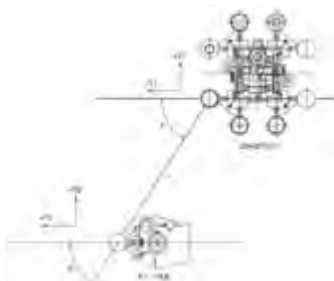


Fig. 1 : Mesures d'une métrologie sous-marine -[Auger and Vickery, 2011]

3. Les appareils étudiés

Les deux systèmes analysés lors de cette étude sont le *3DRecon* et le *SubSLAM*, respectivement des entreprises *ZUPT* et *VAARST*. Lors des métrologies, ils sont fixés sur un véhicule sous-marin appelé *ROV* (pour « *Remotely Operated Vehicle* ») qui leur permet de survoler les structures. Ils s'appuient sur leurs caméras stéréos pour détecter des points de singularité (ou « *features* ») sur les structures et sur le fond de la mer. Ces points sont enregistrés puis comparés, dans un premier temps, au sein d'un référentiel local c'est-à-dire entre les deux images prises au même instant. Ainsi, des points communs entre les clichés sont identifiés et utilisés afin de rassembler le couple d'images. Ensuite, les caractéristiques sont comparées dans un référentiel global. Cela permet de savoir si elles ont déjà été observées lors du levé en cours. Alors les systèmes s'appuient sur les points communs détectés pour caler les nouvelles observations dans le nuage. Les images ci-dessous illustrent les deux appareils de l'étude.



Fig. 2 : SubSLAM de VAARST (à gauche) - 3DRecon de ZUPT (à droite)

Une fois le levé terminé, l'utilisateur dispose d'un nuage de point 3D de la zone ainsi que des vidéos réalisées par les systèmes tout au long de l'acquisition. Il est alors possible d'extraire des images pour transformer le nuage de points temps réel en nuage de points dense, de générer un tout nouveau nuage seulement en utilisant ces photos ou encore de créer un texturage. Les principes techniques sur lesquels reposent ces technologies sont le *SLAM* et la stéréovision.

Le *SLAM* signifie *Simultaneous Localization And Mapping*. Il s'agit d'un algorithme itératif utilisé en robotique qui permet à un système d'effectuer deux tâches simultanément : la cartographie et le positionnement. Le « *Mapping* », c'est-à-dire cartographie consiste en la réalisation d'une carte en temps réel d'un environnement inconnu. La « *Localization* » correspond au positionnement du système au sein de la carte créée. Un des principes sur lequel repose le *SLAM* est la réalisation de boucles. En effet, le système utilise les observations réalisées pour reconnaître des endroits de la carte qu'il a déjà exploré. Lorsqu'il identifie plusieurs fois le même élément, cela permet au système de recalculer entièrement l'estimation de sa trajectoire ainsi que la carte. Grâce à ce nouveau calcul, l'appareil peut corriger toutes ses estimations de position et obtenir une trajectoire ainsi qu'une carte plus exacte.

La stéréovision est une méthode de mesure qui utilise des couples d'images afin de déterminer les dimensions, positions relatives et formes des éléments de l'environnement. Cela est possible grâce à un principe d'association de couple images, séparées d'une base connue. Cette distance combinée à l'éloignement du système à l'objet permet à un même point d'être projeté sur chacune des images. Comme les caméras sont espacées d'une base horizontale B connue, les projections de ce point ont un décalage sur leur coordonnées x dans le plan des images. Ce décalage, appelé disparité (ou parallaxe horizontale en photogrammétrie), rend la coordonnée Z (relative) d'un point objet calculable. L'erreur sur le calcul de cette coordonnée est directement liée à la base horizontale B , comme l'illustre la formule suivante : $\sigma_z = \frac{Z^2}{c \times B} \sigma_{p_x}$ où c est la distance principale et σ_{p_x} l'erreur sur la disparité.

4. Application à un cas concret

Ces deux systèmes ont été testés par *TotalEnergies* sur plusieurs infrastructures installées en Angola. Sur chaque site, une métrologie inertielle a été réalisée au préalable. Ensuite, une nouvelle métrologie a été effectuée avec un des systèmes. De cette manière, nous avons pu évaluer les résultats des solutions étudiées. Le test du *3DRecon* de *ZUPT* a eu lieu en février 2022 au sein du champ *Lirio*, sur le secteur de *CLOV* au large des côtes de l'Angola. Celui du *SubSLAM* de *VAARST* s'est également déroulé en Angola, en juin 2022 sur les champs *Mostarda* et *Gengibre* sur le secteur *Kaombo*.

4.1. Acquisition des données

Après leur installation, les appareils sont calibrés dans l'air puis au fond de l'eau. Lors du test du *3DRecon* des panneaux de cibles codées ont été placés sur la zone afin de faciliter la détection de points caractéristiques. La phase de levé a permis de constater deux problèmes principaux : tout d'abord l'éclairage puis l'architecture des structures. La Fig. 3 ci-contre illustre la zone vue par une caméra du *ROV* (en bas), du *SubSLAM* (en haut à gauche) et le nuage en temps réel produit.

Les métrologies ont eu lieu à plus de 1600 mètres de profondeur. Il n'y a donc pas de lumière naturelle et l'éclairage provient uniquement du *ROV* (et du système dans le cas du *3DRecon*). Or la lumière est rapidement absorbée dans l'eau et il est difficile d'avoir un éclairage diffus et homogène sur la scène observée. Cela exerce pourtant une forte influence sur la qualité du nuage construit. En effet, les caractéristiques d'une scène sont beaucoup moins discernables si la zone est surexposée ou trop sombre.

Afin que l'algorithme *SLAM* puisse fonctionner, il est nécessaire de réaliser des boucles et d'observer plusieurs fois les mêmes caractéristiques. Alors, les éléments sont reconnus automatiquement et une fermeture de boucle (ou « *loop closure* ») est réalisée. Cependant, les structures étudiées sont tellement symétriques que de mauvaises fermetures ont été calculées. Cela a entraîné une perte de temps considérable puisque nous devions à chaque fois recommencer le modèle. Nous avons constaté qu'un nuage de point correct pouvait être obtenu en 1 heure de levé environ, selon la taille de la zone.

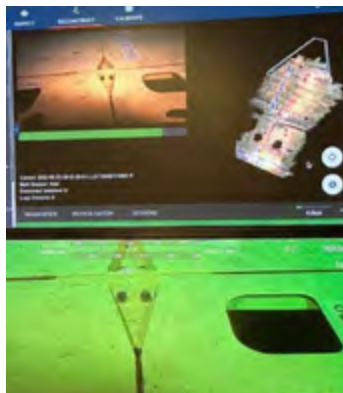


Fig. 3 : Acquisition de données avec le *SubSLAM* - Angola, Juin 2022

4.2. Evaluation des résultats

A l'issue du levé, le *3DRecon* et le *SubSLAM* fournissent un nuage de points ainsi que toutes les vidéos de l'acquisition. Dans l'étude des deux systèmes, un nouveau nuage de points a été extrait des images issues des vidéos. L'évaluation des résultats peut se résumer en trois axes illustrés ci-dessous. Le traitement des nuages a été réalisé avec les logiciels *CloudCompare* et *PolyWorks*. La première étape nous a permis d'invalidier le nuage de points généré en temps réel car il présentait un écart de 80cm sur les distances. Pour la suite, nous avons travaillé avec les nuages générés sur *Metashape* grâce aux images des vidéos.

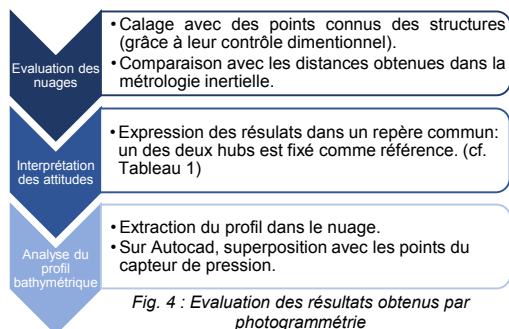


Fig. 4 : Evaluation des résultats obtenus par photogrammétrie

Pour pouvoir contrôler les attitudes extraites du nuage, nous avons eu besoin de trouver un moyen de comparaison. En effet lors d'une métrologie par inertielle les caps, roulis et tangages des connecteurs sont exprimés en absolu. Or avec la photogrammétrie, nous travaillons avec une orientation relative. Afin de pouvoir évaluer nos résultats, nous avons dû les exprimer au sein du même référentiel. Nous avons alors décidé de fixer l'un des deux connecteurs : c'est-à-dire de l'aligner parfaitement sur l'axe Y en lui donnant une attitude nulle. A partir de là, nous avons exprimé l'attitude du second

hub dans ce référentiel. Cette démarche a été appliquée aux valeurs inertielle ainsi qu'au nuage de points. Nous avons alors constaté que nous trouvions des angles de caps et de roulis très cohérents avec ceux issus de la méthode inertielle comme l'illustre le Tableau 1. Dans la suite de l'étude, des traitements supplémentaires vont être appliqués aux nuages afin d'obtenir davantage d'informations et de se rapprocher des résultats de l'inertielle.

Tableau 1: Ecart entre les résultats de la métrologie inertielle et du SubSLAM.

	Sur les distances (en cm)			Sur les angles (en degrés)				
	ΔL	ΔH	Δ moyen bathymétrie	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	Δ Cap	Δ Tangage	Δ Roulis
Ecart absolu	4	2	10	0.41	0.32	0.26	0.73	0.07

5. Conclusion et perspectives

Le recours à des solutions photogrammétriques pour les métrologies sous-marines semble prometteur. En effet, l'acquisition est rapide et la combinaison d'images permet en théorie d'obtenir des précisions satisfaisantes. La photogrammétrie en général est de plus en plus utilisée dans le milieu de la production d'hydrocarbures. En particulier, les contrôles dimensionnels des structures sont maintenant souvent effectués de cette manière. Cependant, des améliorations sont à apporter afin que les systèmes puissent être envisagés comme des solutions permanentes. Les deux principales sources d'améliorations sont l'éclairage et l'association des caractéristiques sur les structures. Par exemple, il existe des cibles codées adhésives qui pourraient être fixées aux endroits semblables des structures. Aussi, tant que le nuage de points généré en temps réel n'est pas exploité directement et demande du temps de traitement nous pouvons questionner son intérêt. Bien qu'il permette d'évaluer la progression du levé, si le nuage exploité est celui issu des images de la vidéo en post traitement, alors pourquoi ne pas utiliser les outils déjà présents sur le ROV ? Ces sous-marins disposent de caméras de très bonne qualité ainsi que de système de positionnement et il serait possible d'exploiter leurs données. Au-delà de l'aspect technique du levé, une étude plus approfondie des attentes des métrologies sous-marines doit être menée. En effet, il s'agit de déterminer si des résultats donnés dans un référentiel relatifs (c'est-à-dire d'un connecteur par rapport à l'autre) sont suffisants ou non pour concevoir les conduites.

Reconstruction automatique de maquettes BIM d'infrastructures en milieu maritime, portuaire et fluvial

PFE présenté par : **Hugo Courtois-Wagner**
Société d'accueil : **FERRCAD**
Directeur de PFE : **Yvon Kila**
Correcteurs : **Hélène Macher, Pierre Grussenmeyer**
Encadrant : **Yvon Kila**



1. Contexte et objectifs de l'étude

L'utilisation du BIM s'affirme de manière accrue ces dernières années dans la gestion de projet d'ouvrage. Il est devenu un outil important de gestion de sa construction jusqu'à sa phase d'exploitation. Néanmoins son utilisation dans le secteur marin est peu répandue comparé au secteur du bâtiment. Cependant ces infrastructures subissent de fortes sollicitations venant de l'accostage de bateaux et les cargaisons, mais aussi de son environnement (climat, eau...) rendant la maintenance de ses ouvrages onéreuse. L'utilisation du BIM lors de sa construction et de son exploitation réduirait les coûts de maintenance en prévenant ce type de dégradation.

Ce projet de fin d'étude vise à automatiser la création de maquettes BIM d'ouvrages hydrauliques en milieu maritime, portuaire et fluvial. Il se situe dans le projet "Design by Data" de ferrcad ayant comme objectif de développer un outil générant des maquettes BIM génériques et paramétriques (Typos) d'infrastructures maritimes, fluviales et portuaires avec le moins d'interventions de l'utilisateur possible. Ce projet est divisé en 5 phases :

1. La première phase correspond à l'établissement des "typos", c'est-à-dire la définition d'ouvrages "types" paramétriques, regroupés en familles et qui seront réutilisés à chaque projet. La typo est d'abord définie en plans 2D (format DWG) de l'ouvrage avec tous ses paramètres de longueurs et de son environnement.

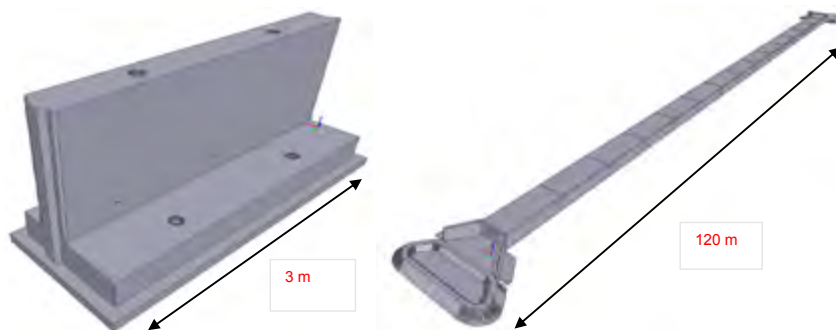
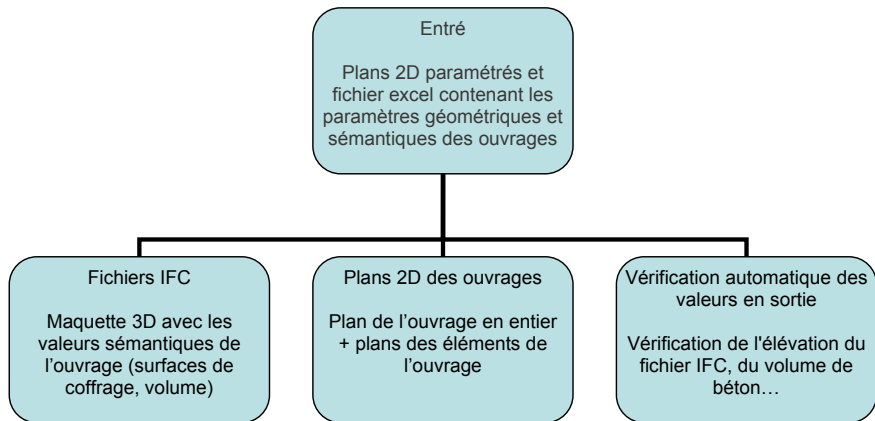


Fig 1. : Exemples de modèle 3D de Typo : Typo C1 (gauche) et Typo I2 (droite)

2. La deuxième phase consiste à faire le lien entre les paramètres géométriques et les données issues du calcul. La solution retenue est de réunir toutes ces informations dans un tableur dédié à

chaque type. L'objectif est de sortir des fichiers IFC à la chaîne ainsi que des plans 2D des ouvrages à partir de plans définissant un type et de tableurs excel contenant les paramètres géométriques et sémantiques de chaque ouvrage.



3. La troisième phase a pour objet l'automatisation de la génération de la maquette BIM d'un ouvrage à partir d'un nuage de points et l'assistance à la réception d'ouvrage. Plus concrètement, cette phase consiste à développer un outil de création d'une maquette BIM d'un ouvrage tel que construit à partir d'un nuage de points venant d'un levé topographique (réalisé à la fin des travaux ou sur l'ouvrage déjà existant) avec le moins d'interventions humaines possible.

4. La quatrième phase sera la phase de développement des simulations et des prévisions d'évolution du modèle à partir de ses propriétés. L'objectif est l'expérimentation d'un jumeau numérique d'une infrastructure en milieu maritime, portuaire ou fluviale.

5. La cinquième et dernière phase aura comme enjeu de proposer une interface utilisateur accessible pour pouvoir travailler sur le jumeau numérique.

À terme, ce projet aura la forme d'un produit qui a pour objectif d'être vendu à des entreprises souhaitant générer et exploiter le jumeau numérique d'une infrastructure déjà construite ou qui sera construite dans le futur.

Ce projet de fin d'étude se concentrera sur la phase 2 et 3, c'est à dire d'une part la génération de fichier IFC et de plans 2D d'ouvrages hydrauliques à partir d'un tableur contenant les paramètres géométriques et sémantiques des ouvrages, d'autre part la génération de la maquette BIM d'ouvrage sur la base d'un nuage de points.

Le BIM :

Le BIM (Building Information Modeling) est une méthode de gestion de projet de construction à l'aide de maquettes numériques 3D incluant les données du projet de façon structurée. L'objectif est d'avoir un support unique pour tous les intervenants du projet pour optimiser la communication et la gestion. Le fichier servant de support est le fichier IFC (Industry Foundation Classes), format qui structure, organise et hiérarchise les informations. Il se présente sous la forme d'une maquette 3D de l'ouvrage avec les données sémantiques des éléments composants ce dernier (propriétés, volumes, type...).

2. Génération automatique de fichier IFC d'ouvrages hydrauliques

a. Intérêt

Lors d'un projet de construction d'infrastructure, plusieurs corps de métier sont amenés à travailler ensemble. Dans le cadre du projet de canal seine nord, projet s'étendant sur une centaine de kilomètres sur lequel travaille ferrcad et d'autres entreprises, le BIM est essentiel pour faire travailler plusieurs domaines différents ensemble. L'objectif est de réunir tous les fichiers IFC de tous les corps de métiers afin de réaliser une maquette BIM du projet. Il est donc nécessaire que tous les modèles 3D s'agencent correctement entre eux, autant sur la géométrie que sur la sémantique. Néanmoins, dans de tels projets, de nombreuses modifications apparaissent au cours de ce dernier nécessitant de modéliser de nombreuses fois les modèles 3D et de recalculer des valeurs sémantiques comme la surface de coffrage ou le volume de béton. C'est pourquoi ferrcad se propose de développer un outil permettant de générer les fichiers IFC à partir d'un fichier excel automatiquement et rapidement afin de gagner du temps.

b. Le plugin

Il a été décidé pour cette partie de développer un plugin Revit avec le moins d'opération venant de l'utilisateur pour créer une série de fichiers IFC géoréférencés. Ce plugin a été écrit en langage C# en environnement API (Application Programming Interface). Cet environnement permet d'avoir accès aux fonctions de logiciels (dans notre cas Revit) et de les appeler via des requêtes à partir de lignes de code écrites sur Visual Studio.

Lors de ce projet de fin d'étude, plusieurs familles Revit ont été créées à partir de plans 2D paramétrés de Typos qui ont été produits par ferrcad en format DWG. Il a été choisi de créer ces familles pour servir de base à la modélisation de la maquette 3D de l'ouvrage. Ainsi, on ne modélise qu'une seule fois manuellement la typo pour qu'elle puisse servir dans tous les projets. Les fichiers IFC sont générés à partir d'une feuille excel contenant les valeurs et le nom des paramètres géométriques de la typo pour chaque ouvrage que l'on souhaite modéliser (figure 1) ainsi qu'une feuille contenant le nom des paramètres sémantiques ainsi que leur valeur.

Figure 2 displays two Excel spreadsheets used as input for the program. The left spreadsheet, titled 'Feuille des paramètres géométriques', lists various geometric parameters (e.g., 'Longueur', 'Largeur', 'Hauteur') in columns and different types of hydraulic structures (e.g., 'Canal', 'Bassin', 'Vanne') in rows. The right spreadsheet, titled 'Feuille des paramètres sémantiques', lists semantic parameters (e.g., 'Nom', 'Description', 'Matériau') in columns and specific parts or instances of the structures in rows.

Fig 2. : Feuilles excel en entrée du programme : feuille des paramètres géométriques avec en collone le paramètre et en ligne l'ouvrage (gauche) et feuille des paramètres sémantiques avec en colonne le paramètre et en ligne la partie de l'ouvrage (droite).

Pour le géoréférencement de l'ouvrage, un fichier dxf (AutoCAD) contenant les polygones géoréférencés de tous les ouvrages est utilisé par le programme. L'axe de l'ouvrage se superpose sur la polygone et son point de départ. Ainsi, l'utilisateur a le contrôle sur le géoréférencement.

De plus, le plugin va calculer automatiquement des valeurs sémantiques importantes à partir de scripts dynamo (un outil interne à Revit), codés avec des scripts python et de la programmation graphique. Parmi ces valeurs, la surface de coffrage (surface nécessaire pour contenir le béton frais en attendant le durcissement) ou le volume de béton sont calculées automatiquement. Enfin, en plus des fichiers IFC géoréférencés, des vues en coupe de l'ouvrage sont aussi générées sous format PDF ainsi que sous format DWG.

En clair, à partir du fichier de famille Revit, des feuilles excel et du fichier AutoCAD, le plugin va générer automatiquement les fichiers IFC à la chaîne avec le calcul de valeurs sémantiques comme la surface de coffrage, des vues en coupe de l'ouvrage en format PDF et DWG.

Enfin, un autre plugin Revit écrit en C# a été développé afin de faciliter et d'accélérer la création d'une famille Revit paramétrée d'une typo à partir de plan 2D AutoCAD. Ce plugin a en entrée le fichier dxf et va dessiner les cotes du plan AutoCAD sur Revit et va créer les paramètres géométriques. L'utilisateur n'a plus qu'à réaliser les extrusions. L'objectif de ce plugin est à terme la création automatique de la famille Revit sans l'intervention de l'utilisateur pour automatiser totalement le processus.

3. Génération automatique de maquette BIM à partir d'un nuage de points

La création manuelle d'une maquette BIM d'un ouvrage à partir d'un nuage de points est une opération longue et la précision va dépendre de l'utilisateur et des possibles erreurs qu'il peut commettre. C'est pourquoi ferrcad veut intégrer dans son projet un outil permettant de générer une maquette BIM d'infrastructures à partir d'un nuage de points d'un port en scan to BIM dans l'objectif d'en réaliser un jumeau numérique.

Un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un objet physique, dans notre cas une infrastructure, qui possède les propriétés de l'objet réel. Son utilisation est variée, en effet il permet d'obtenir, à partir de capteurs, des données sur l'état de santé de l'infrastructure (état des fondations, performance énergétique, émissions de CO2...). Le jumeau numérique permet aussi d'exécuter des simulations et générer des améliorations possibles. C'est un outil important pour la gestion d'infrastructure après sa construction.

En clair, l'objectif est de proposer un outil permettant à l'utilisateur d'obtenir une maquette BIM avec le moins d'interventions possible dans le processus. Cette partie sera traitée en détail dans le rapport

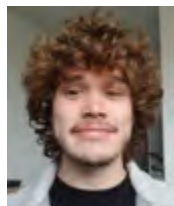
4. Conclusion

Enfin, l'outil réalisé lors de ce PFE représente un gain de temps et de moyens pour la création de fichiers (IFC, Vues en coupe PDF, DWG) pour des projets d'envergure. Le plugin répond aux attentes de ferrcad, il est adapté aux non-utilisateurs de Revit permettant à terme de le vendre au plus large marché possible. Il est opérationnel en interne par ferrcad pour répondre aux prochaines commandes dans de futurs projets.

Ainsi, à la moindre modification d'un projet, il est possible d'obtenir les nouvelles versions des fichiers nécessaires rapidement et automatiquement. Ce PFE a développé une nouvelle méthode de création de fichier IFC en se basant sur des ouvrages paramétrés réutilisable pour différents projets.

De plus, ce PFE traite aussi de la reconnaissance de forme dans un nuage de points en s'adaptant avec les données dont dispose ferrcad, notamment la bibliothèque de Typos paramétrés.

Développement d'une approche basée sur les données Landsat historiques pour la délimitation des zones inondables canadiennes à différentes récurrences



PFE présenté par : **Bastien WIRTZ**
Société d'accueil : **INRS – Centre ETE**
Directeur de PFE : **Karem CHOKMANI**
Encadrants : **Anas EL ALEM, Saeid HOMANOUYI**
Correctrice : **Tania LANDES**



1. Les inondations, la catastrophe naturelle la plus destructrice

Depuis les débuts de la sédentarisation de l'Homme et de l'urbanisation, l'Homme a construit de grandes villes aux bords de plans d'eau. Bien que cela apporte de nombreux avantages, bâtir près de l'eau implique certaines contreparties, notamment l'exposition au risque d'inondation. C'est pour cela que les inondations sont sans doute l'une des catastrophes naturelles les plus dévastatrices de notre Histoire. Ces dernières causent des dommages tant au niveau du terrain qu'au niveau des vies et peuvent marquer à jamais les esprits. Malheureusement, avec les différents phénomènes menant au réchauffement climatique, les processus naturels responsables de la montée des eaux sont à la fois de plus en plus intenses, mais également de plus en plus fréquents. Ainsi, on recense beaucoup plus de cas d'inondations dans le monde ces deux dernières décennies.

Tous les pays du monde sont sujets aux inondations, mais certains y sont beaucoup plus sensibles. Ce qui est le cas du Canada qui est l'un des pays subissant le plus d'inondations, et la province du Québec n'y fait pas exception, cette dernière a récemment connu des inondations historiques en 2017 suivies de près par d'autres inondations historiques en 2019, touchant jusqu'à plus de 4.000 et 14.000 personnes respectivement. C'est pourquoi le gouvernement canadien ainsi que le gouvernement québécois mettent en place des stratégies afin de prévoir, prévenir et planifier autour de ces risques, finançant également des projets scientifiques avec ces objectifs. C'est dans ce contexte que le laboratoire de Télédétection Environnementale et NORDique (TENOR) de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) a pu débiter de nouvelles études au sujet des inondations. Ces raisons ont amené le laboratoire à bâtir un projet d'analyse des inondations au Canada à différentes récurrences à partir d'images acquises par des missions Landsat.

Depuis le lancement de la 1^{ère} mission Landsat en 1972 jusqu'au lancement récent de la 9^e mission en septembre 2021, le programme d'observation de la Terre a pu acquérir une immense banque de données. Pour ce projet, nous avons utilisé plus de 3000 images découpées dans une image Landsat correspondant en date et en emprise au sol aux inondations dans la province du Québec en 2019, afin de pouvoir en tirer l'étendue des catastrophes et ainsi pour pouvoir délimiter l'événement. A plus long terme, le projet permettra, pour des plans d'eau où plusieurs inondations ont été capturées sur toute la période d'utilisation de Landsat, d'analyser à différentes récurrences des inondations. Et ainsi grâce des modèles de prédictions, il sera possible d'estimer l'évolution des zones inondables et ainsi de contribuer à la prévention de ces risques pour les citoyens québécois et canadiens.

2. Objectifs du Projet de Fin d'Études

L'objectif de ce projet de fin d'études est de délimiter les zones inondables de plans d'eau à partir de l'imagerie Landsat. Cet objectif se décompose en 4 étapes décrites dans la figure 1. La concrétisation de cet objectif passe par la réalisation des sous-objectifs suivants :

- Développer et entraîner un algorithme d'apprentissage profond pour extraire l'étendue de l'eau des images Landsat en trois classes (0=Terre, 1=Intermédiaire, 2=Eau) ;
- Automatiser la création d'images composites, ainsi que l'application de l'analyse fréquentielle et du modèle *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) sur les données pour permettre l'obtention des cartes de risques d'inondations.

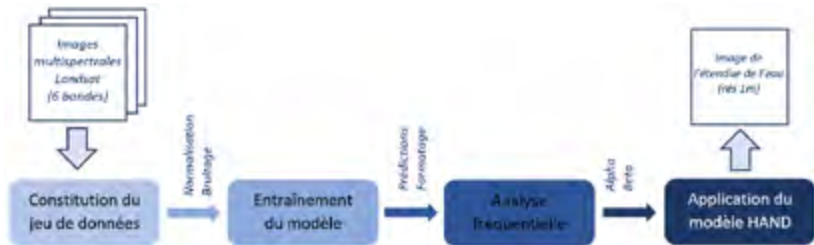


Fig. 1 : Organigramme de l'étude

3. La reconnaissance de l'eau en télédétection

En télédétection spatiale, la problématique de détection des plans d'eau est bien connue et renseignée. La signature spectrale de l'eau est caractéristique et très différente de celles des autres objets. Elle permet l'identification rapide des pixels de l'eau dans les images satellites. En effet, on visualise aisément que l'eau présente une réflectance proche de 0% dès que les longueurs d'ondes dépassent le spectre du visible. Ainsi, visualiser uniquement la bande proche infra-rouge d'une image suffit à séparer les pixels "eau" des "pixels non-eau". Malheureusement, les nuages et les ombres du terrain ont également des réflectances faibles dans ces fourchettes de longueur d'onde. C'est pourquoi il est nécessaire de sélectionner et prétraiter les images satellites afin de s'assurer de ne pas avoir de nuages ou d'ombre lorsque l'on souhaite segmenter l'eau dans une image.

La segmentation de l'eau dans des images satellites est un domaine très étudié depuis le début des avancées dans le domaine de l'apprentissage machine et de l'intelligence artificielle dès les années 1980. Le traitement des images issues de la télédétection a fortement contribué aux avancées de ces domaines.

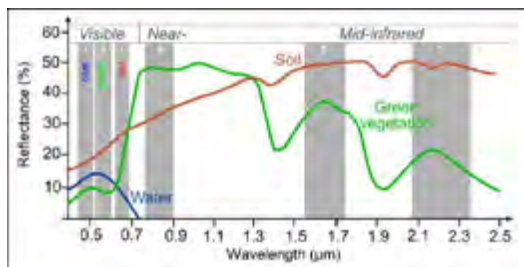


Fig. 2 : Signatures spectrales de l'eau, de la végétation et du sol, Landsat TM, ESA

4. La délimitation de l'emprise de l'eau par apprentissage profond

L'eau est donc un élément facilement reconnaissable dans les images satellitaires, ce qui est tout de même un atout de taille lorsque l'on souhaite l'étudier. Ce projet étant orienté sur une approche automatique, il est naturel de se tourner vers l'apprentissage machine et plus particulièrement l'apprentissage profond pour segmenter une image. Dès lors, il faut faire un certain nombre de choix qui vont influencer l'étude. En effet, en décidant de travailler avec un modèle d'apprentissage profond, il nous faut choisir son architecture, ses paramètres, comment interpréter ses prédictions ou encore quels formats et dimensions utiliser pour le jeu de données d'entraînement. Notre objectif est d'obtenir, pour chaque pixel de l'image, sa probabilité d'appartenir à la classe eau. Il s'agit donc de réaliser une classification des pixels et grâce aux multiples études réalisées sur des problématiques de segmentation de plans d'eau dans des images satellitaires, nous avons décidé d'opter pour l'architecture de réseau de neurones UNet qui est particulièrement adaptée et efficace.

Avec son allure générale en forme de U, cette architecture de réseau dite "entièrement convolutionnelle" permet l'accumulation d'informations sur les caractéristiques de l'image à travers ses caractéristiques (C) qui permettront ensuite la segmentation en plusieurs classes (CL).

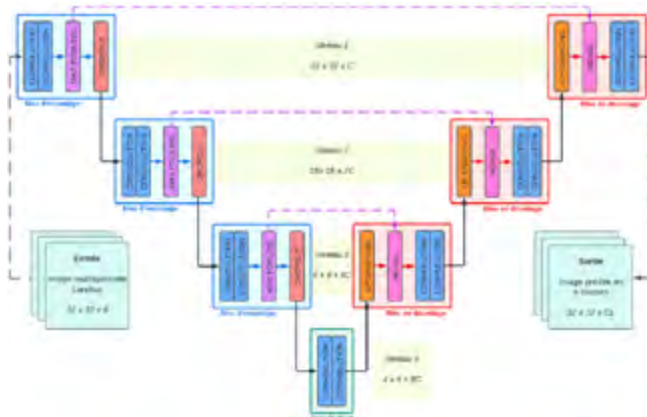


Fig. 3 : Schéma représentatif du modèle d'apprentissage profond du projet

Le choix du modèle de réseau de neurones étant fait, le projet peut commencer par l'entraînement de l'algorithme sur notre jeu de données. Entraîner un algorithme d'apprentissage profond est une tâche simple, il suffit de lui indiquer un jeu de données pour l'entraînement et un pour la validation et l'algorithme apprend par lui-même. En revanche, ce qui devient compliqué est l'optimisation des variables du modèle influant sur le résultat. Ces variables sont nommées les hyperparamètres, et certains ont un impact important sur l'entraînement du réseau de neurones et il devient alors primordial de les optimiser. En plus de ces hyperparamètres, la fonction de perte influence également l'entraînement puisqu'elle est utilisée par l'algorithme pour calculer les biais à ajouter afin de modifier les poids des neurones du réseau par rétropropagation de gradient. Dans cette étude, la fonction de perte choisie repose sur le calcul du coefficient de Dice, aussi appelé score F1, dont la formule est donnée en équation 1. Ce coefficient représente la valeur de similarité entre la prédiction et la vérité. Plus il est élevé, plus la prédiction est proche de la vérité. Il s'agit d'une fonction de perte fréquemment utilisée dans les études de segmentation d'images.

$$F1 = \frac{2 * (VP + VN)}{VP + VN + FP + FN}$$

Eq. 1 : Formule du score F1

La formule du score F1 fait apparaître les classes de pixels d'une prédiction, avec les Vrais Positifs (VP), Vrais Négatifs (VN) qui sont les pixels correctement prédits et les Faux Positifs (FP), Faux Négatifs (FN) qui sont les pixels prédits dans la mauvaise classe.

5. Prédications du modèle

Dès que le modèle s'est entraîné sur le jeu données, il est désormais capable de reconnaître par lui-même les pixels de l'eau des images Landsat à un niveau d'incertitude donné. A partir de ce moment, nous sommes en mesure de lui donner une image et l'algorithme renvoie les prédictions associées à cette dernière. Ces prédictions sont sous la forme de pourcentages d'appartenance à chaque classe. Dans ce projet, nous avons décidé de ne prendre en compte que 3 classes : *Non-Eau*, *Intermédiaire*, *Eau*. La classe intermédiaire nous intéresse particulièrement puisqu'elle concerne les pixels où l'eau n'est pas toujours présente au cours du temps. Il s'agit donc de la classe d'intérêt principal pour l'étude d'inondations.

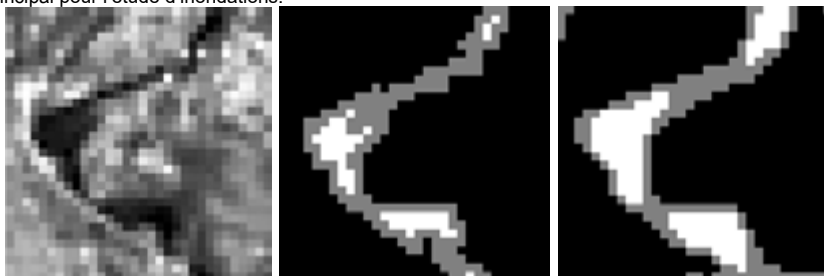


Fig. 4 : Comparaison entre l'image de base (en niveaux de gris, à gauche), la vérité-terrain (au centre) et la prédiction du modèle (à droite). Images de 32x32 pixels. Emprise de pixel 900m². Zone de 921,6 km².
L'image de base et la vérité-terrain proviennent du jeu de données de validation

Il est important de préciser que ces résultats ne sont pas définitifs et nécessitent d'être optimisés. Ce sont ceux obtenus 2 mois avant la fin du projet et ces derniers sont donc fortement susceptibles de ne pas correspondre à ceux présentés durant la soutenance. Cependant, nous pouvons tout de même observer que l'allure générale est bien prédite mais n'est pas encore suffisamment précise et exacte.

6. Analyses des prédictions

Avec des prédictions répondant à nos besoins en termes de précision et d'exactitude, il est possible d'analyser les récurrences des inondations. Pour cela il est nécessaire de créer des images composites représentant l'emprise de l'eau pour chaque année. Ainsi, en créant une image dont chaque pixel correspond au pixel de la classe la plus élevée (0,1,2) obtenue sur l'année, une image composite représentant l'étendue maximale de l'eau pour chaque année est obtenue.

Ce sont ces images composites sur lesquelles une analyse fréquentielle est réalisée permettant le calcul de la probabilité d'apparition d'une inondation pour chaque pixel de l'image composite, créant ainsi une nouvelle image contenant ces probabilités. Finalement, ce sont ces dernières, couplées à un modèle numérique de terrain, qui sont entrées dans le modèle HAND afin d'obtenir des cartes du risque d'inondation pour chaque année.

7. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis l'établissement d'une chaîne de traitement automatique de délimitation des zones inondables à partir de données libres et gratuites. Elle associe les domaines de la télédétection et de l'hydrologie couplés à un modèle topographique afin de produire une carte de l'étendue des inondations la plus fidèle possible.

L'étude a permis d'automatiser le processus de cartographie des risques, renforçant également les compétences de l'équipe du laboratoire TENOR et notamment dans l'optimisation des modèles d'apprentissage profond.

Ce projet offre désormais la possibilité de nouvelles études se basant sur la connaissance de l'étendue de l'eau, telles que l'évolution du risque d'inondation en se basant sur les cartes du risque de chaque année, ou encore le suivi de la biodiversité des berges de plans d'eau par rapport au niveau de l'eau.

Méthodologie de couplage de la géométrie 3D de scènes urbaines avec des mesures dans l'infrarouge thermique



PFE présenté par : **Vincent Lecomte**
Société d'accueil : **INSA Strasbourg – équipe TRIO**
Directrice de PFE : **Tania Landes**
Correctrice : **Hélène Macher**



1. Contexte

L'étude thermique des bâtiments et des arbres est essentielle en climatologie urbaine. Elle permet et contribue à mieux appréhender le microclimat d'une rue, d'un quartier ou d'une ville. Aujourd'hui, le défi dans ce domaine est de réussir à discerner les interactions thermiques entre les différents éléments urbains. Les arbres, grâce à l'évapotranspiration et leur ombre portée, permettent de rafraîchir l'air. Ainsi, ils se révèlent bénéfiques lors de canicules. Ces différents phénomènes sont distinguables par mesure de température de surface via la thermographie infrarouge, technologie non-destructive.

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le contexte de l'ANR TIR4sTREEt. Il vise à étudier le couplage de la géométrie 3D de scènes urbaines avec des mesures infrarouges thermiques pour produire un modèle 3D thermique d'un site. La zone d'étude se situe à Strasbourg sur trois rues : rue Ellenhard, rue du Général Ducrot et boulevard Jacques Preiss. Dans celles-ci se trouvent des arbres en alignement de trois espèces différentes. Ils sont étudiés en vue de comprendre l'impact de leur comportement sur leur environnement urbain.

La problématique de ce projet est de trouver une ou plusieurs méthodologies de couplage adaptées tant aux bâtiments qu'aux arbres dont la géométrie est plus complexe. Pour répondre à ce besoin, la première étape est de chercher des études similaires afin de pouvoir s'appuyer dessus et développer une solution adaptée.

2. Etat de l'art

La fusion de données géométriques et thermiques est un sujet d'actualité. Puisque les informations thermiques sont généralement des images infrarouges thermiques (IRT), les méthodes proposées relèvent de la photogrammétrie. Afin de faciliter leur traitement, l'utilisation intermédiaire de photographies RVB (rouge-vert-bleu) est à privilégier. Après une étape de calibration entre un capteur IRT et un capteur RVB (Alba et al., 2011, Macher et al., 2019), il est possible d'en déduire les paramètres d'orientation externe (position et orientation dans un système de coordonnées) des images IRT.

Les modèles thermiques 3D peuvent prendre la forme de modèles maillés et texturés (Previtali et al., 2013) ou de nuages de points thermiques. Ceux-ci sont produits directement à partir des images IRT (Grechi et al., 2021) ou bien par colorisation d'un nuage de points (acquis à l'aide d'un scanner laser statique par exemple) avec des images IRT (Zhu et al., 2021).

La plupart des méthodologies mises en place concernent le bâti et ne sont pas adaptées aux végétaux. Cependant, des nuages de points thermiques d'arbres ont été réalisés en produisant des balayages laser thermiques indépendamment les uns des autres (Yandún Narváez et al., 2016, Hosoi et al., 2019).

Les modèles maillés et texturés ne permettent pas d'accéder facilement à l'information de température. De plus, les nuages de points produits à partir des images IRT seules ont une précision géométrique moins bonne que celle d'un nuage de points acquis avec un scanner laser terrestre. La solution ainsi retenue est de coloriser un nuage de points acquis via un scanner avec des images IRT.

3. Données géométriques 3D et infrarouges thermiques

De nombreuses données géométriques du site d'étude ont déjà été acquises ces dernières années à l'aide de capteurs divers (scanner laser, tachéomètre). De plus, une caméra thermique s'ajoute au parc des instruments pour obtenir des données IRT.

3.1 Données géométriques 3D

Un cheminement polygonal du site a été mis en place afin de calculer des coordonnées de points d'appuis. À l'aide de cette polygonation et de différents scanners laser statiques, les balayages laser ont été effectués puis consolidés et géoréférencés. Le nuage de points de la zone ainsi produit servira de base géométrique au modèle thermique 3D (PRT Lautier/Baehrel., 2020).

3.2 Données infrarouges thermiques

Pour acquérir les données thermiques d'une scène, l'utilisation d'une caméra IRT est idéale. En détectant le rayonnement électromagnétique émis par les objets dans le domaine de longueur d'onde de l'infrarouge thermique, le capteur infrarouge permet de produire des matrices de températures. Celles-ci sont transformées en images thermiques via une échelle de couleurs.

Dans ce projet, la caméra infrarouge FLIR T560 est utilisée. Elle a pour avantage de posséder un capteur RVB en plus de son capteur infrarouge. Ce dernier permet de mesurer des températures entre -20°C et 120°C avec une précision de 0,3°C. Cependant, même si la thermographie infrarouge tend à se développer de plus en plus, la résolution spatiale des capteurs IRT est toujours plus basse que celle des capteurs RVB. Dans notre cas, le capteur IRT possède une résolution de 640 x 480 pixels et le capteur RVB de 2592 x 1944 pixels.

4. Méthodologie de couplage mise en place

La méthodologie de couplage sélectionnée a pour objectif de produire un nuage de points thermiques, c'est-à-dire attribuer un champ de température à chacun des points du nuage de la zone. Afin de faciliter le traitement photogrammétrique des images IRT, il est indispensable d'utiliser les photographies RVB de la caméra thermique. Pour lier ces deux types d'images, une phase de calibration est indispensable.

De plus, dans une scène urbaine, la géométrie 3D des éléments urbains est très différente selon leur nature. Il faut donc veiller à discerner les bâtiments des arbres. À cause de leur géométrie complexe et changeante suivant les saisons, la méthodologie de couplage sur les végétaux diffère de celle appliquée aux bâtiments.

4.1. Calibration de la caméra thermique

Pour corriger géométriquement les photographies RVB et les images IRT, il est indispensable de calculer leurs paramètres d'orientation interne (coordonnées du point principal et coefficients de distorsions). Pour cela, une mire détectable simultanément dans le domaine du visible et de l'infrarouge a été utilisée (PRT Marin., 2021). L'application « Camera Calibrator » du logiciel MATLAB a permis de calculer ces paramètres par reconnaissance automatique de la mire sur les clichés.

De plus, les paramètres relatifs de translation et de rotation entre le capteur RVB et le capteur IRT sont calculés automatiquement avec la même mire via l'application « Stereo Camera Calibrator » de MATLAB. Avec ces paramètres, il est possible de lier les photographies RVB avec leur image IRT correspondante. Cette approche est inspirée de la calibration proposée dans Macher et al. (2019).

4.2 Méthodologie de couplage développée pour le bâti

La géométrie des bâtiments est très peu susceptible de changer au cours du temps. Ainsi, puisque le nuage de points du site d'étude est déjà disponible, la phase d'acquisition se limite uniquement à la prise de photographies RVB et d'images IRT avec la caméra thermique. À l'aide d'un trépied, plusieurs paires d'images (RVB et IRT) sont prises à chaque emplacement de caméra en assurant un recouvrement suffisant de 60%.

Afin d'être utilisées sur un logiciel photogrammétrique, les matrices inhérentes de températures des images IRT doivent être corrigées au niveau radiométrique et recodées dans un format adapté à leur transfert sur le nuage de points. En parallèle, des images IRT en fausses couleurs sont produites à partir d'une échelle de couleur pour apporter une visualisation en niveaux de températures au nuage de points thermiques.

Pour ces deux étapes, le logiciel FLIR Research Studio est utilisé. En indiquant au logiciel les paramètres environnementaux correspondant à l'heure de l'acquisition des données IRT, toutes les matrices de températures sont automatiquement corrigées. Pour conserver la valeur de température de chaque élément de ces matrices dans une image PNG 16bits, celles-ci sont converties en centikelvin. En effet, le codage d'image en 16bits permet 65 536 valeurs possibles, d'où une plage de température entre 0 et 65 536 centikelvin (soit -273,15°C à 382,21°C). Par la suite, des images IRT en couleurs sont créées avec une échelle de couleur à haut contraste. A la suite de cette phase, nous disposons donc de triplets d'images composés d'une photographie RVB, d'une image IRT colorisée et d'une matrice de températures sous la forme d'une image en nuance de gris.

L'étape suivante consiste à référencer les données IRT dans le même système de coordonnées que les informations géométriques 3D. A cause du codage couleur et de la plus faible résolution des images IRT par rapport aux photographies RVB, la détection algorithmique des points d'intérêt et leur appariement est difficile. Pour pallier ce problème, la détection de points d'intérêt est réalisée sur les photographies RVB. Une fois les paramètres d'orientation externe des photographies RVB calculés à l'aide de points d'appuis connus en coordonnées, ceux des images IRT sont déduits grâce aux paramètres relatifs de translation et de rotation entre les deux capteurs de la caméra thermique. Cette étape est réalisée via l'approche d'un système multi-caméra sur le logiciel Metashape,

Une fois que le lien entre les données géométriques et thermiques est assuré, il faut fusionner les données. Par projection des triplets d'images, le nuage de points est colorisé. Chaque point possède ainsi, en plus de ses coordonnées, sept champs scalaires supplémentaires : trois champs correspondant au code RVB du domaine du visible, trois au code RVB issu des images IRT colorisées et un dernier représentant la température (convertie en degré Celsius). Le résultat final (Fig. 1) est donc un nuage de points thermiques sur lequel le champ de température est accessible en sélectionnant simplement le point désiré.



Fig. 1: Nuage de points thermiques d'un bâtiment

4.3 Méthodologie de couplage développée pour les arbres

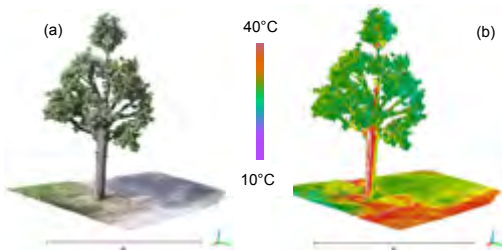
Alors que les bâtiments sont principalement composés de plans, les arbres sont de nature géométrique beaucoup plus complexe. Une simple colorisation par projection n'est pas adaptée. En effet, des points du nuage ne correspondant à aucun pixel d'une image thermique peuvent se voir colorisés du fait de sa projection sur toute la profondeur du nuage. De plus, par la géométrie changeante de l'arbre, il est nécessaire d'acquérir de nouvelles données 3D à chaque campagne d'acquisition thermique.

L'approche ainsi mise en place dans ce projet consiste à produire des nuages de points thermiques pour chaque balayage laser puis de les fusionner afin d'obtenir un modèle 3D thermique complet de l'arbre. Cette méthode s'inspire des études de Yandún Narváez et al. (2016) et Hosoi et al. (2019).

L'acquisition des données géométriques et thermiques consiste à réaliser un balayage laser avec un scanner laser statique puis à se placer au même endroit avec la caméra thermique montée sur trépied pour acquérir des photographies RVB et des images IRT de l'arbre. Cette opération est effectuée plusieurs fois tout autour de l'arbre pour multiplier les prises de vue et éviter les occlusions. Les différents balayages laser sont ensuite consolidés entre eux et référencés. De plus, afin d'obtenir des triplets d'images tels que précédemment, les images IRT sont traitées sous FLIR Research Studio.

L'objectif est désormais de produire des balayages laser thermiques. Afin de référencer les images thermiques par rapport à leur balayage laser correspondant, les photographies RVB sont alignées sur l'image panoramique acquise par le scanner laser lors du balayage. Les paramètres d'orientation externe des images IRT sont ensuite déduits. Après leur projection sur le nuage de points de chaque balayage, les nuages sont fusionnés. De la même manière que la méthodologie de couplage développée pour le bâti, l'approche du système multi-caméra de Metashape est utilisée. De plus, lors de l'import d'un balayage laser, le logiciel produit une image panoramique sphérique par projection des points du nuage ou bien, si elle est disponible, considère directement l'image panoramique acquise par la caméra RVB du scanner laser statique lui-même. De manière analogue à Bruno et al. (2022) et à l'aide d'un script fourni par Agisoft Metashape, les triplets d'images sont automatiquement alignés sur l'image panoramique du balayage laser avant d'être projetés sur le nuage. Un exemple de nuage de points thermiques d'un arbre est présenté dans la Figure 2.

Fig. 2: Affichage RVB (a) et thermique (b) d'un nuage de « points thermiques » acquis à 11h d'un arbre (tilleul)



5. Conclusion et perspectives

Les résultats des premiers tests permettent de mettre en avant certains phénomènes thermiques concernant les différents éléments urbains. Nous pouvons constater que les façades exposées au soleil sont plus chaudes que les façades à l'ombre ou bien que le feuillage d'un arbre est plus frais que ses branches et son tronc. Un autre phénomène également détectable est l'effet de l'ombre portée d'un arbre sur le sol ou une façade. Celui-ci est intéressant puisqu'il permet de mieux comprendre l'impact d'un arbre sur son environnement.

Les résultats sont cohérents et seront évalués géométriquement de façon quantitative grâce à des points d'appuis. L'évaluation radiométrique est, quant à elle, plus difficile à mettre en place.

Une perspective d'amélioration de la méthodologie mise en place serait de créer un bloc de photographies RVB de référence du site comme dans l'étude de Vincke et al. (2020). En effet, à cette échelle, la phase d'acquisition des données thermiques est encore longue. Pour assurer une homogénéité des températures du nuage final du site, il serait intéressant d'appliquer cette méthode puisqu'elle permettrait de réduire le recouvrement nécessaire entre les prises de vue et par conséquent le temps d'acquisition également.

Références bibliographiques :

- Grechi, G., Fiorucci, M., Marmoni, G.M. and Martino, S. (2021). 3D Thermal Monitoring of Jointed Rock Masses through Infrared Thermography and Photogrammetry. *Remote Sensing*. Vol.13, No.5, p957.
- Macher, H., Boudhaim, M., Grussenmeyer, P., Siroux, M. and Landes, T. (2019). Combination of thermal and geometric information for BIM enrichment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol.XLII-2.
- Hosoi, F., Umeyama, S. and Kuo, K. (2019). Estimating 3D chlorophyll content distribution of trees using an image fusion method between 2D camera and 3D portable scanning Lidar. *Remote Sensing*. Vol.11, No.18, p2134.
- Zhu, J. Xu, Y., Ye, Z., Hoegner, L. and Stilla, U. (2021). Fusion of urban 3D point clouds with thermal attributes using MLS data and TIR image sequences. *Infrared Physics & Technology*. Vol.113, p103622.
- Vincke, S. and Vergauwen, M. (2020). Geo-registering consecutive construction site recordings using a pre-registered reference module. *Remote Sensing*. Vol.12, No.12, p1928.
- Bruno, N., Mikolajewska, S., Roncella, R. and Zerbi, A. (2022). Integrated processing of photogrammetric and laser scanning data for frescoes restoration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol.XLVI-2/W1-2022, pp105–112.
- Yandún Narváez, F.J., Salvo del Pedregal, J., Prieto, P.A., Torres-Torriti, M. and Auat Cheein, F. (2016). LiDAR and thermal images fusion for ground-based 3D characterisation of fruit trees. *Biosystems Engineering*. Vol.151, pp479–494.
- Alba, M.I., Barazzetti, L., Scaioni, M., Rosina, E. and Previtali, M. (2011). Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings. *Remote Sensing*. Vol.3, No.9, pp1847–1870.
- Marin, T. (2022). Mesures thermiques à l'échelle du bâtiment et de l'arbre, prise en main de la caméra IRT FLIR T560. *Projet de Recherche Technologique INSA de Strasbourg*.
- Lautier, J. and Baehrel, M. (2020). Modélisation d'arbres urbains avec un scanner laser dynamique (Zeb-Revo RT) sur un site strasbourgeois. *Projet de Recherche Technologique INSA de Strasbourg*.

Mise en place d'une visite virtuelle d'un monument historique à destination du grand public

PFE présenté par : **Charline PIERRE**
Société d'accueil : **GEXIA**
Directeur de PFE : **Rémy ESCAFFIT**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**
Encadrant : **Rémy ESCAFFIT**



1. Contexte de l'étude

Ces dernières années, avec l'évolution des technologies, la lasergrammétrie s'est fortement développée et offre désormais une alternative intéressante pour certains travaux de topographie qui étaient précédemment réalisés avec une station totale.

En effet, deux inconvénients principaux qui sont le temps d'acquisition sur le terrain et l'attention qu'elles nécessitent ont été pointés du doigt. En utilisant un scanner laser pour réaliser ces travaux, le temps d'acquisition sur le terrain est moindre et puisque chaque détail est levé, aucun détail crucial au dessin ne peut être oublié.

Un autre avantage est qu'un seul nuage de points peut avoir plusieurs utilisités, comme par exemple un plan 2D, une maquette 3D, etc.

C'est dans cette optique que le cabinet de Géomètre-Expert de GEXIA chez qui j'ai fait mon stage de fin d'étude souhaite développer son pôle 3D.

Actuellement les nuages de points qui sont demandés par les clients sont envoyés sous format .laz avec une version .exe du viewer Trimble Scan Explorer.

Cependant, ce logiciel n'est pas très intuitif pour des particuliers qui n'ont aucune connaissance sur les données 3D. L'objectif de mon projet de fin d'études est donc de créer une interface intuitive pour les utilisateurs et leur permettra de visualiser sans contrainte l'objet de leur demande.

Cette interface sera accessible puisqu'il s'agira d'une page web directement reliée au site internet de l'entreprise. Elle proposera des outils qui rendront la visite virtuelle interactive.

Les données utilisées tout au long de ce projet ont été acquises dans le Carmel de Castres, en se concentrant plus particulièrement sur la chapelle et deux de ces salles adjacentes. L'entreprise avait en sa possession un nuage de points antérieur du lieu, cependant, des fouilles archéologiques ont été réalisées depuis. Je suis donc retournée sur place réaliser une nouvelle acquisition.

2. Chaîne de traitement des données 3D

a. Acquisition des données terrains

La première étape consiste à acquérir sur le terrain les données nécessaires en prenant en compte le cahier des charges imposé par les clients.

L'élément clé du modèle 3D est le nuage de points, il s'agit de la donnée acquise directement avec le scanner laser. Pour le cadre de la visite virtuelle, il est préférable de l'acquérir en couleur puisque cela apportera un côté plus interactif.

Selon la demande du client, le nuage pourra être géo-référencé ou non, cela n'est pas nécessaire si les coordonnées ne sont pas requises. C'est le cas ici pour ce projet. Cependant, selon le type de monument à lever, l'utilisation de sphères peut être conseillée pour faciliter la consolidation des nuages.

b. Prétraitement des nuages

Un des inconvénients du scanner laser est le prétraitement nécessaire des nuages de points. Cette étape n'est pas si longue mais est cruciale pour obtenir un résultat clair et propre.

Il faut, dans un premier temps, nettoyer les nuages de points pour enlever les objets indésirables (comme par exemple un arbre devant une façade). Le bruit, qui peut être créé par des surfaces réfléchissantes telles que des fenêtres ou des miroirs, doit également être nettoyé.

c. Consolidation

Ensuite, la consolidation et le géo-référencement (si demandé) doivent être réalisés.

Pour le premier, différentes méthodes peuvent être utilisées ou combinées : consolidation avec les cibles et les sphères, consolidation nuage par nuage ou par plans.

Ces étapes permettent d'obtenir une seule entité constituée de tous nos nuages assemblés.

d. Maillage et texturage

Avant de passer au maillage, le nuage doit être échantillonné de manière régulière afin de diminuer le nombre de points uniformément, ce qui permettra de ne pas compromettre la qualité des détails.

Le maillage permet de reconstruire la géométrie des objets en se basant sur les points du nuage qui les composent. Il est obtenu grâce à la triangulation de Delaunay et l'utilisation d'un algorithme de croissance en régions.

Plusieurs paramètres sont ensuite à prendre en compte pour obtenir un modèle maillé satisfaisant : celui-ci ne doit pas être trop lourd mais assez détaillé pour être fidèle à la réalité de l'élément modélisé. Ces paramètres sont le nombre maximum de triangles utilisés, la taille des triangles, mais aussi le lissage réalisé sur le maillage.

La dernière étape, qui vient après le maillage est le texturage. Elle permet de donner un aspect réaliste au modèle en appliquant une texture sur le maillage. Cette texture est composée de couleurs qui sont générées à partir des données RGB Initiales du nuage de points (si l'acquisition a été prise avec les couleurs) ou alors elles peuvent être choisies de manière arbitraire mais cela sera moins fidèle au modèle d'origine.



Fig 1: Récapitulatif de la chaîne de traitement des données

3. Mise en place de l'interface web

a. Création de la page Web

Le but étant de créer une interface pour la 3D sur une page Web, il a avant tout fallu créer le contenu statique de la page Web.

Pour cela, les langages HTML 5 et CSS sont recommandés puisqu'ils sont plutôt simples d'utilisation et offrent beaucoup de possibilités pour le design.

Le langage HTML (HyperText Markup Language) a pour rôle de gérer et organiser le contenu de la page Web. C'est-à-dire que tout ce qui va être affiché sur la page que ce soit du texte, des photos, une scène de contenu 3D est écrit sur un fichier HTML.

Cependant, ce langage n'est pas très élégant, c'est pour cela qu'il est couplé au langage CSS (Cascading Style Sheets) qui gère l'apparence de la page. L'agencement, le positionnement, la taille,

la couleur, la forme des objets de la page sont donc décrits par le CSS. Ce langage est très complet et permet à l'utilisateur de parfaitement créer le design qu'il souhaite.

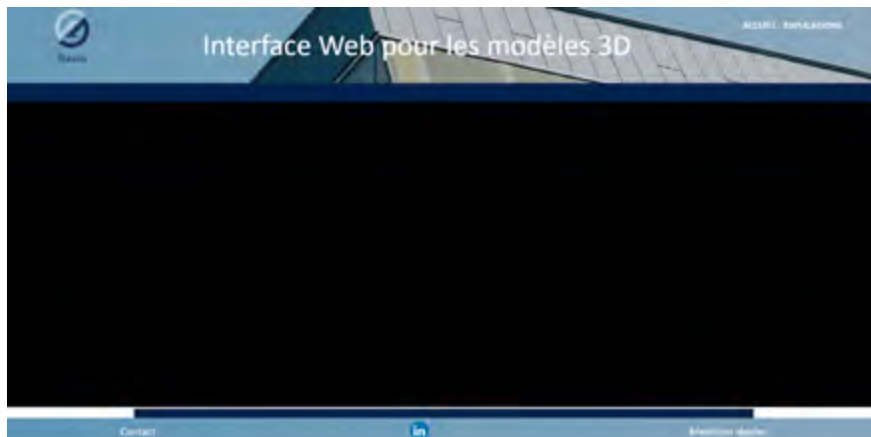


Fig 2: Aperçu du Design réalisé avec les langage HTML5 et CSS

b. Une page Web interactive

Une fois que la planche de la page web a été créée, il faut la rendre interactive. Pour cela, le langage informatique JavaScript est employé. Il permet d'incrémenter des mécanismes plus concrets sur la page afin de la rendre dynamique.

Pour le contenu 3D qui sera ajouté à la page, il faut coupler le langage Javascript avec une API (Application Programming Interface) qui se nomme WebGL. Cette API Javascript permet de créer des graphiques 2D et 3D dynamiques.

Cependant cette API reste assez limitée, pour le type de fonctionnalité que nous souhaitons ajouter sur la page, elle n'est pas suffisante, il faut donc la coupler avec la bibliothèque Javascript ThreeJS.

Concrètement, cette bibliothèque permet d'utiliser le WebGL dans un canvas HTML5.

Au premier abord, on pourrait croire que la zone noire qui apparaît sur la *figure 2* n'est qu'un simple carré noir mais il s'agit en réalité du canvas HTML5 mentionné plus tôt. Le canvas est la boîte 3D qui va accueillir notre objet 3D. Il est un composant créé grâce au langage HTML mais il deviendra fonctionnel et dynamique grâce au Javascript et de sa bibliothèque ThreeJS.

L'avantage d'utiliser ce type de bibliothèque est qu'aucune installation de plugin n'est nécessaire donc le rendu sera disponible directement sur les navigateurs pour les clients.

c. Création de la scène 3D

Pour pouvoir afficher la scène dans le canvas il faut d'abord régler différents paramètres :

- La scène et les meshes: qui caractérise le cadre et les objets 3D que nous souhaitons afficher.
- La caméra : celle-ci est importante puisqu'elle rend l'expérience plus ou moins immersive selon le choix qui est fait. En effet, le champ de vision de l'utilisateur sur l'objet 3D est limité à la caméra qui est caractérisée par 5 paramètres qui déterminent le type de projection graphique, la hauteur, largeur et la profondeur du champ de la caméra.
- La lumière : Différents types de lumières peuvent être choisis selon la couleur de celle-ci et la position de la source. Un principe informatique est utilisé de manière à rendre la lumière réaliste.

- Le moteur de rendu : ce dernier est le plus important puisqu'il va tout afficher dans le canvas HTML. Il produira une image à chaque fois que l'écran est rafraîchi, en d'autres termes, c'est celui qui donne vie à l'animation.

d. Mise en place de la visite virtuelle et des outils

Au premier abord, l'utilisateur aura accès au modèle 3D dit en « maison de poupée » comme montré sur la figure 3. Cela lui permettra d'avoir une vue d'ensemble du monument.

Cependant pour créer l'illusion de visite, un outil sera incrémenté pour projeter l'utilisateur à l'intérieur du monument où il aura une vue à 360° et pourra se déplacer à l'aide de flèches.



Fig 3: Modèle "maison de poupée" du monument

L'objectif est également de créer des outils pour rendre la visite plus interactive :

- Un outil de mesure permettra de donner un ordre d'idée à l'utilisateur de la longueur de l'objet qu'il souhaite analyser. Un pointeur permettra de pointer le premier point puis le second et la mesure de longueur s'affichera.
- Un autre outil est prévu d'être ajouté à la plateforme, il s'agit d'un outil de visualisation avant/après. Dans le cas où des données 3D seraient disponibles à deux époques différentes, il serait intéressant de pouvoir les comparer. Pour cela un curseur serait incrémenté sur la page et permettrait de passer d'un nuage à l'autre en le faisant glisser.

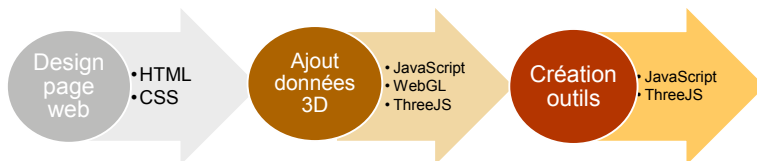


Fig 4 : Résumé du processus de création de l'interface 3D

4. Conclusion

Lors de ce projet, le but était de réaliser une interface Web qui permettrait au grand public d'avoir accès à une visite virtuelle à distance d'un monument.

Pour cela, il a d'abord fallu analyser les étapes d'acquisition et de traitement pour aboutir à un modèle 3D satisfaisant qui sera adapté à l'incorporation sur le Web. Pour cela, plusieurs tests ont été réalisés sur l'échantillonnage et le maillage avant d'aboutir au meilleur résultat.

Ensuite la page web a dû être créée. Le design a d'abord été mis en place avant que les fonctionnalités soient ajoutées. Le modèle 3D a été incorporé dans le canvas de la page et les outils permettant la visite immersive ont été créés grâce au Javascript.

Dans le cadre de mon projet, un monument historique a été présenté, mais l'avantage de cet outil web est qu'il sera disponible pour d'autres types de chantiers et que les clients pourront toujours avoir un aperçu 3D facile à manipuler.

Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique optimisée pour l'acquisition et le traitement d'images issues de capteur type « GoPro » au sein d'un bureau d'études pluridisciplinaire



PFE présenté par : Valentin Barlaud
Société d'accueil : CAUROS
Directeur de PFE : Sylvain Pagoaga
Correcteur : Emmanuel Alby



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le bureau d'études pluridisciplinaire Cauros regroupe 5 pôles avec des compétences variées dans le domaine de la mesure et de l'aménagement du territoire. Cette société maîtrise les méthodes d'acquisition telles que la tachéométrie, la lasergrammétrie et depuis peu, la photogrammétrique aérienne par drone. Afin de traiter les images aériennes, l'entreprise s'est dotée du logiciel RealityCapture.

La modélisation 3D à partir d'images terrestres présente de multiples avantages et de nombreuses entreprises proposent des solutions logicielles intégrant des algorithmes de calculs photogrammétriques. En effet, cette méthode d'acquisition d'images terrestres est particulièrement intéressante par son efficacité et sa simplicité. Il s'agit d'utiliser une caméra d'action fixée à une perche de 3 mètres comme le décrit [Gonçalves et al., 2016]¹. L'intégralité du système permet de contourner les inconvénients de la photogrammétrique terrestre, c'est-à-dire de pallier au manque de recouvrement entre les clichés qui gêne la corrélation d'images.

Dans l'optique d'améliorer les processus d'acquisitions, la société s'est équipée d'une de ces caméras : la GoPro Hero Black 9. L'appareil a fait l'objet d'essais dans différents cas d'études. Cet outil a été choisi pour sa méthode d'acquisition rapide. Cependant, des problèmes sont intervenus lors de la phase de traitement : les durées de calculs de nuages de points denses et de génération d'ortho-images sont chronophages. Cette problématique freine nettement l'utilisation de ce système en tant que méthode d'acquisition.

Le premier objectif de cette étude est la mise en place d'une chaîne de production optimisée à partir de ce capteur. Puis, une fois cela exécuté, il sera possible de comparer ces méthodes aux méthodes traditionnelles en termes de rendement et de précision. Enfin, les rendus proposés par cette technique nous permettront de définir les types de travaux les plus propices à son utilisation.

2. Mise en place d'un protocole d'acquisition

2.1. Choix du logiciel de traitement :

Des logiciels de traitement photogrammétriques ont été développés afin de favoriser l'utilisation de la méthode citée précédemment. C'est le cas de GeoSnap et de PhotoSurvey, deux logiciels respectivement développés par les entreprises françaises Sogelink et Geopixel. En contactant ces entreprises, elles nous ont livré le fonctionnement de leurs solutions qui sont différentes sur plusieurs points.

➤ Geosnap

Il s'agit d'une plateforme SaaS (Service as a Software) en ligne. L'utilisateur y dépose les images et les coordonnées des points de calage pour récupérer un nuage de points dense géoréférencé. Le logiciel effectuant les calculs est Agisoft Metashape. En ce qui concerne la phase d'acquisition, il est

¹ Gonçalves, J. & Moutinho, Ó. & Rodrigues, A.. (2016). POLE PHOTOGRAMMETRY WITH AN ACTION CAMERA FOR FAST AND ACCURATE SURFACE MAPPING. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B1. 571-575. 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-571-2016.

recommandé d'utiliser le mode capture d'image toutes les deux secondes. Pour le géoréférencement, des cibles codées sont disposées sur la scène a posteriori de l'acquisition. La distance maximale séparant celles-ci doit être de 35 mètres. Une fois les coordonnées obtenues, une dizaine de photos de ces cibles sont prises afin de les recalcr dans la scène.

➤ PhotoSurvey

Geopixel est un logiciel de traitement photogrammétrique installé en local sur un ordinateur. Le mode d'acquisition conseillé est l'enregistrement d'une vidéo en 4K, format 4:3 avec un objectif large. Le logiciel s'occupe de segmenter la vidéo. Les points de calage sont marqués au sol et doivent être séparés d'une distance de 20m maximum. La tâche du pointage est manuelle.

Les logiciels de traitement photogrammétrique ont été comparés en excluant la solution Geosnap. En effet, son mode de fonctionnement n'est pas une solution envisageable pour l'entreprise à cause de sa politique d'hébergement des données. Ainsi, seuls les logiciels Metashape, Pix4D et RealityCapture ont été inclus dans cette étude. Le temps de traitement, la précision, la qualité des rendus mais aussi le niveau de contrôle des paramètres ont été des caractéristiques importantes pour le choix du logiciel. Le traitement consiste à générer un nuage de points dense ainsi qu'une ortho-image.

Cette comparaison a été effectuée à partir d'un même jeu de données dont l'objet d'étude est une large avenue. Cet environnement n'a pas été choisi au hasard, il regroupe des caractéristiques ne favorisant pas des conditions optimales de levés : la voirie occupe une largeur de 10 mètres, ce qui ne permet pas d'assurer un bon recouvrement transversal. De plus, la fréquence de passage des usagers automobiles et piétons ajoute également une difficulté de reconstruction.

Nous avons opté pour le mode d'acquisition en vidéo 4K afin de l'intégrer dans PhotoSurvey. La caméra a été positionnée au bout d'une perche de 3 mètres, avec un angle d'inclinaison par rapport au sol de minimum 40°. Pour le géoréférencement, des points de calage ont été marqués au sol avec de la peinture. La distance maximale à respecter entre ces marques étant de 20 mètres, nous nous sommes basés sur un total de 12 points. À cela, nous avons ajouté 3 points de contrôle au milieu de la chaussée car, même s'ils ne sont pas intervenus dans le calcul, ils ont permis de définir la précision du calcul photogrammétrique au niveau de l'axe de la route. Les coordonnées de tous ces points sont obtenues par mesures GNSS.

Les données ont été traitées à partir d'un même ordinateur dans les mêmes conditions pour chaque logiciel. Cependant, pour Photosurvey, le traitement des données a été effectué sur un ordinateur différent avec des performances supérieures car le logiciel ne possède pas de version test. Pour cela, les données récoltées ont préalablement été envoyées à un commercial de l'entreprise. La première étape consiste à segmenter la vidéo en images toutes les deux secondes. En sachant que Metashape ne possède pas cet outil-là, un autre logiciel a effectué ce procédé.

	Photosurvey	Metashape	Pix4D	RealityCapture
Images alignées	762/762	254/254	0/254	254/254
Précision GCP (cm)	3,0	0,5		1,0
Précision test points (cm)	-	3,9		2,6
Temps traitement total	3h24	3h20		1h55

Tableau 1 : comparaison des calculs en mode image vidéo 4K

D'emblée, nous pouvons écarter le logiciel Pix4D avec lequel nous n'avons pas pu réaliser l'orientation. Pour PhotoSurvey, des photos supplémentaires étaient nécessaires afin de consolider le recalage. De plus, l'interface logiciel proposé par Geopixel et son niveau de contrôle sont largement réduits. Il est destiné à une utilisation pour le grand public. Nous nous sommes donc attardés sur l'analyse comparative entre Metashape et RealityCapture. En termes de temps de traitement, il y a un net avantage pour RealityCapture qui offre un calcul rapide. L'exactitude est semblable pour les points de calage, dépendant de la précision du pointé. En revanche, l'erreur sur les points de contrôle est plus faible sur RealityCapture. En termes de qualité des rendus, Metashape propose un nuage de points bruité qui nécessite un nettoyage. Les ortho-images générées par Metashape et RealityCapture sont très proches. Ils offrent tous deux la possibilité de les générer à partir de mosaïque d'images, d'un nuage de points ou d'un modèle texturé. Un logiciel complémentaire est nécessaire pour produire une ortho-photo avec la suite logicielle GeoPixel.

Avec tous ces composants, le choix du logiciel s'est porté sur RealityCapture. Il a l'avantage d'être déjà présent dans la société donc plus facile à prendre en main par tous les collaborateurs. La

possibilité de manier facilement les nombreux paramètres de calculs est également un élément à prendre en compte, ce qui en fait un logiciel complet.

2.2. Une méthode d'acquisition adéquate

Une fois le choix du logiciel effectué, les différents objets d'étude nous ont permis d'améliorer continuellement le procédé d'acquisition. L'objectif est de créer un protocole qui construit la scène fidèlement dans la totalité des cas. Le temps de pointage des points de contrôle nécessitant un opérateur est long. La perspective d'automatiser cette étape est bien réelle grâce à l'utilisation de cibles codées. En s'inspirant de la solution proposée par Sogelink pour le traitement photogrammétrique, le géoréférencement se fait indépendamment du levé. Une première étape consiste à suivre le cheminement préalablement fixé afin de reconstruire la zone. L'étape du géoréférencement est faite plus tard en posant une cible au sol. Une dizaine de photos de chaque cible permet de recalculer ces deux relevés grâce aux points caractéristiques. Cependant, RealityCapture ne réalise pas la reconstruction dans l'ensemble des cas.

La méthode d'acquisition est envisagée à partir des nombreuses solutions proposées sur le marché. De nombreux composants sont à regarder tels que le mode d'acquisition de la caméra qui propose la prise de photos ou de vidéos de différentes qualités ou formats. La phase de géoréférencement est également variable d'une méthode à l'autre en termes de points de contrôle et de la distance entre eux. Le choix final de la procédure est approprié aux algorithmes propres à chaque logiciel.

2.3. Le potentiel de l'automatisation

Les propriétés du logiciel ainsi que la méthode d'acquisition permettent d'introduire l'automatisation dans la phase de traitement. Cette dernière est divisée en plusieurs étapes avant la construction du nuage dense. L'une d'elle est chronophage et nécessite l'intervention d'un opérateur, il s'agit du géoréférencement avec le pointage des points de contrôle. Le logiciel RealityCapture développe la détection de cibles de manière automatique. Outre la dispense de l'étape de pointage, la précision du positionnement est améliorée car les erreurs humaines sont éliminées.

Le logiciel RealityCapture propose également la mise en place de batchs exécutant les commandes successives automatiquement. L'établissement d'un script optimisé offrira la possibilité d'automatiser le traitement à partir d'une méthode d'acquisition bien définie. Le risque lié à cette automatisation est l'intégration d'erreurs entraînant une mauvaise reproduction de la scène. Un script permettant d'écarter ces erreurs avec les outils proposés par le logiciel est à l'étude. À travers les différents objets d'études considérés, ce script est développé pour fonctionner dans l'intégralité des cas si la méthode d'acquisition est respectée. Ce travail rend accessible cette méthode d'acquisition à de nombreux corps de métier présents dans l'entreprise.

3. Les domaines d'application de cette technique

Les rendus et la précision résultant de cette technique d'acquisition conviennent à différentes applications au sein du bureau d'études malgré les quelques limites qu'elle peut présenter.

3.1. Plans topographiques :

La génération d'une ortho-image offre l'opportunité de numériser un environnement urbain en 2 dimensions. Le nuage de points apporte une référence altimétrique au projet. Les facteurs ayant un impact sur la précision des résultats sont le nombre de points de calage et leur méthode de relevé. Nous pouvons imaginer qu'un point de calage mesuré au GNSS aura une précision de 2 à 3 cm. Différents types de plans, suivant la scène, peuvent être produits :

➤ Plans de Corps de Rue Simplifié (PCRS)

Suivant la précision exigée par ce dernier, cette méthode s'adapte parfaitement à l'environnement urbain pour la représentation en deux dimensions. Elle a néanmoins montré ses limites lors de la présence de végétation.

➤ Récolement de réseaux :

Suite à la détection de réseaux, un levé photogrammétrique peut se substituer à la tachéométrie. Seul un plan planimétrique est exigé pour ce type de travaux, il suffit alors d'une ortho-image géoréférencée pouvant être numérisée. En effet, cette dernière offre une visibilité nette des couleurs n'entraînant pas

d'erreur d'interprétation. De par sa rapidité d'acquisition et sa facilité d'utilisation, elle peut être utilisable également en fouille ouverte.

➤ *Plans topographiques :*

Le nuage de points nous donne des informations concernant l'altimétrie de la scène. Les outils de coupes dynamiques proposés par les logiciels de DAO permettent le pointé précis des points caractéristiques, tel que le fil d'eau sur la *figure 1* ou un muret de limite de propriété. Des projets de conception VRD peuvent être calculés à partir de ces données de précision centimétrique.

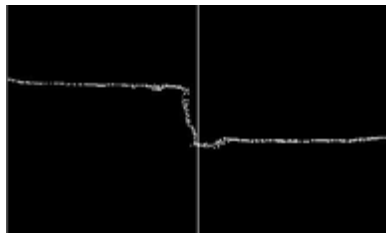


Figure 1 : Outil de coupe dynamique pour la représentation du fil d'eau d'une bordure

3.2. Travaux fonciers

Le foncier est un domaine d'activités important dans le cabinet. Ces dossiers ne peuvent être traités avec un levé photogrammétrique seulement. En effet, des éléments tels que les bornes ou les limites de propriété requièrent une précision plus élevée ne pouvant pas être assurée par cette méthode de levé. Elle peut néanmoins constituer une méthode complémentaire pour les éléments d'habillage pouvant être longs en acquisition point à point.

3.3. Urbanisme :

Avec ce type d'acquisition complet, il est possible de réaliser des insertions paysagères pour le pôle VRD ou paysagiste. Cette prévisualisation permet de juger l'intégration d'un projet d'urbanisme dans son futur environnement. La *figure 2* représente l'intégration d'un projet d'une zone de ralentissement sur un carrefour.



Figure 2 : Exemple de l'insertion d'un projet de zone de ralentissement

4. Conclusion et perspectives

Cette méthode d'acquisition présente divers avantages comparée à celles dites traditionnelles. Le temps d'acquisition est nettement diminué, remplacé par du temps de calcul ordinateur. Le logiciel photogrammétrique étant déjà présent dans l'entreprise, seul l'achat de la caméra a permis sa mise en place. De plus, cette méthode d'acquisition photogrammétrique est accessible à l'ensemble des collaborateurs.

L'étude a permis de confirmer, ou non, les protocoles d'acquisitions conseillés par les différentes solutions sur le marché. Les réflexions à propos de l'organisation des GCPs, du cheminement adéquat ou encore du type de cibles ont défini des conditions optimales de relevé afin d'obtenir un meilleur rendement associé à une bonne précision. L'aboutissement de ce PFE est la rédaction du protocole d'acquisition adapté à la phase de traitement. Ce document présente la démarche à suivre afin d'obtenir un nuage de points et une ortho-image géoréférencés. Ces deux rendus offrent diverses possibilités dans de nombreux domaines du cabinet.

RealityCapture étant un logiciel récent, de nombreuses fonctionnalités sont en cours de développement pour la détection de cibles ou l'intégration de scripts Batch. Le suivi de ces nouveaux outils engendre l'amélioration constante du traitement sur le logiciel. La solution de positionnement de la caméra en temps réel à l'aide d'un GPS diminuerait le temps d'acquisition. Son utilisation n'a pas été retenue dans ce mémoire car c'est une solution trop onéreuse par rapport aux coûts engendrés d'un récepteur GNSS combiné à un inclinomètre. Toutefois, si la méthode venait à se démocratiser au sein de l'entreprise, cette solution pourrait être envisageable pour son gain de temps.

Intégration des éclairages et mobiliers urbains dans une modélisation 3D au service de la réalité virtuelle :

Scénario de la « Steintorplatz » d'Hanover

PFE présenté par : **Emma Richard**
Société d'accueil : **Virtual City System**
Directeur de PFE : **Lutz Ross**
Correcteur : **Mathieu Koehl**
Encadrant : **Mathieu Koehl**



Pour des raisons de confidentialité, seuls les éléments déjà existant sur cette place seront visibles et mentionnés dans ce document et non ceux du projet architectural.

Objectifs du projet

Le développement de la réalité virtuelle au cours des dernières années a eu un impact sur de nombreux domaines y compris dans celui de la topographie et plus précisément de la cartographie virtuelle. Cette approche de la modélisation du monde qui nous entoure permet aux utilisateurs de cartes virtuelles de découvrir une nouvelle échelle et une nouvelle façon de s'immerger dans un lieu. De plus en plus d'outils existent pour retranscrire fidèlement la réalité, mais aussi pour pouvoir planifier différents projets de manière à avoir une idée précise du rendu que ce dernier peut avoir.

Cette étude concerne un projet commandé par la ville d'Hanovre en Allemagne. Il a pour but de visualiser différents lieux emblématiques de la ville d'Hanovre en y intégrant des scénarios d'éclairages réalistes. Le projet est réalisé en partenariat avec un cabinet d'architecture qui a pour objectif le traitement de la place centrale de « Steintorplatz ». L'idée serait de fournir une visualisation 3D de cette dernière dans laquelle l'utilisateur pourrait se sentir en totale immersion. Pour cela, l'outil qui va être utilisé lors de ce projet de fin d'études est celui de la réalité virtuelle. Possédant de nombreux avantages, cela permettra de fournir aux clients de Virtual City System une visualisation de cette place en 3D avec une liberté de déplacement et d'interaction plus forte qu'avec une visualisation 2D classique en cartographie. De plus, il existe certes aujourd'hui certains logiciels de modélisation 3D d'éclairages, mais l'entreprise cliente n'est pas pleinement satisfaite des rendus qu'ils fournissent et a entre autres, pour cette raison mentionné la réalité virtuelle pour une visualisation plus réaliste. Enfin, l'entreprise Virtual City System bénéficiera d'un nouveau service à proposer à leurs utilisateurs en leur permettant de consulter un workflow sur l'intégration des éléments 3D créés avec leur publisher dans le logiciel de Game Engine *Unreal for Engine*.

Méthodes utilisées et expérimentations

Le principal logiciel utilisé pour mener ce projet est le logiciel *Unreal for Engine* équipé du plug-in de Cesium ion : *Cesium for Unreal*. Ce logiciel a pour fonction de faciliter l'intégration d'éléments de SIG dans les logiciels de Game Engine comme Unreal. Lors de ce projet nous découvrons et abordons les fonctionnalités de ce dernier pour les appliquer au scénario de Hanovre. Ce qui a rendu d'autant plus intéressant le travail avec cette plateforme, est sa nouveauté et ses fonctions inédites. Cesium for Unreal n'a été développé qu'en mars 2021. Il s'agit donc d'un logiciel très récent, d'autant plus qu'au cours du projet une nouvelle mise à jour est sortie en mai 2022 permettant l'intégration de nouvelles données.

Intégration des données au format CityGML

La première étape consistait à intégrer les données 3D qui concernent le terrain, les bâtiments et la végétation. Cette étape a pu facilement être réalisée. Néanmoins, il existe encore des limites quant à l'intégration de tous les formats SIG dans le système de Cesium. C'est pourquoi avec l'équipe informatique de Virtual City System, un convertisseur de données 3D SIG a été codé pour pouvoir facilement intégrer les données qui concernent le terrain, les bâtiments et la végétation dans le logiciel tout en concernant les paramètres de texturage de ces derniers.



Figure 1 : Terrain, bâtiment et végétation dans Unreal

Intégration du mobilier urbain

La deuxième partie du projet concerne l'intégration des éléments de détails de la place à savoir le mobilier urbain ainsi que certaines photogrammétriques plus précises. Ces éléments peuvent être facilement intégrés dans le logiciel de Game Engine.

Nous avons néanmoins rencontré des difficultés quant à leur intégration par rapport au nombre de polygones de leur modèle maillé. En effet, les logiciels de Game Engine ne sont pas conçus de base pour insérer des éléments aussi lourds en données. C'est pourquoi il faut réussir à optimiser la précision requise avec ce que l'on appelle des niveaux de détails. Cette notion est commune dans le monde de la topographie et s'applique aussi dans celui du jeu vidéo. Il s'agit de faire varier le nombre de polygones en fonction de la distance à laquelle l'objet se situe de l'utilisateur. En ce qui concerne ces niveaux de détails de nouvelles fonctionnalités de *Unreal for Engine 5* permettent à l'utilisateur d'automatiser certains traitements et de moins se préoccuper des niveaux de détails un par un. Malgré ces avancées d'Unreal, certains modèles maillés demeurent trop lourds pour avoir un rendu acceptable. Sur la page suivante se trouve l'exemple de l'intégration du modèle maillé d'une fontaine acquise par photogrammétrie. A gauche on peut voir l'intégration de ce modèle dans le logiciel de Game Engine lorsqu'il était composé de 1 500 000 polygones. Grâce au logiciel *Meshlab* permettant la réduction du nombre de polygones, nous avons néanmoins pu aisément pallier ce problème et réduit le nombre de polygones jusque 60 000. Ce modèle, bien que toujours conséquent chargeait correctement dans Unreal et donne le rendu que l'on voit sur la figure de droite.



Figure 2 : Intégration dans Unreal du même modèle maillé de 1.5 million à 60 000 triangles

En ce qui concerne l'intégration du mobilier urbain, celui qui nous a particulièrement intéressé lors de ce projet concerne les différents luminaires de la place. Pour ces derniers, il est possible d'intégrer de façon similaire à la fontaine des modèles 3D pour leur représentation mais il a fallu trouver une autre solution pour l'intégration des informations photométriques associées à chaque luminaire. Pour détailler, l'intégration de plusieurs modèles 3D est largement faible avec les outils de SIG classique grâce à *Cesium for Unreal*. Il suffit pour cela en amont de préparer un fichier qui concerne tous les lampadaires en connaissant leurs coordonnées. Cependant, concernant les lumières, pour les modéliser sur Unreal, on utilise un acteur qui s'intitule « *Point Light* » auquel est associé un fichier photométrique au format IES file dans Unreal. Ce type d'entité n'est pas quelque chose de répandu dans les logiciels de SIG classique et il a donc fallu trouver un moyen de dupliquer ces lumières dans Unreal pour ne pas avoir à les placer chacune à la main lors de la conception.

La solution retenue pour ce problème consiste à utiliser l'outil de code d'Unreal : les *Blueprints*. Ces derniers permettent de créer différents acteurs dans la plateforme et de leur associer un code et des actions à exécuter lors du lancement du jeu. Cette façon de coder est très visuelle et accessible pour les personnes non expérimentées. Le *Blueprint* mis en place dans ce projet permet à l'utilisateur avec un fichier des coordonnées de chaque lampe au format csv, de les dupliquer lors du jeu à leur place.

Lors des manipulations précédentes, il a aussi fallu apprivoiser les outils de géoréférencement de *Cesium for Unreal*. Dans la plateforme, il existe un système de coordonnées dont on peut définir l'origine avec ses coordonnées en WGS84. Mais ensuite, puisque les données terrain sont quant à elles intégrables depuis la mise à jour de mai, les données que l'on intègre peuvent être traitées dans le système du terrain, en l'occurrence il s'agissait du système de projection allemand EPSG : 25832. Pour faire le lien entre le système allemand et celui de Cesium, nous avons dans ce projet créé un système local arbitraire. Toutes ces manipulations sont traitées en détail dans le rapport où l'on revient également sur certaines notions de base de géodésie.

Utilisation du Game Engine pour renforcer la réalité virtuelle

Enfin le dernier aspect de ce projet concerne les traitements possibles avec Unreal pour renforcer cette impression d'interaction et d'immersion que procure la réalité virtuelle. Pour cela nous avons travaillé sur deux aspects :

- L'interaction avec l'utilisateur :

Cela concerne les fonctionnalités qui se rapprochent plus d'options que l'on retrouverait dans les jeux vidéo pour renforcer l'interaction avec l'utilisateur. Pour ce faire, nous avons notamment intégré

différents points de vue, l'un par exemple où l'utilisateur peut animer un personnage. Nous avons aussi mis en place un menu qui permet d'accéder à différents scénarios et à l'utilisateur de choisir dans lequel il souhaite se rendre.

En ce qui concerne le projet des architectes, nous avons aussi réussi à coder une option qui permet à l'utilisateur de « *switcher* » entre la situation actuelle de la place d'Hanovre et le rendu qu'elle devrait avoir après les constructions des architectes.

Enfin l'utilisateur peut aussi agir sur la position du Soleil en choisissant l'heure de la journée à laquelle il veut observer la place. Lors du niveau qui concerne la visualisation nocturne, il lui est possible de faire varier l'intensité des lampadaires.

- L'immersion de l'utilisateur

Cette partie concerne plutôt tout le travail qui a été réalisé pour essayer d'obtenir un rendu fidèle à la réalité. L'univers du jeu vidéo a considérablement évolué et le réalisme que l'on peut obtenir est saisissant. Néanmoins dans le cadre de ce projet, étant des débutants, nous n'avons pas pu atteindre un résultat aussi esthétique que celui d'un designer de jeu vidéo. Cependant, de nombreux tutoriels existent et nous ont permis de créer des matériaux, faire couler de l'eau dans la fontaine de la place ou dans la rivière, changer la météo pour un ciel étoilé, un ciel pluvieux ou ensoleillé... Toutes ces manipulations renforcent le sentiment d'immersion de l'utilisateur.



Figure 3 : Visualisation de la place sous la pluie et de nuit

Perspectives

L'adaptation des logiciels de Game Engine pour une utilisation architecturale et propre aux SIG témoigne de ce nouveau besoin des ingénieurs topographes à renforcer l'interaction et l'immersion de l'utilisateur avec la représentation cartographique.

Étant donné que les logiciels manipulés avaient des mises à jour très récentes, nous pouvons alors envisager de nombreuses perspectives pour l'avenir des SIG. Combiner l'optimisation des rendus des jeux vidéo avec la cartographie 3D permettrait à l'avenir de restituer des représentations réalistes et larges du monde qui nous entoure. Des améliorations concernant l'intégration d'un maximum de formats de SIG peuvent être développées, mais à l'avenir, il sera intéressant de trouver des solutions optimisées pour l'intégration des données photométriques dans un tel projet. Ce projet de fin d'études détaille en effet un *workflow* dans ce but, mais ce dernier, malgré le fait qu'il fonctionne, demeure compliqué et est freiné par le manque d'options permettant d'optimiser l'intégration de plusieurs fichiers photométriques dans le logiciel de Game Engine.

Optimisation du traitement des données aériennes LiDAR : ajustement interbandes et géoréférencement

PFE présenté par : **Donavan Labbe**
Société d'accueil : **ATGT Géomètre-Expert**
Directeur de PFE : **Romain Salicis**
Correctrice : **Tania Landes**
Encadrante : **Louise Thirard**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le groupe ATGT est un groupe français fondé en 1947. Ce projet de fin d'études (PFE) s'est déroulé au sein de l'agence ATGT Géomètre-Expert de Lyon dans le service Grands Comptes. Ce service s'occupe de tous les projets de grande ampleur qu'ATGT GE réalise en France et à l'étranger. Ces projets s'articulent principalement autour des missions de « mobile mapping » (MMS), de LiDAR aérien (ALS) et de photogrammétrie aérienne. Depuis presque 10 ans, ATGT répond à des appels d'offre de collectivités ou d'entreprises privées en France et à l'international pour des relevés LiDAR aérien. Afin de répondre à une forte demande de prestations de données spatiales de masse, ATGT a acquis en 2013 un système LiDAR aérien de haute performance : le *Galaxy ALTM T1000* du constructeur *Teledyne Optech*.

Actuellement, l'agence traite les données aériennes LiDAR sur le logiciel fourni par le constructeur : *Lidar Mapping Suite (LMS)*. Ce logiciel présente de nombreux paramètres pour le traitement du LiDAR aérien. Si l'équipe d'ATGT maîtrise globalement l'utilisation de ce logiciel, elle souhaite mieux le connaître afin d'optimiser les temps de traitement. D'une part, un des objectifs de ce projet de fin d'études est d'analyser les paramètres proposés par *LMS* en vue d'optimiser les temps de traitement. D'autre part, l'autre objectif est de tester l'ajustement interbandes sur un autre logiciel. Le choix du second logiciel s'est porté sur *TerraSolid* car il fait partie des standards de logiciel d'ajustement de LiDAR aérien. De plus, il est déjà utilisé dans l'entreprise pour d'autres opérations.

2. Matériels et données utilisés pour l'étude

ATGT réalise les acquisitions aériennes LiDAR avec le *Galaxy T1000* du constructeur *Teledyne Optech*. Il s'agit d'un système composé d'une unité de mesure laser incluant l'émetteur et le récepteur, d'un système de déflection à miroir rotatif, d'un récepteur GNSS différentiel (DGNSS) et d'une plateforme inertielle (INS) embarqués.

Durant ce projet de fin d'étude, deux projets déjà traités par ATGT ont été étudiés.

Dans un premier temps, un projet LiDAR en Ile-de-France a permis d'effectuer la première partie des tests des paramètres du logiciel *LMS*. Ce projet comporte quatre-vingt-neuf lignes de vol acquises à environ 1000 m au-dessus du sol. Afin de réduire les temps de calculs, deux bandes voisines se chevauchant ont été utilisées. Ces lignes ont été sélectionnées car elles comportaient différents types d'occupation de sol comme des zones artificialisées (urbaines), zones agricoles et zones forestières. Ce premier projet a une densité de 15 pts/m² par bande pour un recouvrement latéral entre bandes de 25 %.

Dans un second temps, seize des cent quinze bandes acquises dans un projet LiDAR réalisé en Côte d'Ivoire ont été sélectionnées pour la suite des tests. Il s'agit d'un projet où il y a eu des difficultés d'ajustement interbandes lors du traitement. C'est pourquoi ce projet a permis de poursuivre les tests de *LMS* et la réalisation de l'intégralité de l'étude de *TerraSolid*. Le but est de comprendre la cause des problèmes rencontrés. La hauteur de vol moyenne est d'environ 400 m au-dessus du sol. La densité est de 23 pts/m². Le recouvrement latéral entre bandes est de minimum 20 %.

Pour les deux projets, les données de trajectographies enregistrées par le système de géoréférencement direct embarqué ont déjà été post-traitées dans le logiciel POSPac et mises à disposition pour ce PFE. Les données de trajectoires de l'avion comprennent les valeurs des trois angles : roulis, tangage et lacet, la position XYZ ainsi que l'horodatage (temps) de chaque position de l'avion.

3. Principe général du traitement

Après le post-traitement des données de trajectoires de l'avion, deux grandes étapes de traitement sont réalisées : la calibration du système (voir paragraphe 3.1) et l'ajustement interbandes (voir paragraphe 3.2). Le principe général du traitement est présenté dans la Figure 1.



Figure 1 : Processus général d'ajustement interbandes et de géoréférencement des données aériennes LiDAR

3.1. Calibration du système

Une première phase de calibration du système est réalisée par le constructeur *Teledyne Optech* en laboratoire qui définit les valeurs initiales du système LiDAR.

Une deuxième phase de calibration est réalisée in situ. En effet lors d'un projet LiDAR, un vol de calibration doit être systématiquement effectué. Ce vol de calibration doit respecter la procédure définie par le constructeur. La deuxième phase de calibration a pour but de corriger les valeurs initiales définies par la première phase de calibration réalisée par le constructeur. En effet, des corrections sont apportées car il y a toujours des défauts qui diffèrent entre chaque projet. Les défauts représentent le décalage angulaire entre le scanner et la centrale inertielle (en anglais *Inertial Navigation System (INS)*) selon les trois axes : roulis, tangage, lacet (Figure 2), des défauts spécifiques au système comme la position entre l'origine du système laser et l'antenne GNSS et l'effet de surélévation verticale des points engendré par le scanner.

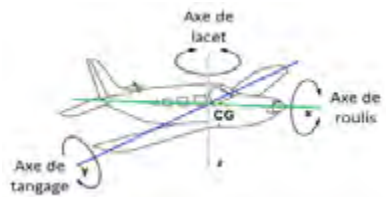


Figure 2 : Angle de rotation de l'INS (@Les Aviatrices - Eklablog)

Cette seconde phase de calibration a été effectuée sur le logiciel *LMS*, seul logiciel permettant de calibrer les paramètres spécifiques du *Galaxy T1000*. D'autant plus que le manuel de *TerraSolid* explique que les nuages de points à ajuster doivent être calibrés préalablement à l'aide du logiciel constructeur car ces paramètres ne peuvent pas être corrigés dans *TerraSolid*. Une carte de différence de hauteur est générée par *LMS* avant et après la phase de calibration du projet permettant de comparer et de valider la calibration. La carte de différence de hauteur est un raster ayant dans chaque pixel les écarts verticaux des points de bandes différentes dans les zones de chevauchement.

3.2. Ajustement interbandes

La seconde étape est l'ajustement interbandes (en anglais *matching*) correspondant aux quatre dernières phases du processus de traitement décrit dans la Figure 1. Alors que la seconde calibration permet d'affiner les valeurs de calibration du système pour l'ensemble d'un projet LiDAR, il apparaît toujours des erreurs dans les recouvrements interbandes. Les éléments détectés dans chaque bande voisine vont être utilisés pour effectuer une réduction des écarts entre éléments homologues et procéder à une auto-calibration, c'est-à-dire apporter des corrections sur les paramètres de calibration et des données de trajectoire individuellement sur les bandes.

4. Etude des logiciels d'ajustement interbandes

Dans cette partie, l'étude des logiciels s'est concentrée sur l'étape 2 d'ajustement interbandes.

4.1. Lidar Mapping Suite (LMS)

Le logiciel LMS se base sur la méthode d'ajustement par appariement de géométries planes en cinq phases. LMS détecte automatiquement des plans 3D dans les nuages de points de chaque bande (phase 1). Ensuite le plan extrait dans une bande est comparé à son (ou ses) potentiel(s) plan(s) homologues(s) détecté(s) dans les bandes voisines pour être définis comme étant un plan de jonction (phase 2). A la suite de cela, les plans de jonction sont sélectionnés sur plusieurs critères comme l'écart de distance entre plans homologues, le nombre de points le définissant (phase 3). Pour chaque itération de l'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*), des corrections différentes sur la trajectoire et sur les paramètres de calibration sont apportées sur chaque ligne permettant de minimiser les écarts entre les plans homologues sélectionnés (phase 4). Pour finir, le logiciel recalcule la position des points géoréférencés avec les nouveaux paramètres (phase 5). Le logiciel propose de nombreux paramètres pour les quatre premières phases.

Durant la première partie des tests sur LMS, une dizaine de tests ont été réalisés sur les phases de détection de plans, de détermination et de sélection de plan de jonction. Dans la deuxième partie des tests de LMS, quatre tests avec divers paramétrages d'auto-calibration ont été menés en s'appuyant sur les valeurs optimales validées dans les trois précédentes phases.

4.2. TerraSolid

Etant utilisé dans l'entreprise pour d'autres d'applications, ATGT a souhaité étudier les possibilités qu'apportent TerraSolid dans l'ajustement interbandes. Le logiciel TerraSolid avec le module TerraMatch propose de choisir entre deux méthodes d'ajustement : la méthode de surface à surface et la méthode par ligne de jonction. Néanmoins avant de choisir l'une des méthodes, une classification des points représentant le sol et les bâtiments est requise. La méthode de surface à surface se base sur l'appariement de TIN (*Triangulated irregular network*) créé sur chaque bande dans les classes « sol » et « bâtiment » et déduit les corrections à apporter sur les données de trajectoire par itération. Avec la méthode par ligne de jonction, des lignes détectées automatiquement sur chaque bande sont appariées afin de trouver les corrections à apporter sur les données de trajectoire à l'aide d'un algorithme ICP. Les corrections s'appliquent sur les données de trajectoire de l'avion (X, Y, Z, roulis, tangage, lacet).

Au total, un ensemble de six tests pour la méthode de surface à surface a pu être réalisé dans l'étude car ce sont des calculs assez longs. Pour la méthode avec les lignes de jonction, seize tests ont été établis. Tous ces tests ont été réalisés avec différents choix de corrections des paramètres de trajectoire de l'avion.

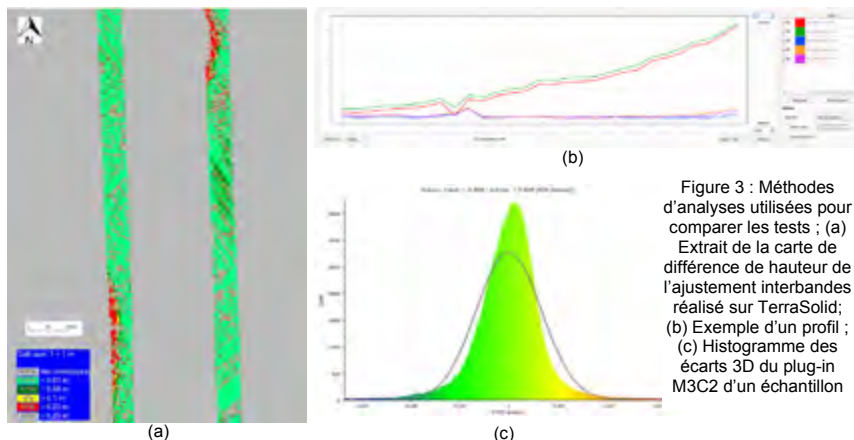
5. Méthodes d'analyses utilisées

Dans la première partie des tests sur LMS, les analyses ont été effectuées principalement sur QGIS pour comparer les tests entre eux. En effet LMS génère des fichiers « shapefile » (.shp) des géométries planes lors de chaque phase du traitement. Le choix du paramétrage optimal s'est effectué à l'aide de divers critères d'évaluation tels que la quantité, la répartition des plans dans les différents types de zones d'occupation de sol, la surface moyenne des plans... Les autres critères sont décrits dans le mémoire de PFE.

Les autres tests ont été évalués par trois méthodes (Figure 3). Ces méthodes ont permis d'écarter les mauvais tests au fur et à mesure de l'analyse et obtenir le meilleur résultat de chaque logiciel.

- La première méthode est simplement une analyse qualitative c'est-à-dire une évaluation visuelle sur une carte de différence de hauteur. En effet, un script en langage R développé lors du PFE a permis de générer une carte de différence de hauteur similaire à celle de LMS (Figure 3 (a)) pour avoir des éléments de comparaison identique entre les deux logiciels. L'analyse visuelle des cartes se base sur un échantillon de 35 zones de chevauchement de type d'occupation de sol différents (urbaine, végétation, sol nu), et de zones ayant des écarts verticaux supérieurs à 10 cm avant la procédure d'ajustement interbandes et des zones sans gros écarts verticaux particuliers avant ajustement. Ces zones servent à comparer les effets des différents tests en fonction du type d'occupation du sol.

- La deuxième méthode utilise des profils réalisés sur les cartes (Figure 3 (b)). Vingt-quatre profils ont été sélectionnés dans les échantillons pour évaluer les écarts verticaux de chaque test sur un même graphique et au même emplacement sur la carte.
- La troisième méthode consiste à quantifier plus finement des écarts de distances 3D entre les points issus de bandes différentes dans les 35 échantillons. Pour cela, un script permet d'extraire les deux nuages de points de l'échantillon correspondant au nuage d'une bande du recouvrement. Ensuite, les écarts 3D de chaque échantillon sont calculés sur CloudCompare avec le plug-in M3C2 (Figure 3 (c)). Les écarts de distances calculés suivent une distribution normale avec pour paramètres l'espérance μ et l'écart-type σ . Ces deux paramètres sont utilisés comme critère d'évaluation pour cette méthode.



	TerraSolid	LMS
Dz moyen	-1,3	-1,2
emq	5,7	3,0
Ecart-type	6,0	3,0

Tableau 1 : Contrôle absolu en Z des nuages ajustés sur un échantillon de 7 points de contrôle (unité en cm)

La dernière partie consiste à évaluer la précision absolue verticale (ou exactitude) des nuages ajustés retenus sur chaque logiciel. Le Tableau 1 présente les résultats du contrôle absolu en Z de *TerraSolid* et de *LMS* sur un échantillon de 7 points de contrôle relevés au GNSS. Les nuages ajustés sur *LMS* ont une erreur moyenne quadratique (emq) de 3,0 cm et un écart-type sur les écarts verticaux de 3,0 cm. Tandis que les nuages ajustés sur *TerraSolid* ont une emq de 5,7 cm et un écart-type de 6,0 cm. Le résultat de *LMS* est

plus exact que celui de *TerraSolid*.

6. Conclusion et perspectives

Un grand travail a été mené sur les logiciels afin de comprendre le processus de traitement de chacun. Les premières analyses des paramètres de *LMS* ont permis de proposer un paramétrage optimum des phases 1 à 3 du logiciel. Ensuite pour chaque logiciel, le meilleur résultat a été déterminé grâce aux méthodes d'analyses décrites. Le mémoire de PFE présente les résultats et les analyses de l'ajustement interbandes de chaque logiciel. La comparaison des logiciels a montré que le logiciel *LMS* reste le plus adapté et propose de meilleurs résultats d'ajustement. L'étude a montré que le logiciel *TerraSolid* n'a pas la possibilité de corriger les erreurs restantes liées au système *T1000* comme l'effet de surélévation des points en bord de fauchée. Néanmoins ce PFE a permis de démontrer les capacités et les limites de *TerraSolid* pour l'ajustement interbandes des données aériennes LiDAR.

Il serait intéressant par la suite de tester l'influence de l'utilisation de points d'appui dans l'ajustement interbandes.

Comparaison et analyse des montages juridiques possibles pour la mise en place de copropriétés utilisant les Baux Réels Solidaires (BRS)

PFE présenté par : **Maxime Baehrel**
Société d'accueil : **Gexia Foncier**
Directeur de PFE : **Rémy Escaffit**
Correcteur : **Régis Lambert**



1. Contexte de l'étude

1.1. Gexia Foncier

Fondée en 2009 à Toulouse par les associés Vincent Martinache et Jean-Christophe Nadeau, tous deux diplômés de l'ESTP Paris, Gexia Foncier n'a pas tardé à exprimer sa volonté de s'entourer d'une équipe pluridisciplinaire compétente et motivée pour accompagner au plus près ses clients dans leurs différents projets.

Depuis 5 ans, le Groupe Gexia est un acteur reconnu des grands projets de la Métropole de Toulouse (en collaboration avec la Métropole de Toulouse) et s'impose comme une nouvelle référence dans le monde des géomètres-experts. Le succès de Gexia repose sur de nouvelles relations avec ses clients, une équipe de valeur et une approche de dernière génération.

1.2. Attentes de l'entreprise

Le prix de l'immobilier n'ayant cessé d'augmenter, il en devient de plus en plus dur d'accéder à la propriété. Ainsi, il a été instauré, via l'ordonnance n°2016-985 du 20 juillet 2016, le Bail Réel Solidaire permettant de « révolutionner » cette accession. La mise en place de ce bail se fait par l'intermédiaire d'un Organisme de Foncier Solidaire (OFS) donc la création a été rendue plus facile à la suite de la loi ELAN de 2018.

Ainsi, cette méthode d'accession à la propriété étant encore très récente et prometteuse, Gexia Foncier a décidé de s'y intéresser de plus près. L'objectif de cette étude va donc être d'apprendre le fonctionnement de ces baux en profondeur pour ensuite pouvoir les intégrer au sein d'une simple copropriété ou bien d'une division en volumes.

2. Etat de l'art

2.1. La copropriété

La Loi du 10 juillet 1965 a instauré une pratique en vigueur depuis plus d'un siècle. Elle définit la copropriété comme « tout immeuble bâti ou groupe d'immeubles bâtis dont la propriété est répartie, entre plusieurs personnes, par lots comprenant chacun une partie privative et une quote-part de parties communes, lesquelles sont indissociables ». En somme, une copropriété est créée lorsqu'un immeuble abrite au minimum deux propriétaires distincts ainsi que des parties communes.

De ce fait, chacun des propriétaires devient copropriétaire de l'immeuble. En effet, chaque copropriétaire est propriétaire d'un ou de plusieurs lots privatifs (appartement, cave, garage...) ainsi

que d'une quote-part de propriété des parties communes de l'immeuble (sol, cour, toiture, escaliers, ascenseur...).

Les règles d'organisation et de fonctionnement sont décrites par le règlement de copropriété qui est divisé en deux parties (Hauts-de-Seine Habitat (2020)) :

- **L'État Descriptif de Division (EDD)** qui permet de lister les lots et les tantièmes associés
- **Le Règlement**, qui permet de définir exactement les parties privatives et communes et fixe les règles organisant la vie de la collectivité, les droits et obligations des copropriétaires ainsi que les règles de fonctionnement de la copropriété.

Une copropriété est donc divisée en plusieurs acteurs. Tout d'abord, nous avons les copropriétaires qui constituent le syndicat des copropriétaires. Ce dernier administre les parties communes et défend les intérêts des copropriétaires.

Le syndicat se réunit lors d'assemblées générales, au moins une fois par an, afin de prendre des décisions relatives à la gestion financière, administrative et technique de l'immeuble. C'est lors de la première assemblée générale que sont élus les membres du conseil syndical¹ et qu'un syndic de copropriété est mandaté.

Le Conseil Syndical assure le lien entre le syndic et l'ensemble des copropriétaires sans toutefois prendre des décisions qui empièteraient sur les pouvoirs de l'Assemblée Générale ou du Syndic. Il a un rôle consultatif et non un pouvoir de décision. Il est interrogé par le Syndic pour la passation des contrats et marchés d'entretien et pour tous les travaux urgents nécessaires à la sauvegarde de l'immeuble. Il assiste le syndic dans ces missions et sur sa gestion (comptabilité, répartition des dépenses, suivi de l'exécution du budget). L'implication des copropriétaires dans le conseil syndical participe au bon fonctionnement de l'immeuble. (Hauts-de-Seine Habitat (2020))

Le syndic, quant à lui, convoque les assemblées générales, établit le procès-verbal des délibérations et en assure la notification.

2.2. La division en volumes

La division en volumes est une technique juridique qui consiste à diviser la propriété d'un immeuble en fractions privatives distinctes, sur le plan horizontal ou vertical, à des niveaux différents qui peuvent se situer au-dessus ou en dessous du sol naturel, sans qu'il y ait de parties communes. (Daloz (2020))

La division en volumes est utilisée pour les ensembles immobiliers complexes, c'est-à-dire ceux composés de plusieurs bâtiments groupés ou distincts sur une seule dalle porteuse et entrecoupés au rez-de-chaussée par des voies ou espaces ouverts au public, pour lesquels le statut de la copropriété se révèle mal adapté.

Cette technique est également utilisée en cas de cohabitation entre le domaine public et le domaine privé sur une même assiette foncière : le statut de la copropriété se révèle alors inapplicable car il est incompatible avec le régime de la domanialité publique.

En dehors de ces hypothèses, la division en volumes peut en principe être adoptée dès lors qu'il y a division d'un immeuble sans attribution de quotes-parts de parties communes (Loi du 10 juillet (1965)). Il faut toutefois que le choix d'une organisation différente soit clairement voulu par les différents propriétaires et clairement exprimé. (Daloz (2020))

Différents actes sont nécessaires pour réaliser la division :

- L'état descriptif de division en volumes (EDDV)
- Le cahier des charges et des servitudes
- Les statuts de l'organe de gestion

¹ Le conseil syndical est obligatoire d'après la loi du 10 juillet 1965, sauf dans le cas d'une révocation de cette obligation lors de l'assemblée générale.

L'état descriptif de division en volumes est établi par le géomètre-expert et reçu par acte authentique. Il comporte une description générale de l'ensemble immobilier avec sa désignation cadastrale, la désignation de chaque volume avec sa position dans l'ensemble ainsi que son repérage dans l'espace en planimétrie et en altimétrie.

2.3. Le Bail Réel Solidaire

Les lois pour un Accès au Logement et un Urbanisme Rénové (ALUR) de 2014 et pour la croissance et l'égalité des chances économiques (loi Macron) de 2015, complétées par un dispositif législatif et réglementaire opérationnel depuis mai 2017, ont introduit un nouveau modèle d'accès sociale à la propriété : les Organismes de Foncier Solidaire (OFS) et le Bail Réel Solidaire (BRS). (Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (2019))

Les OFS tirent leur principale inspiration du Community Land Trust (CLT), organisme qui administre et gère la ressource foncière pour les générations actuelles et futures, tout en protégeant le droit d'usage des résidents. Leur principe directeur : offrir une alternative à la propriété individuelle du sol et à l'appropriation privée des plus-values foncières, source d'inflation des prix de l'immobilier et d'inégalités dans l'accès au logement et au territoire. (Zurfluh, Lebatteux, Sizaïre et Associés (2019))

Le BRS est un nouveau dispositif d'accès sociale à la propriété qui permet de baisser le coût et de garantir dans le temps la vocation sociale des logements. Ce nouvel outil de mixité sociale permet à des ménages de classes moyennes de devenir propriétaire de leur résidence principale dans les zones tendues. (Les Coop'HLM (2021))

C'est un dispositif juridique créé en 2016 qui permet à un OFS de dissocier le foncier du bâti pour faire baisser le prix des logements en garantissant un effet anti-spéculatif. C'est un bail de longue durée (18 à 99 ans) qui est « rechargeable » à chaque vente, c'est-à-dire qu'à chaque vente le nouvel



occupant bénéficiera de la durée initiale du bail. Ainsi le bien ne perd pas de valeur, même à l'approche du terme du bail. Pour pouvoir bénéficier d'un BRS, les ménages successifs doivent respecter un plafond de ressources. Le logement reste dédié à l'accès sociale dans la durée. (Les Coop'HLM (2021))

Figure 1 - Schématisation du fonctionnement du BRS et de l'OFS

En BRS, l'accédant à la propriété possède des droits réels issus du bail. Ces droits sont proches d'une pleine propriété, avec des spécificités :

- Ces droits prennent fin à l'issue du bail (jusqu'à 99 ans) sauf si le ménage revend son logement. Dans ce cas, le nouvel occupant bénéficie d'un bail renouvelé à la durée initiale.
- Le ménage est tenu d'occuper le logement à titre de résidence principale. Des conditions de mise en location peuvent être prévues par le bail mais uniquement pour de la résidence principale.
- En cas de revente ou d'héritage, le nouveau ménage doit justifier de ressources inférieures au plafond du dispositif et le prix de vente ne peut pas dépasser :
 - Le prix d'achat initial indexé de l'évolution, entre l'achat et la vente, d'un indice (par exemple l'indice du coût de la construction (ICC) ou l'indice de référence des loyers (IRL).)
 - Le plafond Prêt Social Location-Accession (PSLA) en vigueur lors de la revente.

L'OFS contrôle le respect des clauses de revente. Par ailleurs, l'OFS peut, dans certaines circonstances, racheter le logement à une valeur d'indemnisation prévue dans le bail, notamment en cas de difficultés financières du ménage. (Les Coop'HLM (2021))

3. Impact du BRS

Pour mener à bien cette étude, nous avons sollicité tous les OFS de France afin de pouvoir recueillir leur expérience sur la mise en place de ces nouveaux baux. Ainsi, sur les 11 OFS recensés de France (au moment de la prise de contact), seulement 4 d'entre eux nous ont répondu. Toutefois, ces réponses nous ont permis d'en apprendre davantage sur le fonctionnement des BRS.

Ainsi, nous avons pu constater que la mise en place des BRS au sein d'une division en volume ne s'effectue que très peu. En effet, ces derniers utilisent seulement la division en volume afin de séparer un volume contenant les futurs appartements en BRS des autres.

Cependant, nous avons pu remarquer que, du fait la récente mise en application des BRS, chaque opérateur interrogé a une vision différente de cette nouvelle méthode d'accès à la propriété. Toutefois, tous s'accordent sur le côté « révolutionnaire » de ces derniers.

Nous serons certainement amenés, dans le futur, à une évolution des BRS avec la mise en place de futurs décrets fixant ou modifiant la mise en place de ces derniers.

De plus, étant encore très récents, les retours d'expériences des OFS contactés ne sont pas ou que partiellement disponibles.

4. Application des BRS aux besoins de Gexia Foncier

Comme nous avons pu le voir précédemment, la mise en place des BRS n'affecte pas directement la partie de la division en volumes. Il pourra tout de même être indiqué dans l'EDDV la nature du volume contenant les appartements en BRS.

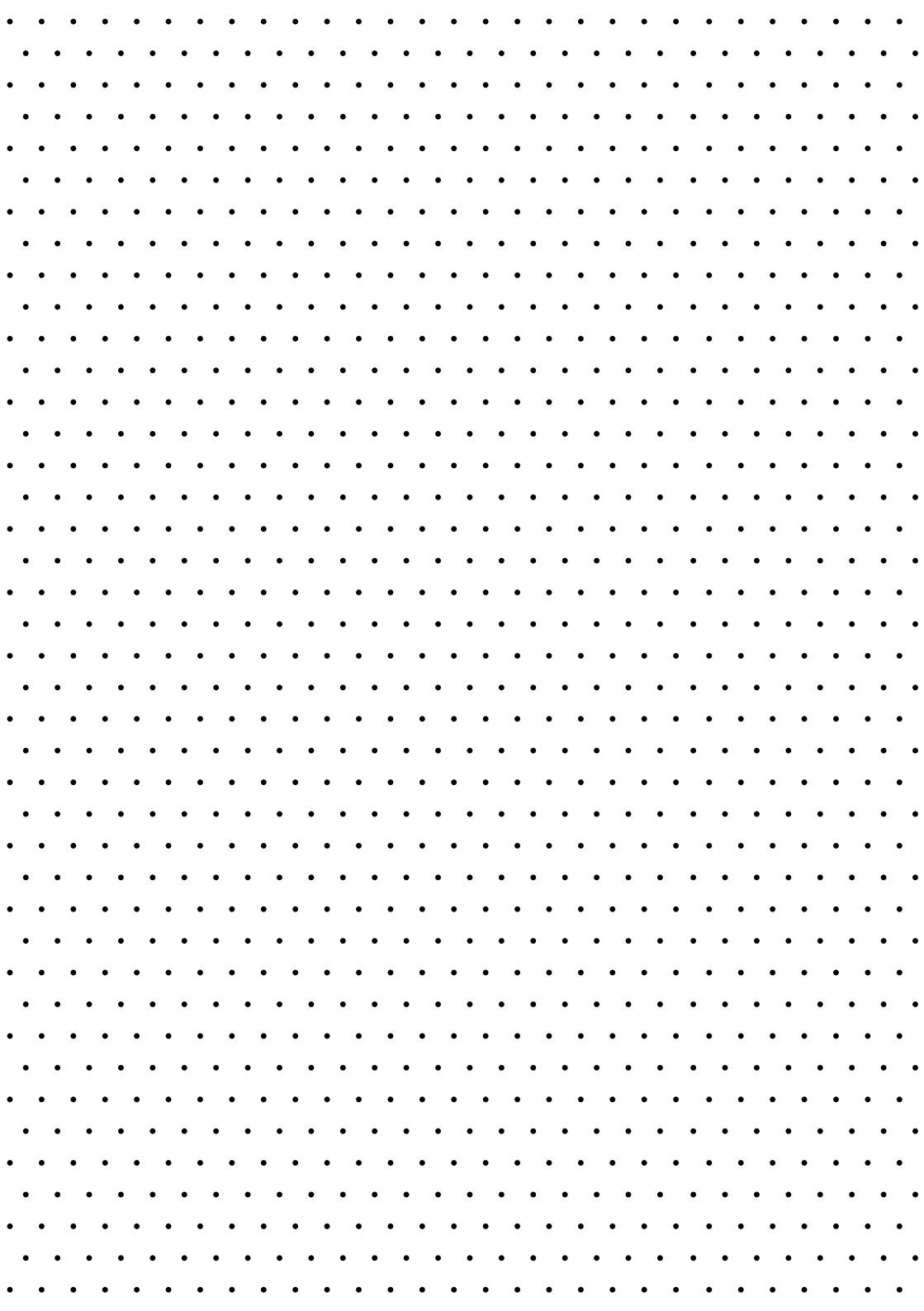
Contrairement à la division en volumes, nous pouvons observer des changements majeurs dans la mise en copropriété, comme la désignation des lots soumis aux BRS ainsi que le changement des trois majorités entrant en compte lors des Assemblées Générales définies par les articles 24, 25 & 26 de la loi du 10 juillet 1965 mis à jour par la loi ELAN de 2018.

5. Conclusion et perspectives

Ainsi, malgré la récente création des BRS, ces derniers ont réussi aussi bien à séduire les bailleurs sociaux et OFS que les potentiels futurs propriétaires. En effet, la plupart des bailleurs sociaux étant tournés vers l'accès abordable, ils se sont empressés de s'engouffrer dans cette nouvelle brèche d'accès à la propriété afin de pousser leur démarche un peu plus loin. De ce fait, la majorité des OFS créés l'ont été par des bailleurs sociaux. De plus, la baisse des prix annoncée de 25 à 30% dans la théorie est assez bien respectée comme a pu nous faire part la Manager des Projets de Rhône Saône Habitat qui informe d'une baisse bien plus conséquente de 40 à 50% moins cher que le prix du marché libre, ce qui a fait fortement augmenter l'intérêt des ménages modestes quant à l'accès via un BRS.

Du fait de la rapide et récente expansion des BRS, la société Gexia Foncier a voulu se mettre à jour afin de conquérir une nouvelle part du marché des copropriétés et ainsi acquérir la confiance des bailleurs sociaux pour des futurs projets à venir. Les BRS étant voués à évoluer, il faudra porter un œil tout particulièrement attentif aux futurs décrets pour toujours garantir un règlement de copropriété à jour.

Ceci reste un résumé concis, afin d'obtenir plus d'informations et de détails ainsi que la bibliographie, veuillez vous référer au mémoire.





Plus d'infos:

<https://topographie.insa-strasbourg.fr>

Contact

jdt2022@insa-strasbourg.fr

Avec l'aide d'Hélène Macher

Maître de conférences INSA Strasbourg

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



GÉOMÈTRE-EXPERT
CONSEILLER VALORISER GARANTIR

