

Les Journées de la topographie
fêtent leurs **20 ANS!**

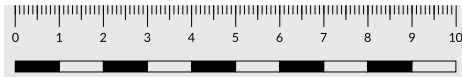
**20^e JOURNÉES
DE LA TOPOGRAPHIE**

→ DU 20 AU 22/09/2023

**CRIMINALISTIQUE
ET TOPOGRAPHIE**







SOMMAIRE

Mot du directeur	p. 4
Programme	p. 5
Salon des exposants	p. 6
Conférence : « Criminalistique et topographie »	p. 7
Les Journées de la topographie fêtent leurs 20 ans	p. 8
Ordre de passage des PFE	p. 11
Résumés des PFE	p. 17



MOT DU DIRECTEUR

Les Journées de la topographie (JDT) fêtent cette année leurs 20 ans en même temps que l'INSA Strasbourg. Cet événement de la rentrée, qui a acquis une visibilité bien au-delà de l'établissement au cours de ces années, est 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...).

C'est toujours avec enthousiasme que l'INSA Strasbourg organise les Journées de la topographie. La 20^e édition des JDT mettra en avant les soutenances de projets de fin d'études (PFE), dernière étape du parcours menant au diplôme d'ingénieur en topographie.

Les JDT seront aussi l'occasion de découvrir des entreprises du domaine lors du traditionnel salon des exposants, lieu d'échanges privilégiés entre les professionnels et les étudiants. Ces derniers, 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 « Criminalistique et topographie ». Ce thème original peut paraître au premier abord surprenant mais, dans le cadre de l'analyse d'une scène de crime, des techniques d'acquisition et de traitement utilisées en topographie sont employées par des services scientifiques de la police et de la gendarmerie. L'objectif est de pouvoir positionner dans l'espace les différents indices de la scène. Des experts présenteront lors de la conférence les techniques d'acquisition de données topographiques utilisées pour les scènes de crime.

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

En tant que directeur de l'INSA Strasbourg, je me réjouis de ce rendez-vous marquant de la communauté des topographes qui a maintenant 20 ans, le bel âge ! Je tiens à citer 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. Qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

PROGRAMME

	MERCREDI 20 SEPTEMBRE	JEUDI 21 SEPTEMBRE	VENDEDI 22 SEPTEMBRE
8 h	Accueil - salle topographie		
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE) Jury 1 (Master IRIV) salle topographie, bâtiment C	Soutenances de PFE Jury 1 salle C1.11, bâtiment C Jury 2 salle C1.15, bâtiment C Jury 3 salle C1.16, bâtiment C	Soutenances de PFE Jury 1 salle topographie, bâtiment C Jury 2 salle topographie, bâtiment C Jury 3 salle C1.16, bâtiment C
10 h	Jury 2 salle topographie, bâtiment C		
11 h	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C		
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			
14 h	Soutenances de PFE Jury 1 salle topographie, bâtiment C	Salon des exposants 13h 30 - 17h 30 salle topographie, bâtiment C	Conférence : « Criminalistique et topographie » 14 h - 16 h amphi de Dietrich
15 h	Jury 2 salle topographie, bâtiment C		
16 h	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C		Présentation du métier de géomètre-expert 16 h - 17h 30 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) 17h 30 - 20 h salle C1.16, bâtiment C	Cérémonie de clôture et verre de l'amitié 17h 30 - 19h 30 salle topographie, bâtiment C
19 h			

SALON DES EXPOSANTS

JEUDI 21 SEPTEMBRE
DE 13 H 30 À 17 H 30

Le traditionnel salon des exposants des Journées de la topographie (JDT) revient cette année au sein du laboratoire de topographie.

Nous avons le plaisir d'accueillir des entreprises de topographie à l'INSA Strasbourg. Le salon des exposants est un lieu d'échanges privilégiés entre les étudiants et les professionnels. Les entreprises exposeront leurs matériels et solutions logicielles et proposeront des offres de stages ou d'emploi (un panneau d'affichage sera prévu à cet effet).

Pour rester dans le thème des journées, criminalistique et topographie, le salon des exposants mettra en scène un jeu d'enquête qui vous proposera d'explorer les stands tout en résolvant un crime. La meilleure enquêtrice ou le meilleur enquêteur remportera un prix!

Entreprises du salon des exposants



Cabinet Un point six



Lepont instruments



Datageo/



Mire SAS



Kadran



Opsia



Eiffage route



Positics



Esri France



Sitech France



Faro



Sites



Geofit group



Sogelink



Geolux 3.14



Teria



Geosat



Geotopo



Topcon positioning France



IRCGN



AFT



Leica geosystems



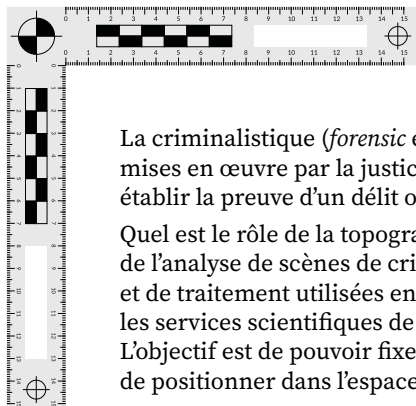
OGE

Invités d'honneur

CONFÉRENCE :

« CRIMINALISTIQUE ET TOPOGRAPHIE »

**VENDREDI 22 SEPTEMBRE
 DE 14 H À 16 H**



La criminalistique (*forensic* en anglais) est l'ensemble des techniques mises en œuvre par la justice, la police et la gendarmerie pour établir la preuve d'un délit ou d'un crime et en identifier l'auteur.

Quel est le rôle de la topographie dans ce contexte ? Dans le cadre de l'analyse de scènes de crime, des techniques d'acquisition et de traitement utilisées en topographie sont employées par les services scientifiques de la police et de la gendarmerie. L'objectif est de pouvoir fixer une scène de crime, c'est-à-dire de positionner dans l'espace les différents indices de la scène.

Un modèle 3D d'une scène de crime peut être créé à partir de levés par photogrammétrie (ensemble de photographies de la scène) ou par lasergrammétrie (scanner laser 3D). Lorsque la scène est vaste, un drone muni de capteurs peut être utilisé pour avoir une vue d'ensemble de la scène. Le modèle 3D d'une scène est enrichi par des informations sur les différents indices présents dans la scène. Il sert à l'enquête criminelle mais aussi pour la reconstitution de la scène lors du procès.

La conférence sera l'occasion pour les experts de présenter les techniques d'acquisition de données topographiques employées sur des scènes de crime.

Intervenants

- Hervé Daudigny, spécialiste 3D - criminalistique - *Forensic science*, Université de Lausanne
- Lieutenant-colonel Christophe Lambert, chef du département Signal image parole, Institut de recherche criminelle de la gendarmerie nationale (IRCGN)
- Delphine Rainoldi, ingénieure de police technique et scientifique, cheffe du Service régional de police technique et scientifique (SRPTS) 67, direction zonale de police judiciaire Est

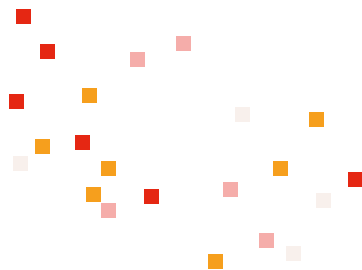
Les Journées de la topographie fêtent leurs 20 ANS!

Nous fêtons cette année la 20^e édition des Journées de la topographie. Ce moment fort pour l'ensemble des étudiants topographes et l'équipe pédagogique a été créé en 2003 en réponse à de multiples besoins :

- mettre en valeur les soutenances des Projets de fin d'études (PFE) en les ouvrant au public et en conviant des professionnels à la table du jury;
- créer une synergie entre professionnels et étudiants dans le cadre du salon des exposants;
- débattre d'une thématique d'actualité dans le domaine de la topographie, durant la conférence organisée pendant l'évènement;
- faire découvrir le métier de géomètre-expert aux étudiants en faisant intervenir des représentants du Conseil supérieur de l'Ordre des géomètres-experts (OGE).

Les journées attirent 150 à 200 participants sur 3 jours et ont vu leur succès grandir au fil des années. Cet évènement est organisé avec l'aide d'étudiants topographes, l'appui de l'Association francophone de topographie (AFT), et le soutien financier de l'OGE.

De nombreux acteurs ont contribué au succès des Journées de la topographie. Un grand merci aux étudiants, aux enseignants, au service communication, aux graphistes, aux services technique et administratif, aux présidents de jury, aux conférenciers, aux professionnels et aux nombreux visiteurs! Remerciements particuliers à Tania Landes, enseignante en topographie, qui a créé et géré cet évènement jusqu'en 2019 et à Véronique Zeller, responsable du service communication, qui a développé la communication notamment grâce à ce document.



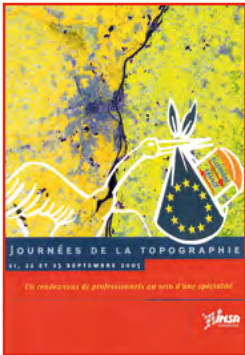
Visuels et thèmes des 20 éditions des Journées de la topographie



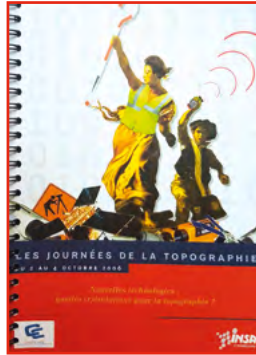
2003 – Sans thème



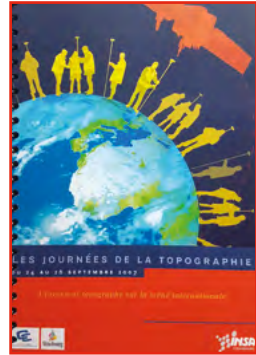
2004 – Quelles données
topographiques pour
un SIG territorial ?



2005 – Nouvelle délimitation de la frontière franco-allemande : aspects fonciers et géodésiques



2006 – Nouvelles technologies : quelles (r)évolutions pour la topographie ?



2007 – L'ingénieur topographe sur la scène internationale



2008 – Journées de la topographie intégrées au congrès national de l'OGÉ



2009 – L'éthique professionnelle en topographie



2010 – Télécommunications en topographie



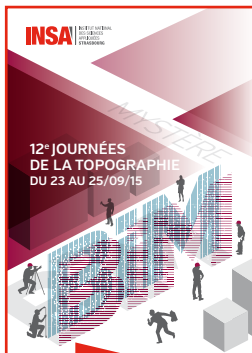
2011 – La topographie au service des énergies



2012 – 2D, ça va, 3D, bonjour les débats !



2014 – Quelle drone d'idée !



2015 – Mystère BIM



2016 – Données topographiques du futur : du numérique au virtuel



2017 – Des systèmes de cartographie mobiles au PCRS



2018 – BIM : le géomètre, garant de la maquette numérique ?



2019 – L'intelligence artificielle et la topographie



2020 – La topographie au service de l'environnement



2021 – Numérisation 3D du patrimoine culturel



2022 – Open data et topographie



2023 – Criminologique et topographie

ORDRE DE PASSAGE DES PFE

MERCREDI 20 SEPTEMBRE

JURY 1 - MASTER Imagerie, robotique, ingénierie pour le vivant (IRIV)
(salle topographie, bâtiment C)

Président de jury : CLEDAT Emmanuel

8 h 30 | Développement d'une option de compensation robuste dans le module de compensation du logiciel TopTools **p. 19**

| Étudiant : DELALANDE Youen
| Structure d'accueil : TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
| Correcteurs : LANDES Tania, MOISAN Emmanuel

9 h 30 | *Deep learning* pour le relevé d'équipements en tunnel par fusion 3D et intensité **p. 23**

| Étudiant : SIKORA Nathan
| Structure d'accueil : Cerema, Strasbourg
| Correcteur : MOISAN Emmanuel

10 h 30 | Détection d'inondations urbaines à partir d'imagerie Sentinel-1, à l'aide de réseaux de convolution U-Net **p. 27**

| Étudiante : PAPIRER Zoé
| Structure d'accueil : Sertit, Illkirch-Graffenstaden
| Correctrice : LANDES Tania

Président de jury : BANASZAK Olivier

13 h 30 | Reconnaissance automatique et sémantisation d'objets dans une orthophoto pour des projets de relevés de corps de rue **p. 31**

| Étudiant : AZZAZ RAHMANI Abdelwahab
| Structure d'accueil : ATGT Topo 3D, Saint-Pierre-du-Perray
| Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre, LANDES Tania

14 h 30 | Modélisation 4D du château de Wasenbourg dans le cadre du projet Interreg VI **p. 35**

| Étudiant : RIGAUD Daéren
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Illkirch-Graffenstaden
| Correcteurs : KOEHL Mathieu, MOISAN Emmanuel

15 h 30 | Création d'un outil de planification d'itinéraires et de guidage en temps réel pour des relevés de cartographie mobile **p. 39**

| Étudiant : VERCHERE Paul
| Structure d'accueil : TT géomètres experts, Paris
| Correcteur : MOISAN Emmanuel

16 h 30 | Mise en place d'un projet pilote dans le vieux Lausanne pour une restitution 3D du quartier par combinaison d'imagerie drone et piétonne en vue d'une intégration dans un moteur de rendu temps réel **p. 43**

| Étudiant : SOMMER Étienne
| Structure d'accueil : Uzufly, Ecublens (Suisse)
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre



JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

8 h 30 | Acquisition, traitement et analyse temps réel de données photogrammétriques acquises à l'aide d'un bras robotisé dans le cadre de la numérisation de collections de sciences naturelles p. 47

| Étudiant : MARTY Nicolas

| Structure d'accueil : Heig-VD, Yverdon-les-Bains (Suisse)

| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

9 h 30 | Mise en place du SIG¹ d'évaluation et du modèle de récolte, de consultation et de modification des données du Schéma de cohérence territoriale (SCoT) du pays de l'Ardèche méridionale p. 51

| Étudiant : HAGUE Gaëtan

| Structure d'accueil : Syndicat mixte du pays de l'Ardèche méridionale, Vinezac

| Correcteur : KOEHL Mathieu

10 h 30 | Mise en place d'une cartographie interactive en ligne des dossiers traités par la Direction urbanisme et territoires (DUT) p. 55

| Étudiant : BENTI Tom

| Structure d'accueil : Ville et Eurométropole de Strasbourg, Strasbourg

| Correcteur : KOEHL Mathieu

Président de jury : FLACELIÈRE Bernard

13 h 30 | Analyse des méthodes topographiques et adaptation à la maintenance ferroviaire p. 59

| Étudiant : LOPEZ-CAMOCHE Quentin

| Structure d'accueil : Gexia foncier, Labège

| Correcteur : FERHAT Gilbert

14 h 30 | Études et mise en place de procédures d'acquisition et de traitement de nuages de points à mettre en œuvre pour répondre aux précisions exigées par le cahier des charges SNCF p. 63

| Étudiant : LEROUX Vincent

| Structure d'accueil : Gexia foncier, Labège

| Correctrice : MACHER Hélène

15 h 30 | Modélisation 4D du château de l'Édenbourg (Petit-Kœnigsbourg) par combinaison de relevés de terrain et d'hypothèses archéologiques p. 67

| Étudiante : HEITZ Jade-Emmanuelle

| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Illkirch-Graffenstaden

| Correcteurs : KOEHL Mathieu, LANDES Tania

16 h 30 | Paramètres opérationnels de la rotation de la Terre par filtrage de Kalman p. 71

| Étudiant : MOOSARY Sharansing

| Structure d'accueil : Observatoire de Paris, Paris

| Correcteur : FERHAT Gilbert



JURY 3 (salle C1.16, bâtiment C)

Président de jury : FLACELIÈRE Bernard

8 h 30 | Proposition d'une méthode d'extraction automatique d'objets dans un nuage de points issu d'un système de cartographie mobile équipé d'un LiDAR² **p. 75**

| Étudiant : COUEILLES Yannick
| Structure d'accueil : Parera, L'Isle-Jourdain
| Correcteurs : ALBY Emmanuel, MACHER Hélène

9 h 30 | Exploitation de nuages de points 3D acquis par lasergrammétrie terrestre pour l'estimation de *Leaf area index* (LAI) en milieu urbain **p. 79**

| Étudiante : TAUFFLIEB Camille
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Illkirch-Graffenstaden
| Correctrice : MACHER Hélène

10 h 30 | Étude du Leica Pegasus Backpack visant à explorer ses limites et optimisation du temps de traitement **p. 83**

| Étudiant : BELINGARD Valentin
| Structure d'accueil : Géodis géomètres experts, Bretteville-sur-Odon
| Correctrice : MACHER Hélène

Président de jury : NATCHITZ Emmanuel

13 h 30 | Mise en place d'une modélisation de l'état des lieux contextuel dans un processus CIM³ pour faciliter une exploitation architecturale et technique des éléments **p. 87**

| Étudiante : PASQUET Marie
| Structure d'accueil : Acti-géo, Toulouse
| Correcteur : ALBY Emmanuel

14 h 30 | Mise en place d'une maquette BIM⁴ pour la gestion des terres polluées dans le cadre d'un chantier de terrassement **p. 91**

| Étudiant : KRIES Nicolas
| Structure d'accueil : Spie batignolles valerian, Vedène
| Correcteur : ALBY Emmanuel

15 h 30 | Numérisation dynamique de type *backpack* appliquée au levé de grande ampleur **p. 95**

| Étudiant : CHUILON Augustin
| Structure d'accueil : Novatlas, Ivry-sur-Seine
| Correctrice : MACHER Hélène

JEUDI 21 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle C1.11, bâtiment C)

Président de jury : NATCHITZ Emmanuel

8 h 30 | Agrégation, traitement et exploitation automatisés de données en amont des missions d'ingénierie et de rétro-ingénierie en milieu maritime, portuaire et fluvial **p. 99**

| Étudiant : MARFAING Grégoire
| Structure d'accueil : Ferrcad, Montpellier
| Correcteurs : KOEHL Mathieu, MACHER Hélène



9h 30 | Mise en place d'une solution d'acquisition et d'exploitation de nuages de points issus de capteurs dynamiques pour la réalisation de PCRS⁵ **p. 103**

| Étudiant : NICO Axel
| Structure d'accueil : Cabinet Un point six, Sélestat
| Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

10h 30 | Analyse comparative des rendements des projets MMS⁶ vs Dimorph, et caractérisation des projets PCRS⁵ **p. 107**

| Étudiant : PEYROU Thomas
| Structure d'accueil : ATGT géomètre expert, Bobigny
| Correcteur : MOISAN Emmanuel

JURY 2 (salle C1.15, bâtiment C)

Président de jury : FLACELIÈRE Bernard

8h 30 | Individualisation d'objets dans un nuage de points issu d'une acquisition aérienne LiDAR² : application aux relevés d'obstacles d'aérodromes **p. 111**

| Étudiante : CHAMPETIER Inès
| Structure d'accueil : Opsia aviation, La Valette-du-Var
| GRUSSENMEYER Pierre, LANDES Tania

9h 30 | Levés et modélisation 3D du complexe souterrain exploité par la CTS sous la gare de Strasbourg **p. 115**

| Étudiant : MOTTIER Aymeric
| Structure d'accueil : Compagnie des transports strasbourgeois, Strasbourg
| Correcteurs : ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

10h 30 | Mise en place d'un processus de traitement visant à automatiser la classification et la vectorisation d'éléments sur des nuages de points **p. 119**

| Étudiant : MOUVAUX Louis
| Structure d'accueil : Servicad, Mondeville
| Correcteur : ALBY Emmanuel

JURY 3 (salle C1.16, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

8h 30 | Surveillance géodésique de glissement de terrain par interférométrie radar satellitaire et terrestre : cas du glissement de terrain du Pas de l'Ours (Hautes-Alpes) **p. 123**

| Étudiant : METZGER Mathéo
| Structure d'accueil : Université de Strasbourg/EOST, Strasbourg
| Correcteur : FERHAT Gilbert

9h 30 | Suivi de l'évolution de la rivière des Galets (La Réunion) depuis 1950 par analyse photogrammétrique **p. 127**

| Étudiant : GRONDIN Laurent
| Structure d'accueil : BRGM, Saint-Denis, La Réunion
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

10h 30 | Acquisition photogrammétrique par smartphone et production automatisée d'orthophotos dans le cadre d'inspection détaillée d'ouvrage **p. 131**

| Étudiante : POTVIN Charline
| Structure d'accueil : Sites Provence, Aix-en-Provence
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre



VENDREDI 22 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

8 h 30 | Amélioration de la précision des mesures à partir d'un scanner cinématique Slam⁷ sac à dos **p. 135**

| Étudiant : VEVERKA Hugo
| Structure d'accueil : Kadran, Nantes
| Correctrice : MACHER Hélène

9 h 30 | Optimisation de la réalisation de plans de façades utilisés pour l'isolation par l'extérieur des bâtiments, à l'aide de panneaux préfabriqués **p. 139**

| Étudiante : HAZARD Iona
| Structure d'accueil : Campenon Bernard topographie, Villeurbanne
| Correctrice : LANDES Tania

10 h 30 | Comparaison d'Unreal Engine et Unity menant au développement, sur le moteur retenu, d'une application de visualisation de données géospatiales au format 3D Tiles **p. 143**

| Étudiant : DEIBER-PAUQUET Maximilien
| Structure d'accueil : Virtual city systems, Berlin (Allemagne)
| Correcteur : KOEHL Mathieu

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

Président de jury : ORTLIEB Hubert

8 h 30 | Évolution du bornage et de la reconnaissance de limite vers une procédure 100 % numérique et dématérialisée : de la numérisation de l'existant à la réunion contradictoire **p. 147**

| Étudiant : GESSERAND Alexis
| Structure d'accueil : TT géomètres experts, Rambouillet
| Correcteur : FREY Vincent

9 h 30 | Mise en place d'un SIG¹ interne dans le cadre d'une transition logicielle d'un bureau de géomètre **p. 151**

| Étudiante : BIGNON Iléana
| Structure d'accueil : Best-topo, Niederanven (Luxembourg)
| Correcteur : KOEHL Mathieu

10 h 30 | Investigation des méthodes semi-automatiques de traitement de nuages de points et des possibilités de modélisations 3D de bâtiments en vue d'une rénovation **p. 155**

| Étudiant : LONGRAIS Dylan
| Structure d'accueil : Géoconseils SA, Colombier (Suisse)
| Correcteur : ALBY Emmanuel

JURY 3 (salle C1.16, bâtiment C)

Président de jury : NATCHITZ Emmanuel

8 h 30 | Intégration des outils de photogrammétrie dans le cadre de relevés de tranchées. Mise en place des procédures de mesures et de calculs avec analyse des limites et déploiement de la solution **p. 159**

| Étudiant : DUFOUR Adrien
| Structure d'accueil : Datageo, Ligné
| Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre, MOISAN Emmanuel



9h30 | Apport des nouvelles technologies (réalité augmentée et jeux numériques) dans le cadre des chantiers soumis à la réglementation anti-endommagement **p. 163**

| Étudiante : BOUCHAREAU Rose
| Structure d'accueil : Enedis, Dijon
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

10h30 | Détection du taux de régénération des forêts secondaires du Congo par télédétection **p. 167**

| Étudiant : EDDARIF Soufiane
| Structure d'accueil : INRAE, Villenave-d'Ornon
| Correctrice : LANDES Tania

PROJETS DE FIN D'ÉTUDES SOUTENUS EN FÉVRIER ET MARS 2023

27/02/23 | Identification et mise en œuvre d'outils BIM⁴/SIG¹ pour la gestion et le pilotage de projets de maîtrise d'œuvre complexes **p. 171**

| Étudiant : MISCHLER Baptiste
| Structure d'accueil : OTE ingénierie, Illkirch-Graffenstaden
| Correcteur : KOEHL Mathieu

31/03/2023 | Acquisition 3D et création de maillage d'objets complexes dans le contexte du HBIM⁸ pour une intégration géoréférencée dans le logiciel Autodesk Revit **p. 175**

| Étudiante : FAUVEL Lucille
| Structure d'accueil : Novatlas, Ivry-sur-Seine
| Correcteur : KOEHL Mathieu

Architecte-ingénieure
Parcours topographie

31/03/2023 | Création de modèles 3D à des fins de conservation et de valorisation du patrimoine militaire bâti de Saint-Denis **p. 179**

| Étudiante : GOULET Charlotte
| Structure d'accueil : Direction des affaires culturelles de la Réunion, Saint-Denis (La Réunion)
| Correcteurs : KOEHL Mathieu, MACHER Hélène

Architecte-ingénieure
Parcours topographie

31/03/2023 | Développement d'une approche automatique d'analyses nuages de points-maquettes numériques, appliquée à la comparaison spatiale des réservations **p. 183**

| Étudiante : HUBERT Philippine
| Structure d'accueil : Novatlas, Ivry-sur-Seine
| Correctrice : MACHER Hélène

Architecte-ingénieure
Parcours topographie

31/03/2023 | Proposition d'une chaîne de traitement efficiente aboutissant à une maquette BIM⁴ sur Revit. Cas pratique du « grenier » Saint-Christophe (site classé historique) **p. 187**

| Étudiante : VERHELST Aurélie
| Structure d'accueil : Archéotech SA, Épalinges (Suisse)
| Correctrice : LANDES Tania

Architecte-ingénieure
Parcours topographie

-
- 1 - SIG : Système d'information géographique
 - 2 - LiDAR : *Light detection and ranging*
 - 3 - CIM : *City information modeling*
 - 4 - BIM : *Building information modeling*
 - 5 - PCRS : Plan de corps de rue simplifié
 - 6 - MMS : *Mobile mapping system*
 - 7 - Slam : *Simultaneous localization and mapping*
 - 8 - HBIM : *Historical building information modeling*

RÉSUMÉS DES PFE



Développement d'une option de compensation robuste dans le module de compensation du logiciel TopTools

PFE présenté par : **Youen Delalande**
Société d'accueil : **TPLM-3D**
Directeur de PFE : **David Desbuisson**
Correcteurs : **Tania Landes**
Emmanuel Moisan



1. Introduction

1.1 Définition

D'après la définition donnée par le grand géodésien allemand Friedrich Robert Helmert (1843–1917), la géodésie est *la science qui mesure et représente la surface terrestre*. Il y a donc deux tâches principales à accomplir en géodésie : la mesure d'une part, c'est-à-dire le relevé d'une partie définie de la surface terrestre dans une zone plus ou moins grande, et d'autre part, la représentation mathématique de ce qui a été mesurée dans un modèle.

La base du modèle est en principe un système de référence ou de coordonnées dans lequel la configuration de la surface terrestre peut être représentée géométriquement. Cette représentation s'effectue notamment à l'aide de points mesurés par différents instruments de mesure propres à la topographie (tachéomètre, scanner laser, niveau optique etc.). Les coordonnées de ces points sont ensuite calculées dans le système de référence. En raison des méthodes de mesure utilisées, les réseaux géodésiques sont généralement formés de mesures et de points.

Les mesures ou observations effectuées ne sont en principe jamais parfaitement exactes. En effet, elles vont toujours être entachées d'erreurs et d'imprécisions plus ou moins importantes. Cela a pour conséquence que les paramètres inconnus tels que les coordonnées des points du réseau ne peuvent pas être calculées avec une précision absolue. Il est donc nécessaire de les estimer à l'aide d'une méthode d'estimation. Outre le résultat de calcul des points, il est important d'effectuer plus d'observations que nécessaires à la simple détermination des inconnues du réseau, afin notamment d'obtenir des informations sur la qualité des mesures, du modèle mathématique et de la méthode de calcul utilisée. En géodésie, l'ajustement d'inconnues dans un système surdéterminé est appelé compensation. Les objectifs de ce type de calcul sont les suivants :

- Détection et élimination des fautes grossières ;
- Détection des faiblesses dans le modèle mathématique ;
- Calcul des valeurs les plus probables pour les paramètres inconnus ;
- Calcul d'indicateurs de précision et de fiabilité pour les résultats obtenus.

Pour effectuer une compensation topographique, la manière la plus classique est d'utiliser la méthode des moindres carrés. En effet, il s'agit de la méthode standard utilisée par la plupart des topographes pour la compensation de réseaux géodésiques. Cette méthode possède cependant des défauts, comme notamment le manque de robustesse du calcul en présence de fautes grossières dans les observations. Ainsi, pour éviter cela, il faut se tourner vers des méthodes dites robustes.



1.2 Contexte autour du projet

TPLM-3D développe depuis sa création de nombreux logiciels en interne. Parmi ceux-ci, TopTools est un logiciel de traitement des mesures topographiques. Jusqu'à présent, l'entreprise effectuait des calculs de compensation en lien avec le logiciel LTOP. Ce logiciel, extrêmement performant, est reconnu pour ses indicateurs de qualité et sa capacité à trouver des fautes dans un jeu de données. Cependant, LTOP n'est aujourd'hui plus maintenu par Swisstopo (Office fédéral de la topographie en Suisse), ce qui interroge sur la pérennité de cette solution. C'est pourquoi depuis 2021, TPLM-3D a entrepris le développement de son propre module de compensation. Celui-ci est aujourd'hui opérationnel, et a été en partie implémenté par Solène Ignaccolo lors de ses PRT et PFE réalisés l'année dernière au sein de l'entreprise. Ce module utilise un calcul de compensation en bloc par les moindres carrés, qui permet de traiter des mesures pour obtenir les coordonnées 3D des points inconnus. Il manque cependant au module plusieurs fonctionnalités, comme notamment un algorithme de compensation robuste, ainsi qu'une évaluation du modèle stochastique et la prise en compte de système de projection géodésique.

1.3 Objectifs de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le prolongement d'un PRT réalisé au semestre dernier. Celui-ci avait notamment permis de se familiariser avec la notion de calcul robuste ainsi que de réaliser différents tests pratiques dans le but d'évaluer différentes méthodes. Enfin, les grandes lignes de l'état de l'art ont pu être présentées. Le présent PFE aura lui pour objectifs d'une part d'approfondir d'un point de vue théorique les problématiques traitées durant le PRT. D'autre part, il permettra de développer des algorithmes concrets qu'il faudra ensuite implémenter au sein du logiciel TopTools. Enfin, une phase de tests et de comparaisons importantes devra être réalisée afin de vérifier le bon fonctionnement du module de compensation robuste.

2. Estimation robuste

La formalisation et la quantification de la notion de robustesse sont à mettre au profit de mathématiciens comme J.W. Tukey, P. J. Huber, F. R. Hampel, E. M. Ronchetti, P. J. Rousseeuw, ou encore A. Marazzi. Ce sont eux qui ont entraîné des développements importants sur les estimateurs robustes, et qui ont développé des outils mathématiques à la base des statistiques robustes d'aujourd'hui. En géodésie, l'utilisation de ce type de statistiques est assez récente, et n'a cessé de croître notamment depuis la publication des différents travaux de F. Wicki, G. Kampmann et J. Zavotti pour ne citer qu'eux.

2.1 Modèle stochastique de l'estimation robuste

Dans un calcul de compensation topographique ainsi que de nombreux autres types de calculs, il est supposé que les observations soient distribuées normalement. La compensation par les moindres carrés classique n'est optimale uniquement lorsque cette hypothèse est vérifiée. Dans le cas contraire, la méthode n'est plus du tout optimale. En effet, lorsque l'hypothèse n'est pas vérifiée, cela veut dire que les mesures sont entachées de fautes grossières ou systématiques pouvant perturber d'une façon très significative l'estimation des paramètres inconnus. Malgré les efforts importants réalisés par les topographes pour obtenir des observations conformes à la distribution normale (procédures rigoureuses de mesures limitant la corrélation entre les observations, nombreux contrôles, etc.), cette hypothèse n'est que très rarement remplie dans la pratique. Plusieurs études ont notamment montré que l'hypothèse de la distribution normale pour des observations topographiques n'est pas entièrement confirmée dans la plupart des cas.

Cela n'empêche pas pour autant d'utiliser la méthode des moindres carrés. En effet, pour combler la présence de fautes grossières dans les observations, il est possible d'identifier puis d'éliminer ces fautes du vecteur des observations en se basant sur l'examen des résidus normés notamment. Il suffit



ensuite de recalculer les paramètres inconnus à l'aide du nouveau vecteur des observations obtenu. Cette démarche est souvent utilisée encore aujourd'hui dans de nombreux cabinets, mais est peu optimale et peu sûre. En effet, dans le cas où les fautes grossières sont aisément identifiables, qu'il y a peu d'inconnus et beaucoup d'observations, et que la proportion de fautes grossières est petite au sein des observations, alors cette méthode peut parfois être efficace. Néanmoins, elle peut aussi s'avérer dangereuse en raison d'un phénomène de "brouillage" qui va compliquer la détection des fautes grossières. En effet, les résidus étant corrélés entre eux, alors une observation entachée d'une faute grossière présentant un grand résidu peut également contribuer à de grands résidus sur d'autres observations non-entachées de fautes. Cela va ainsi avoir pour effet "d'étaler" les résidus sur toutes les observations, et donc de "brouiller" la bonne localisation des fautes. Par conséquent, il y a un risque de supprimer une observation non-entachée de faute. Pour ces raisons, il est donc préférable de se tourner vers d'autres méthodes dites robustes, et qui permettront entre autres une bonne localisation des fautes grossières.

Pour illustrer l'effet de brouillage ainsi que l'efficacité de méthode robuste, il est possible de prendre un exemple bidimensionnel tel que la régression linéaire. En prenant un échantillon de données dans lequel il y a la présence de deux fautes grossières, l'estimation de la droite obtenue par les moindres carrés et celle obtenue par une méthode robuste (Biber) sont visibles sur la figure ci-dessous :

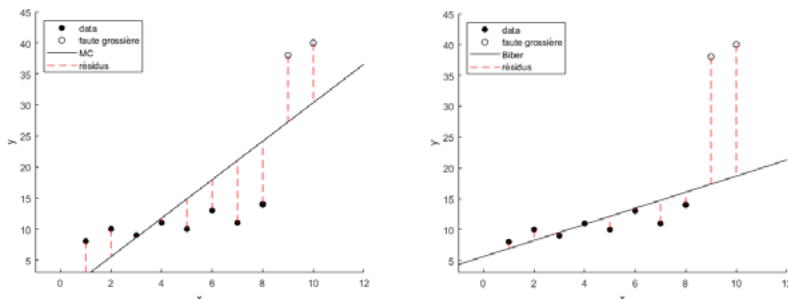


Fig 1 - Estimation de la régression par les moindres carrés (gauche) et par l'estimateur robuste de Biber (droite)

A l'aide de cet exemple, il est assez clair que les résidus issus d'une estimation comprenant des fautes grossières peuvent être biaisés, et ainsi compromettre la bonne localisation de ces fautes. Cet exemple illustre également que l'utilisation d'une méthode robuste va aboutir à des résidus réalistes malgré la présence de fautes grossières, et ainsi permettre une bonne localisation de ces fautes.

Une méthode est dite robuste lorsqu'elle est peu sensible aux fautes grossières. Les principaux objectifs d'un calcul robuste en topographie sont les suivants :

- Obtention d'un résultat correct malgré l'absence de distribution normale des mesures ;
- Localisation automatique des fautes grossières et obtention de leurs valeurs probables ;
- Simplification de l'analyse, du nettoyage et de l'évaluation des données ;
- Obtention d'un résultat proche de la solution optimale lorsqu'il n'y a pas de fautes grossières.

2.2 Modèle fonctionnel de l'estimation robuste

Un estimateur est dit robuste si l'estimation des résultats est correcte même lorsque les observations ne sont pas toutes distribuées normalement. Il existe de nombreuses manières de générer de tels estimateurs robustes. Pour les applications géodésiques, les classes intéressantes sont souvent divisées en deux catégories : les L-estimateurs et les M-estimateurs. Pour cette étude, nous allons privilégier la classe des M-estimateurs, en utilisant notamment l'estimateur de Biber ainsi que la



famille d'estimateur SEF. Cette classe d'estimateurs est très intéressante grâce à ses similitudes avec la méthode des moindres carrés, ainsi que sa capacité à résoudre des problèmes avec un nombre élevé d'inconnues.

2.3 Méthodes retenues pour l'étude

De nombreux critères rentrent en jeu dans le choix des méthodes à implémenter au sein du logiciel TopTools. En effet, il faut prendre en compte des notions telles que la robustesse et l'efficacité d'un estimateur, ainsi que sa capacité à être performant dans le cas d'observations à leviers (observations peu contrôlées) par exemple.

Deux méthodes ont finalement été retenues pour être implémentées dans le logiciel TopTools : la méthode de Biber utilisant le même algorithme que le logiciel LTOP et la méthode SEF utilisant un algorithme de type IRLS. Ces deux méthodes seront ainsi comparées et testées afin de déterminer les avantages et inconvénients de chacune, et ainsi de peut-être effectuer un choix définitif sur la méthode à garder.

3. Développement du calcul robuste

Afin de faciliter le développement de ces méthodes au sein du logiciel TopTools, une première phase de développement a été réalisée sur MatLab. Cela a permis de se familiariser et de tester ces méthodes robustes en prenant des exemples de régression linéaire simples. Ainsi, la mise en place des algorithmes en C++ au sein du logiciel TopTools a par la suite été facilitée.

Pour les deux méthodes implémentées au sein de TopTools, de nombreux indicateurs ont été rajoutés au listing des résultats déjà existant. Pour chaque observation, les informations ci-dessous seront disponibles :

- Valeurs limites séparant le traitement des résidus ;
- Fautes probables ;
- Redondance partielle robuste.

En plus des autres indicateurs déjà présents, ces indicateurs seront très importants pour mieux analyser les résultats d'un calcul robuste.

4. Comparaisons et tests

Une grande partie de tests et de comparaisons des méthodes va être effectuée durant ce PFE. Pour commencer, il faudra vérifier l'adéquation des résultats obtenus par la méthode de Biber avec ceux obtenus dans LTOP. Ensuite, un réseau de référence sera créé afin de pouvoir comparer les deux méthodes implémentées dans TopTools. Pour ce faire, différentes fautes seront rajoutées au sein du réseau sur différents types d'observations, et les résultats obtenus par chacune des méthodes pourront ainsi être analysés.

5. Conclusion

Durant ce PFE, nous avons développé une option de compensation robuste au sein du logiciel TopTools. Cette option viendra compléter la méthode classique des moindres carrés développée l'année dernière. En effet, l'option robuste pourra être utilisée en parallèle, afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles en fonction de la qualité des données ou des connaissances du modèle. De plus, l'option robuste permettra de localiser de façon automatique les fautes grossières ainsi que d'obtenir leur valeur probable, notamment en amont d'un calcul de compensation classique par les moindres carrés.

Deep Learning pour le relevé d'équipements en tunnel par fusion 3D

+ intensité



PFE présenté par : **Nathan Sikora**
Société d'accueil : **Cerema**
Directeurs de PFE : **Pierre Charbonnier, Philippe Foucher**
Correcteur : **Emmanuel Moisan**
Encadrants : **Pierre Charbonnier, Philippe 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. Les approches de détection automatique explorées par l'équipe ENDSUM reposent sur les architectures d'apprentissage profond. Les premiers développements ont permis de mettre en œuvre des outils d'aide à l'annotation des données préalables, indispensable à l'utilisation de toutes méthode d'apprentissage. Cela a permis de mettre en œuvre et d'évaluer des outils de segmentation d'instance des équipements à partir des données d'intensité exclusivement. Dans ce contexte, l'objectif général de mon stage a été d'intégrer l'information de profondeur dans l'architecture de segmentation d'instance. Certaines données étant invalides, la première contribution de mon stage a été d'implémenter et évaluer les techniques de densification des données pour combler ces points invalides puis encoder l'ensemble de l'image de profondeur. A partir de ces données densifiées, ma seconde contribution a été d'étudier les stratégies de fusion d'informations multimodales (intensité + profondeur) dans les architectures d'apprentissage profond, de mettre en œuvre celle qui nous a semblé la plus pertinente, et d'en évaluer les performances.

2. Présentation des données

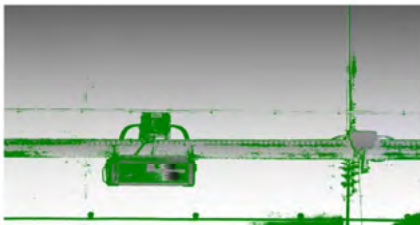


Fig. 1 : Exemple d'images de profondeur (à gauche en niveau de gris selon la profondeur et valeurs invalides / hors limites sont marquées en vert) et d'intensité (à droite en niveau de gris)



Les données utilisées sont issues du capteur développé par l'entreprise Pavemetrics appelé *LCMS (Laser Cracks Measurement System)*. Un émetteur projette une ligne laser sur l'objet inspecté, et une caméra digitale enregistre l'intensité de retour du signal ainsi que les déformations de la ligne (traduites en informations de profondeurs). Ces profils sont capturés dans le sens du déplacement et sont regroupés 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 il a été adapté aux murs 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. 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. Afin d'automatiser la détection des équipements, l'apprentissage profond a été utilisé. L'architecture choisie et qui a été implémentée est le *Mask R-CNN* [Barcet, 2022]. Les résultats obtenus par ce modèle sont très encourageants. Cependant, la base d'apprentissage est exclusivement basée sur les données d'intensité. Dans l'optique d'améliorer les résultats, il convient d'utiliser l'intégralité des données que l'on possède, c'est-à-dire profondeur et intensité.

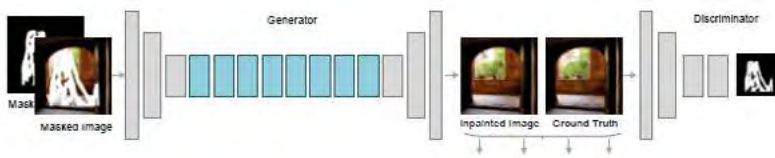
3. Densification des données de profondeur

Dans l'objectif de pouvoir utiliser les données de profondeur, il nous faut donc une image sans données invalides ainsi que des données encodées sur 3 canaux. En ce qui concerne la partie densification deux méthodes ont été implémentées, testées et leurs performances comparées. Une approche « algorithmique » de colorisation [Levin et al., 2004] et une approche par apprentissage profond d'*inpainting* [Zeng et al., 2022]. La première méthode implantée, de densification, est basée sur la minimisation de la différence entre les pixels voisins. Pour cela les moindres carrés sont appliqués. Enfin, on parle de méthode guidée la valeur des pixels voisins est pondérée avec l'image d'intensité (w dans la formule ci-dessous) :

$$J(U) = \sum_{\mathbf{r}} \left(U(\mathbf{r}) - \sum_{\mathbf{s} \in \mathcal{N}(\mathbf{r})} w_{\mathbf{rs}} U(\mathbf{s}) \right)^2$$

Une fois le corpus de données densifié, il nous faut donc évaluer ce dernier. Ainsi, il convient de tester une seconde méthode afin de les comparer.

Je suis donc venu essayer une méthode par apprentissage profond qui réalise de l'*inpainting* : *AOT GAN*. Ce *Generative Adversarial Network (GAN)* est composé de deux parties : *Generator* et *Discriminator*.



■ Cor Fig. 3 : Schéma de l'AOT GAN (Agregative contextual Network) [Zeng et al., 2022]

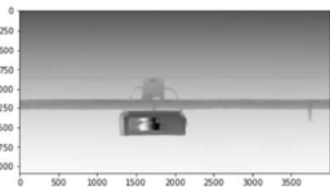


Fig. 2 : Image de profondeur densifiée

- $U(\mathbf{r})$ = Profondeur au pixel \mathbf{r}
- $Y(\mathbf{r})$ = Intensité au pixel \mathbf{r}
- $w_{\mathbf{rs}}$ = fonction de pondération (la somme est égale à 1), grande lorsque $Y(\mathbf{r})$ est similaire à $Y(\mathbf{s})$, et petite lorsque les deux intensités sont différentes.

La partie dite *Generator* va venir proposer une image peinte à partir de l'image masquée, ensuite le réseau dit *Discriminator* va venir détecter s'il s'agit d'une vraie image ou non. Ainsi le premier réseau va venir apprendre et proposer une image qui s'approche le plus possible d'une image réelle.

Un apprentissage a été réalisé avec près de 800 images (densifiées au préalable par la première méthode ou images sans données invalides).

Une fois ces deux méthodes mise en place, il convient de les comparer et de les évaluer afin de faire un choix pour la suite du projet. Pour cela, des masques sont générés aléatoirement (nombres, taille et position), puis sont appliqués à des images de profondeur. Ces images masquées sont ensuite densifiées avec les deux méthodes, puis comparées avec l'image initiale. Au total près de 600 images ont été évaluées, on obtient alors une emq de 0.17 m pour la colorisation contre 0.02 m pour l'AOT GAN. Nous utiliserons alors les images densifiées par l'AOT GAN.



Fig. 4 : Image de profondeur à gauche (outliers en blanc), image densifiée à droite

4. Segmentation d'instance : utilisation de la profondeur

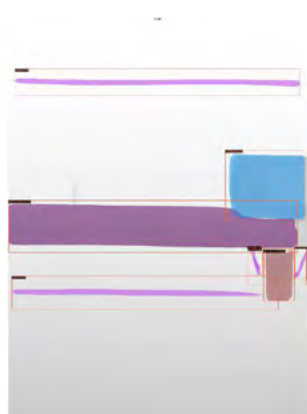


Fig. 5 : Visualisation des résultats du Mask R-CNN sur la profondeur

Afin de comparer les résultats, nous souhaitons utiliser la même architecture que précédemment. Le *Mask R-CNN* va donc être utilisé sur les données de profondeur.

En ce qui concerne la base d'apprentissage, le jeu de données est équivalent à celui d'intensité soit environ 400 images et 24 classes.

Le modèle est dans un premier temps évalué image par image, pour ce faire un algorithme capable de calculer, pour chaque classe, les objets bien détectés (vrais positifs, VP), les non-détectés (faux négatifs, FN), et ceux qui ont été détectés mais qui n'auraient pas dû l'être (faux positifs, FP) a été mis en place. 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 notre algorithme :

$$\text{Précision} = \frac{VP}{VP+FP} \quad \text{Rappel} = \frac{VP}{VP+FN}$$

Lorsque le nombre d'occurrences permet une évaluation correcte, la précision et le rappel sont en moyenne entre 0,9 et 1,0. La profondeur est donc bien prise en compte par le modèle créé.

Il peut être intéressant d'évaluer la progression du projet. Nous disposons actuellement d'un modèle de segmentation d'instance pour les données d'intensité ainsi que d'un autre modèle pour les données de profondeur (obtenues grâce à l'AOT GAN). Afin d'utiliser l'ensemble des données de manière cohérente, il est pertinent de fusionner l'utilisation de ces données.

Cette fusion peut être réalisée selon trois méthodes. La première méthode, appelée *early fusion*, consiste à fusionner les entrées et à appliquer ensuite le modèle *Mask R-CNN*. Ainsi, nous avons la possibilité de coder la profondeur sur 3 canaux et d'ajouter l'intensité à ceux-ci, ou simplement d'ajouter les deux canaux.

La deuxième méthode est la *late fusion*, qui implique l'utilisation de deux modèles *Mask R-CNN* distincts, dont les caractéristiques sont ensuite fusionnées. Cela peut être réalisé soit avec deux modèles en monocanal, soit avec deux modèles utilisant trois canaux.



Enfin il est possible de venir réaliser une *hybrid fusion* qui utilise le modèle *Mask R-CNN* pour extraire des caractéristiques à partir des données *RGB-D* et fusionne ces caractéristiques de manière hybride en prenant en compte les résultats d'un modèle précédent. Cependant, il serait trop compliqué de réaliser cela, car il n'existe pas d'architecture semblable à celle utilisée précédemment basée sur de l'*hybrid fusion* avec du *Mask R-CNN*. En ce qui concerne l'*early fusion*, cela est assez compliqué car il n'existe pas de modèle pré-entraîné profondeur-intensité, on perd alors l'intérêt de l'apprentissage profond. On va donc réaliser de la *late fusion* dans un premier temps:

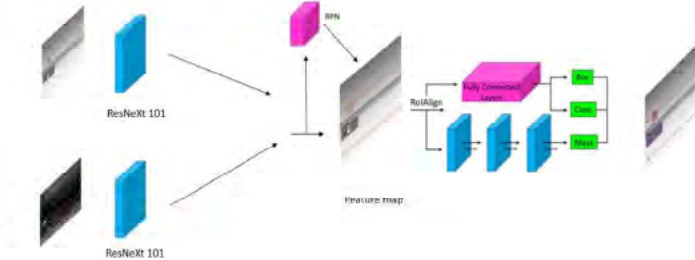


Fig. 6 : Schéma de l'architecture bimodale créée

On va donc appliquer deux encodeurs pour extraire les caractéristiques en parallèle pour la profondeur et l'intensité (voir fig.6). Il faut donc créer une nouvelle configuration afin d'entraîner un nouveau modèle. Mais il faut aussi modifier tout le pipeline pour le chargement en parallèle des données. Ce modèle sera évalué avec les mêmes métriques que les modèles précédents.

5. Conclusion et perspectives

Dans mon stage j'ai mis en œuvre et évalué deux méthodes de densification des données, une méthode de colorisation et une méthode d'inpainting par apprentissage profond.

A l'aide de ces données, je suis venu réaliser de la segmentation d'instance avec le *Mask R-CNN*.

Dans l'optique de venir fusionner intensité et profondeur, j'ai modifié l'architecture du *Mask R-CNN* pour réaliser de la Late Fusion avec l'ensemble de nos données. Les résultats sont encourageants, cependant il faudrait augmenter la base de données d'apprentissage pour le *Mask R-CNN* mais aussi pour l'*AOT GAN*.

En effet, possédant que peu de vérités terrains, j'ai dû utiliser des images de profondeur préalablement densifiée par la méthode de colorisation. Il peut donc être intéressant de venir générer des images de synthèse pour modéliser les tunnels avec génération d'image de synthèse de profondeur. Pour cela, le logiciel Blender [Grard et al., 2019] pourrait être utilisé par exemple.

6. Références

[Barcet, 2022] Barcet, F. (2022). Documentation des tunnels par imagerie 3D haute-résolution. Mémoire de PFE – Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg. 79.

[Foucher et al., 2019] 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,

[Grard et al., 2019] Grard, M., Brégier, R., Sella, F., Dellandréa, E., & Chen, L. (2019). Object segmentation in depth maps with one user click and a synthetically trained fully convolutional network. In Human Friendly Robotics: 10th International Workshop (pp. 207-221). Springer International Publishing.

[Levin et al., 2004] Levin, A., Lischinski, D., and Weiss, Y. (2004). Colorization using optimization.

[Zeng et al., 2022] Zeng, Y., Fu, J., Chao, H., and Guo, B. (2022). Aggregated contextual transformations for high-resolution image inpainting. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics

Détection d'inondations urbaines à partir d'imagerie Sentinel-1, à l'aide de réseaux de convolution U-Net

<i>PFE présenté par :</i>	Zoé Papirer
<i>Société d'accueil :</i>	<i>ICube - SERTIT</i>
<i>Directeur de PFE :</i>	<i>Stephen Clandillon</i>
<i>Correctrice :</i>	<i>Tania Landes</i>
<i>Encadrants :</i>	<i>Quentin Poterek, Ari Jeannin</i>



1. Les inondations urbaines, catastrophes aux enjeux économiques et sociaux élevés

Dans une situation de crise, il est vital de fournir des informations concernant les dégâts causés par une catastrophe naturelle. En particulier lors d'une inondation, cette réponse se doit d'être rapide et efficace puisque son emprise évolue d'heure en heure. Dans le cadre de son service de cartographie rapide, le SERTIT a ainsi régulièrement à cartographier des inondations, afin de permettre aux acteurs locaux de mettre en place sans attendre une réponse adaptée à ce type de catastrophe.

Si ces inondations sont relativement simples à détecter en plaine à partir d'imagerie SAR (Synthetic Aperture Radar), ou en français RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture), la détection en milieux urbains représente quant à elle un défi important. En effet, à l'échelle de la longueur d'onde du signal émis par le satellite, une surface inondée apparaît comme lisse. La rétrodiffusion du signal est alors spéculaire, et une inondation en plaine est identifiable par l'absence de signal rétrodiffusé à cet endroit. Cependant, en raison de l'effet dièdre formé par les bâtiments et les routes, la rétrodiffusion du signal est plus complexe en zones urbaines.

La détection des inondations est également effectuée à partir d'images SAR et non optiques pour la simple et bonne raison qu'une inondation s'accompagne la plupart du temps d'une importante couverture nuageuse. Celle-ci affecte grandement les images optiques, tandis que les longueurs d'onde des satellites radar, et notamment SAR, y sont bien moins sensibles. De plus, les images utilisées ont été acquises à l'aide d'un capteur actif, permettant ainsi de garantir l'obtention d'une image exploitable par presque tous les temps et à n'importe quelle heure d'acquisition. Dans un contexte de crise, où l'on souhaite impérativement fournir une information sur l'étendue des dégâts, les images SAR constituent donc une source de données relativement idéale.

C'est pourquoi le SERTIT a développé, entre janvier 2022 et janvier 2023, un outil nommé FLORIA (FLoodwater detection over urban areas using Radar and artificIAI intelligence), dont l'objectif est de détecter les inondations urbaines à partir d'images SAR. Cet outil se base actuellement sur un réseau neuronal convolutif de type U-Net. Pour l'instant, cet outil utilise uniquement des images Sentinel-1, d'une part en raison de leur haute fréquence temporelle et de leur double polarisation (VV et VH), et d'autre part pour leur faible ligne de base perpendiculaire entre deux images, paramètre nécessaire pour les calculs d'interférométrie radar.

2. Comportement des zones urbaines sur images SAR

Afin de comprendre les enjeux de la détection d'inondations en zones urbaines à partir d'images SAR, il est important de s'intéresser au comportement des zones urbaines en temps normal et lors d'une inondation sur les images SAR.



Comme énoncé précédemment, l'effet dièdre présent en zones urbaines fait que le signal rétrodiffusé a une forte amplitude. De nombreuses études, telles que celle de Li *et al.* (2019), démontrent que l'amplitude du signal rétrodiffusé augmente en cas d'inondation, notamment par l'influence de la constante diélectrique élevée de l'eau présente au sol. Dans cette même étude, il est démontré que l'amplitude du signal est le paramètre le plus important à étudier pour détecter les inondations urbaines.

Par ailleurs, d'autres études, telles que celles de Chini *et al.* (2019), Pulvirenti *et al.* (2016) et Tay *et al.* (2020), démontrent une forte amélioration des résultats par l'ajout du paramètre de cohérence. La cohérence est définie par Bamler et Hartl (1998) comme le coefficient de corrélation complexe entre deux images SAR. Cette grandeur permet de quantifier les similarités entre deux images SAR. Les zones urbaines, en raison de leur géométrie fixe, ont en temps normal une cohérence élevée entre deux images. Cependant, en cas d'inondation, la cohérence des zones urbaines entre une image pré-inondation et une image de l'inondation est faible. Ainsi, il est possible d'identifier les zones urbaines inondées comme ayant une valeur d'amplitude élevée et une valeur de cohérence faible.

3. Objectifs de l'étude

La chaîne de traitement de l'outil FLORIA, représentée sur la Figure 1, a déjà été mise en place par le SERTIT avant la réalisation de cette étude. Si celle-ci est déjà fonctionnelle, de nombreux aspects en sont améliorables afin d'en faire un outil valide. En effet, la qualité de la détection effectuée par l'outil n'est pour l'instant pas quantifiée.

Les objectifs de ce stage sont organisés en trois axes majeurs : l'entraînement du modèle de détection automatique U-Net, la quantification de la qualité des résultats de la détection à l'aide de métriques adaptées ainsi que la mise en forme des résultats pour en faciliter l'interprétation et l'exploitation.

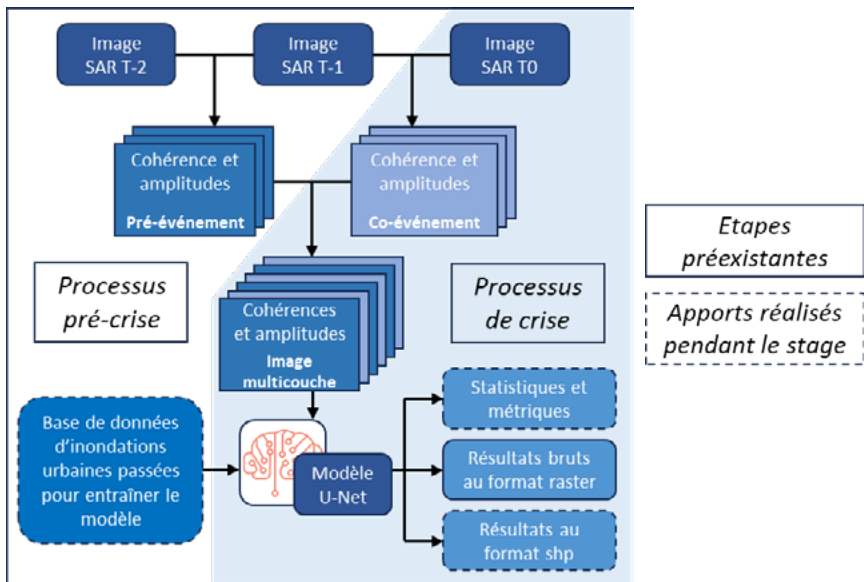


Figure 1. Chaîne de traitement de l'outil FLORIA.

Un modèle a déjà été réalisé par les ingénieurs du SERTIT. Celui-ci est entraîné sur un faible nombre de zones de référence, d'où la nécessité de réaliser une base de données d'entraînement. En raison de leur évolution rapide, il est complexe d'obtenir des données sur les inondations urbaines passées.

La mise en place d'une échelle d'évaluation permettant d'estimer la qualité des données utilisées est nécessaire au vu de la difficulté à trouver des données de référence et de leur type variable.

Description	Données fiables à la date exacte de l'image SAR	Données fiables à +/- 1 jour d'écart de l'image SAR *	Données fiables à +/- 2 jours d'écart de l'image SAR *	Données fiables non datées caractérisant l'étendue de l'inondation	Pas de données géographiques, visualisation en fausses couleurs exploitable	Pas de données de référence et visualisation en fausses couleurs inexploitable
Code couleur						

Tableau 1. Echelle d'évaluation de la qualité des zones d'entraînement du modèle de détection automatique.
* Sous réserve que des sources officielles confirment que la ville est inondée au moment de l'acquisition de l'image SAR.

Cette échelle, représentée sur le Tableau 1, permet de comparer la qualité de plusieurs échantillons de référence, en fonction de la date des données de référence par rapport à la date d'acquisition de l'image, de la visualisation en fausses couleurs de l'inondation et d'autres données éventuelles. La visualisation en fausses couleurs correspond à une composition colorée permettant de mettre en évidence les zones ayant une amplitude élevée et connaissant une baisse de cohérence, c'est-à-dire, les zones urbaines probablement inondées.

Un des autres objectifs du stage consiste en la mise en forme des résultats du modèle. Comme l'outil FLORIA sera à terme utilisé par un grand nombre d'acteurs différents, il est important que les résultats soient facilement interprétables par tous. Le résultat brut du modèle étant un raster composé de scores de confiance, il nécessite un important effort d'interprétation. Pour simplifier ce processus, un traitement est appliqué au résultat, afin de l'obtenir sous forme d'un ensemble de vecteurs classifiés, comme décrit dans la Figure 2.

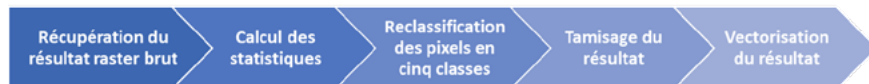


Figure 2. Traitements appliqués au résultat brut du modèle.

4. Evaluation des performances du modèle

Afin d'estimer la qualité du modèle, différentes métriques sont utilisées. Pour qu'elles puissent être calculées, il faut d'abord seuiller le résultat brut. En effet, le format brut de sortie du modèle est un raster composé de scores de confiance d'appartenance à la classe des pixels urbains inondés. Chaque pixel se retrouve attribué d'une valeur comprise entre 0 et 1. Pour seuiller les résultats du modèle, il est possible de représenter la courbe ROC, aussi appelée fonction d'efficacité du récepteur. Cette fonction permet de représenter le taux de vrais positifs en fonction du taux de faux négatifs. Elle fournit le seuil idéal afin de binariser le résultat, en maximisant le taux de vrais positifs par rapport au taux de faux négatifs. Une fois le résultat binarisé, il est possible de calculer la matrice de confusion du modèle afin d'obtenir les taux de vrais positifs, vrais négatifs, faux positifs et faux négatifs. Le modèle est alors évalué suivant plusieurs métriques : le rappel, la précision, le score F1, l'AUC (Area Under Curve) et le MCC (Matthews Correlation Coefficient).

Identifiant des zones	Zones similaires à celles d'entraînement			Zones différentes de celles d'entraînement		
	A	B	C	D	E	F
Rappel	0.932	0.990	0.955	0.644	0.686	0.883
Précision	0.154	0.128	0.361	0.049	0.153	0.053
Score F1	0.264	0.226	0.524	0.091	0.250	0.101
AUC	0.948	0.993	0.975	0.715	0.782	0.547
MCC	0.358	0.348	0.566	0.107	0.252	0.071

Tableau 2. Résultats du modèle de détection d'inondations urbaines initial.



D'après les résultats présentés dans le Tableau 2, il est rapide de constater que le modèle initial est performant sur des zones similaires à celles avec lesquelles il a été entraîné, en termes de géométrie, localisation et étendue de l'inondation. En revanche, le modèle n'est pas suffisamment performant sur des échantillons différents de ceux utilisés pour l'entraînement. Cela s'explique par le fait que le modèle n'a été entraîné que sur quatre zones différentes. Il est donc nécessaire de généraliser ce modèle.

5. Généralisation du modèle

L'objectif de l'outil FLORIA est d'être mis en production, c'est-à-dire d'être capable d'identifier les inondations urbaines dans n'importe quelle zone donnée sur le globe. Pour cela, au vu des résultats obtenus précédemment, il est impératif de généraliser le modèle. Dans un premier temps, toute la base de données, réalisée durant le stage, sur les inondations urbaines passées est utilisée afin d'entraîner un modèle le plus général possible. Cependant, les résultats de ce modèle ont été peu satisfaisants, les métriques d'évaluation présentant des valeurs inférieures à celles du modèle initial.

Plusieurs pistes sont évoquées pour expliquer ces différences. La première hypothèse se base sur l'idée que certaines zones de référence entraînent des erreurs car elles ne sont pas suffisamment spécifiques, ou alors qu'elles sont fausses. La seconde hypothèse est qu'il est possible qu'un tel modèle ne soit pas généralisable en raison de trop importantes différences de géométrie des zones urbaines à l'échelle mondiale. Cette dernière s'appuie sur les résultats obtenus dans la littérature scientifique, qui semblent n'obtenir des résultats satisfaisants que sur un nombre limité de zones, au maximum quatre. Le modèle initial n'étant lui aussi performant que sur quelques zones différentes, l'hypothèse qu'un modèle généraliste n'est pas réalisable peut être émise, du moins pas exclusivement à partir d'images SAR.

6. Conclusion et perspectives

Les dernières semaines de stage ont pour objectif d'explorer les hypothèses évoquées précédemment afin de déterminer la cause de l'échec de la généralisation du premier modèle. Pour cela, différents modèles vont être entraînés afin de caractériser l'impact de chacune des zones de référence sur les performances du modèle. Si la seconde hypothèse venait à se confirmer, il sera alors nécessaire d'envisager l'ajout de données d'autres types afin de généraliser le modèle, telles que des modèles numériques de terrain ou de surface, des informations sur les cours d'eau, des données LiDAR ou encore des données optiques.

La création d'un modèle de détection automatique des inondations à l'échelle globale est une première. Bien qu'encore difficile à généraliser, il est intéressant de constater que le modèle est capable d'identifier des inondations urbaines sur des zones similaires à celles d'entraînement. Son utilisation pour détecter des inondations urbaines dans des cas concrets est donc déjà envisageable, sous condition. Le modèle a notamment pu être testé en juin lors de la rupture du barrage de Kakhova, en Ukraine. Bien qu'il soit nécessaire de les améliorer, ces premiers résultats sont prometteurs.

Références

- Bamler, R. et Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 144, p. R1.
- Chini, M., Pelich, R., Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Hostache, R. et Matgen, P. (2019). Sentinel-1 InSAR Coherence to Detect Floodwater in Urban Areas: Houston and Hurricane Harvey as A Test Case, *Remote Sensing*, 112, p. 107.
- Li, Y., Martinis, S. et Wieland, M. (2019). Urban flood mapping with an active self-learning convolutional neural network based on TerraSAR-X intensity and interferometric coherence, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, p. 178-191.
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N. et Boni, G. (2016). Use of SAR Data for Detecting Floodwater in Urban and Agricultural Areas: The Role of the Interferometric Coherence, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 543, p. 1532-1544.
- Tay, C.W.J., Yun, S.-H., Chin, S.T., Bhardwaj, A., Jung, J. et Hill, E.M. (2020). Rapid flood and damage mapping using synthetic aperture radar in response to Typhoon Hagibis, Japan, *Scientific Data*, 71, p. 100.



Reconnaissance automatique et sémantisation d'objets dans une orthophoto pour des projets de relevés de corps de rue



PFE présenté par : Abdelwahab AZZAZ RAHMANI
Société d'accueil : ATGT TOPO3D
Directeur de PFE : Mikaël LIBERT
Correcteurs : Pierre GRUSSENMEYER et Tania LANDES
Encadrant : Antoine BILLAULT

1. Introduction

La cartographie urbaine nécessite des levés topographiques détaillés des rues, pour lesquels la photogrammétrie et la captation 3D sont des techniques précieuses. Elles permettent de capturer et de modéliser en 3D les caractéristiques complexes de ces environnements. Le traitement de ces données génère des nuages de points, des modèles 3D et des orthophotos, utilisés pour la création d'un plan topographique en utilisant des logiciels de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur).

ATGT utilise principalement des systèmes de capture mobiles tels que le MMS (Mobile Mapping System) ou le DIMORPH(c), qui est un système propriétaire basé sur la photogrammétrie, pour réaliser les levés de corps de rue. La création de plans topographiques se fait dans le pôle de production en utilisant les données traitées après la collection. Cependant, ce processus requiert des ressources humaines et du temps significatifs pour être effectué.

Ce projet de fin d'études est dans la continuité des travaux de Charly BASTARD-ROSSET, qui a développé un applicatif innovant lors de son projet de fin d'étude à l'ESGT. Cet applicatif permet de générer divers types de rasters thématiques à partir d'un nuage de points, améliorant ainsi le support pour la création de plans topographiques. L'objectif de ce projet est de proposer une solution automatisée pour le processus de création des plans topographiques en exploitant ces différentes sources de données.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif initial de ce projet est de trouver la solution la plus optimale en termes de performance, de robustesse et d'économie. Pour cela, nous avons choisi de développer une méthode basée sur l'intelligence artificielle, que nous comparerons ensuite à d'autres solutions payantes disponibles sur le marché.

3. Méthodologie

Dans cette étude, nous avons adopté une approche qui consiste à créer un modèle de segmentation sémantique basé sur l'intelligence artificielle, suivi de la vectorisation des résultats de la segmentation qui sont initialement en format raster (Fig. 1).

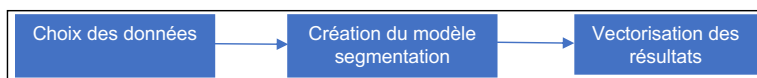


Fig. 1 : étapes de l'approche développée



3.1. Choix de données

Une décision importante que nous avons prise est d'utiliser l'orthophoto plutôt que le nuage de points dans notre solution. En effet, les objets difficiles à vectoriser pour le personnel dédié sont principalement les affleurants, tels que les petites structures qui sont mieux visualisées dans l'orthophoto, comme les bouches à clé et les bouches de lavage.

3.2. Création du modèle de segmentation

Pour créer un modèle de segmentation en utilisant l'intelligence artificielle, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

3.2.1. Choix de l'architecture

L'architecture U-Net est largement utilisée pour la segmentation sémantique sur le raster en raison de sa capacité à traiter efficacement les images et à capturer des informations contextuelles à différentes échelles [Sha, Y.2012]. Cette architecture permet de créer un modèle prêt à être utilisé pour l'étape suivante de la méthode.

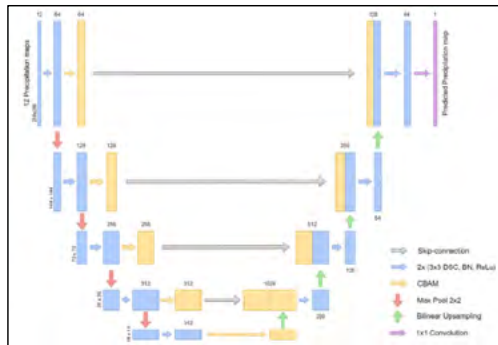


Fig. 2 : architecture U-Net pour la segmentation sémantique [Trebing, K. &al. 2012]

3.2.2. Entraînement du modèle

L'entraînement consiste à ajuster les poids et les paramètres du modèle en utilisant un ensemble de données d'entraînement annotées. Ces données comprennent deux ensembles d'images raster :

- Les images représentent des scènes réelles contenant différents objets et classes d'intérêt.
- Les annotations attribuent une étiquette sémantique à chaque pixel de l'image indiquant la classe à laquelle il appartient. Ces annotations servent de référence pour l'entraînement du modèle et permettent d'apprendre à ce dernier à segmenter les objets dans les images.

Dans notre cas, les données utilisées pour l'entraînement du modèle sont des petites images issues du découpage de l'orthophoto, et les annotations nécessaires pour l'entraînement sont produites à partir des fichiers DAO, où les objets à segmenter sont sélectionnés.

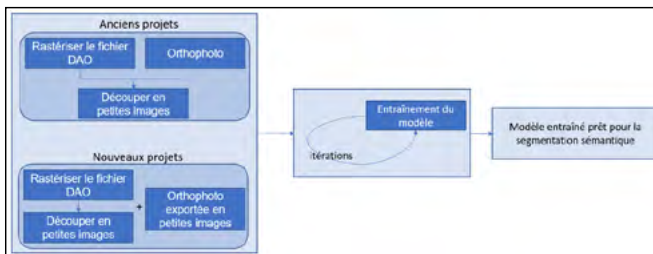


Fig. 3 : étapes suivies pour l'entraînement du modèle

3.3. Segmentation

Une fois l'entraînement terminé, nous pouvons tester le modèle sur de nouvelles données pour évaluer ses performances. Le processus de segmentation, tel qu'illustré Figure 4, se déroule comme suit :

- 1- Découpage de l'orthophoto en petites images
- 2- Segmentation des petites images
- 3- Spatialisation des résultats de la segmentation
- 4- Export des petites images segmentées

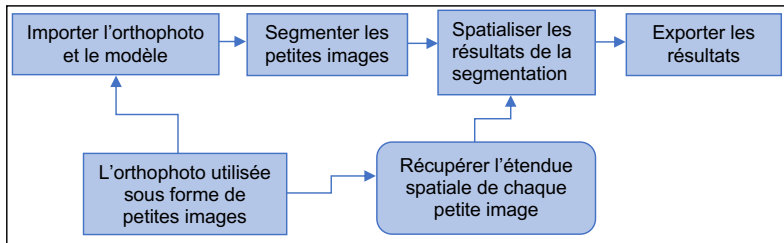
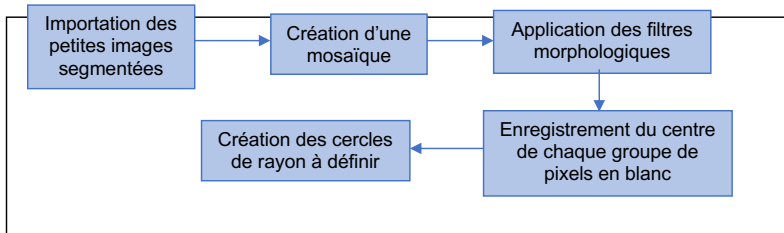


Fig. 4 : processus de segmentation

3.4. Vectorisation

Dans cette étape, les résultats de la segmentation sont convertis du format raster au format vecteur. Comme illustré dans la Figure 5, les résultats de la segmentation sont reconstitués pour former une mosaïque avec les mêmes dimensions que l'orthophoto d'origine. Cette mosaïque est ensuite soumise à des opérations de filtrage morphologique pour éliminer les pixels isolés. Ensuite, des opérations sont effectuées pour reconstruire les formes en vecteur, nous avons commencé par les formes circulaires.



4. Tests effectués

La difficulté de détecter les petits objets, en particulier les bouches à clé, dans la création et la vérification du plan topographique a motivé ce stage de fin d'études. Les omissions des petits objets compromettent la qualité et l'exhaustivité du plan. Pour remédier à cette problématique, les premiers tests et expérimentations se concentrent sur la reconnaissance automatique des bouches à clé.

Les tests réalisés visaient à trouver la meilleure combinaison de facteurs pour optimiser à la fois le temps de calcul et les performances du modèle. Les facteurs sont :

- 1- Choix de la taille du pixel terrain : Les deux tailles de pixels choisies sont 5 mm et 3 mm. Le choix de 5 mm est principalement basé sur des considérations visuelles, en tenant compte du diamètre des bouches à clé. Une résolution inférieure pourrait affecter la capture des détails et la précision de leur représentation. Le choix de 3mm dépend des produits générés par les différentes agences d'ATGT.



- 2- Nombre d'itérations pendant l'entraînement : Le nombre d'itérations lors de l'entraînement du modèle a un impact significatif sur sa convergence. En augmentant le nombre d'itérations, le modèle a plus d'opportunités d'apprendre des motifs précis présents dans les données d'entraînement. Cependant, il est crucial de réaliser des tests intermédiaires pour éviter le surajustement.
- 3- Le volume de données d'entraînement : le volume de données utilisé pendant l'entraînement d'un modèle a un impact significatif sur la qualité de l'ajustement de ses paramètres. En général, plus le volume de données est important, plus le modèle a de possibilités d'apprendre les caractéristiques et les motifs présents dans les données.

5. Résultats des tests de segmentation

Dans notre approche, la création du modèle optimal est basé sur les tests de l'influence des facteurs cités dans le paragraphe ci- dessus, nous testons chaque facteur indépendamment. La procédure est illustrée dans la Figure 6.

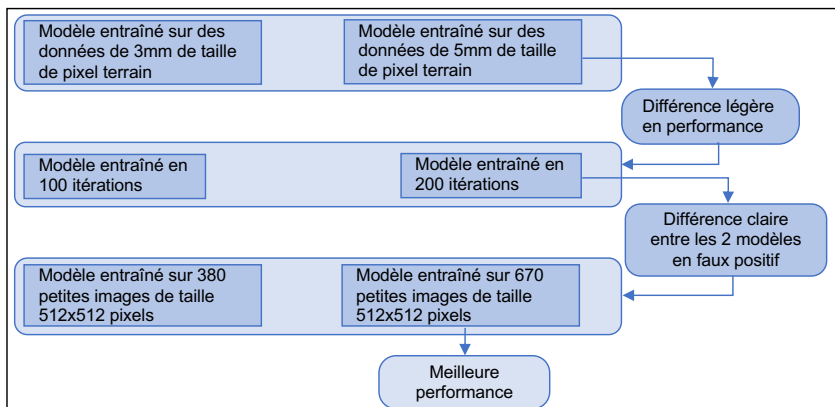


Fig. 6 : tests d'entraînement du modèle

6. Conclusion

Dans cette conclusion, il convient de mentionner que certains résultats détaillés de l'étude n'ont pas été présentés dans ce résumé. Cela est principalement dû à des contraintes de temps et d'espace, qui limitent la quantité d'informations pouvant être incluses dans cette section.

Dans cette étude, plusieurs pistes sont envisageables. Nous avons prévu notamment l'utilisation du MNT dans plusieurs étapes de l'étude. De plus, il est prévu de développer une interface conviviale pour faciliter l'utilisation de la solution automatisée.

7. Bibliographie

Trebing, K., Stańczyk, T., & Mehrkanoon, S. (2021). "SmaAt-UNet: Precipitation nowcasting using a small attention-UNet architecture." *Pattern Recognition Letters*, 145, 178-186.

Sha, Y., Zhang, Y., Ji, X., & Hu, L. (2021). "Transformer-unet: Raw image processing with unet." *arXiv preprint arXiv:2109.08417*.

Modélisation 4D du château de Wasenbourg dans le cadre du projet INTERREG VI



PFE présenté par : **Daéren Rigaud**
Société d'accueil : **ICube-Trio**
Directeur de PFE : **Mathieu Koehl**
Correcteur : **Emmanuel Moisan**
Encadrant : **Mathieu Koehl**



1. Définition des objectifs du projet et contexte historique

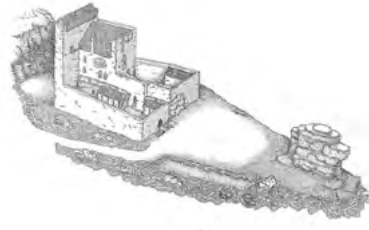
L'objectif de ce projet est d'effectuer une restitution 4D du château de Wasenbourg, surplombant le village de Niederbronn-les-Bains dans le Bas-Rhin, dans le cadre du projet européen INTERREG VI qui consiste à revaloriser plusieurs châteaux alsaciens (français et allemands) à travers la conception de maquettes, de vidéos de visite virtuelle, etc. Plus exactement, dans la mesure où nous sommes 2 étudiants à initier ce projet dont la durée est fixée à 3 ans, nous cherchons à définir plusieurs méthodes pour optimiser et instruire la restitution d'un château en ruines sous plusieurs phases historiques (au travers de guides, vidéos tutoriels, etc.) avec application concrète sur le château de Wasenbourg pour notre part, pour permettre à d'autres acteurs de découvrir ce type de projet dans de bonnes conditions à l'avenir. Par ailleurs, bien que plusieurs logiciels seront exploités dans ce projet, nous nous concentrerons sur la modélisation via le logiciel gratuit Blender, ainsi que la visualisation du modèle final dans un cube Immersif de Réalité Virtuelle sous le logiciel gratuit Unity.

Dans la mesure où aujourd'hui le château de Wasenbourg est en ruines, nous souhaitons effectuer une modélisation 4D en restituant les éléments d'origine. C'est pour cela que comprendre le contexte historique de ce château est capital pour créer le plus fidèlement possible les différentes parties du monument. Entre autres, nous avons recherché en particulier des éléments d'archives tels que des plans 2D, des croquis ou du moins des cotations pour éviter de modéliser uniquement à partir d'hypothèses, et de définir les différentes époques dans lesquelles le château sera modélisé. Selon les différentes théories recensées dans la monographie de Salesse (2018), le site du Wasenbourg présente des indices datant des époques préromaine, romaine, médiévale et moderne, s'appuyant généralement sur des trouvailles faites autour du site (roches en ruines appartenant à un ancien édifice démoli, objet datant d'une ère ancienne, etc.), par hasard ou à travers des fouilles organisées par un archéologue. Toutefois, beaucoup d'événements historiques ne sont pas garantis et restent hypothétiques, par manque d'informations précises. Par conséquent, dans ce projet nous allons représenter uniquement 2 phases historiques : l'époque actuelle avec le château dans son état actuel, et l'époque médiévale (XIII^e siècle plus précisément) où le château aurait vraisemblablement été construit. Nos sources principales pour reconstruire le château dans cette phase seront alors l'essai de restitution du dessinateur et historien Mengus (2004), ainsi que les échanges avec l'archéologue Jacky Koch de l'entreprise Archéologie Alsace, spécialiste des châteaux médiévaux alsaciens et participant également au projet INTERREG VI.





(a)

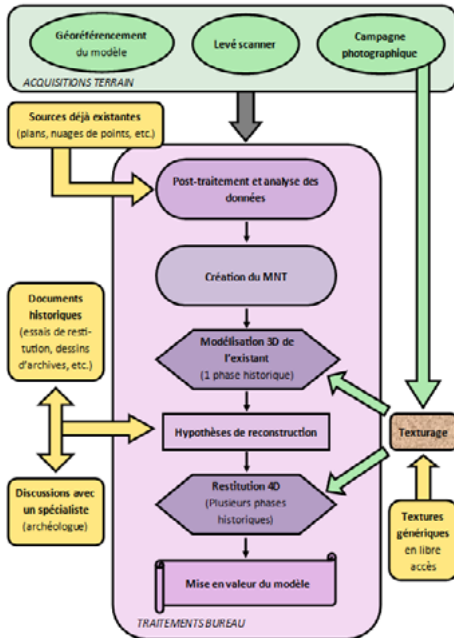


(b)

Figure 1. (a) Acquisition au drone du château de Wasenbourg à l'état actuel (Mars 2023) / (b) Essai de restitution du château de Wasenbourg à l'époque médiévale par Mengus (2004).

2. Acquisitions terrain et création du modèle de l'existant

En s'inspirant de projets antérieurs effectués dans les mêmes conditions ainsi que les travaux de Dell'Unto et al. (2013), nous pouvons définir une chaîne de traitement (voir figure 2) qui sera appliquée dans ce projet.



La première étape consiste alors à effectuer les acquisitions terrain nécessaires pour permettre la modélisation de l'état existant. Au travers de campagnes photographiques aériennes (drone) et terrestres traitées sur le logiciel Metashape, ainsi que des levés au scanner laser et par tachéométrie traités respectivement sur FARO Scene et Covadis, nous obtenons un nuage de points géoréférencé et échantillonné à 1cm, qui servira à modéliser le château à l'état actuel par maillage. Nous avons au préalable construit le MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui correspond à la représentation de la surface au sol autour du château. Une étude comparative des différents logiciels à notre disposition a été effectuée pour définir la meilleure option permettant d'une part d'isoler les points correspondant au sol dans le nuage, d'autre part pour modéliser le MNT avec la meilleure fiabilité possible. Cette étude se base sur l'algorithme de comparaison M3C2 de Lague et al. (2013), disponible dans le logiciel CloudCompare. Selon plusieurs critères, nous avons retenu le logiciel Trimble Realworks qui est le plus pertinent pour construire un MNT (échantillonné à 1m). Toutefois, le texturage sera issu d'une orthophoto construite sur Metashape.

Figure 2. Chaîne de traitement appliquée au projet, inspirée de Dell'Unto et al. (2013).

Le modèle 3D du château a également été effectué par maillage du nuage de points, mais sur le logiciel Metashape, dont l'algorithme de modélisation est plus adapté pour une forme aussi complexe.

Un autre avantage est la possibilité de concevoir automatiquement le texturage sur un modèle en entier, en traitant toutes les photos alignées en même temps, ce qui n'est pas forcément le cas sur d'autres logiciels. Il est important de préciser que le rocher de Watchfels, situé au Nord-est du Site du Wasenbourg et riche en informations historiques, a également été modélisé.



Figure 3. (a) Représentation du château sur Blender / (b) Représentation du château sur Metashape (état actuel).

3. Restitution 4D : modélisation du château à l'époque médiévale

En utilisant sur le modèle 3D du château à l'état actuel comme support, nous pouvons effectuer la restitution de ce dernier à l'état d'origine, sur le logiciel Blender. Cela constitue une tâche pluridisciplinaire puisqu'elle met en lumière des compétences d'infographiste et d'historien. Nous nous sommes limité à la reconstruction du château sur la partie extérieure, la partie intérieure du logis n'a donc pas été représentée par manque de temps.

De manière globale, cette version du château a été modélisée par primitives géométriques, c'est-à-dire en utilisant des formes simples (cubes, cylindres, etc.) et en les modifiant grâce à des outils paramétriques tels que le changement de rotation, de translation, d'échelle, etc. Toutefois, certains éléments ayant des formes complexes et qui semblent avoir été déjà présents depuis la construction du château (tels que les rochers sur lesquels s'appuient l'édifice) n'ont pas été reconstruits. Nous avons alors décidé d'isoler ces parties du maillage issu du modèle de l'état actuel, et de les combiner avec les éléments issus des primitives géométriques. Nous parlons dans ce cas de modélisation hybride.

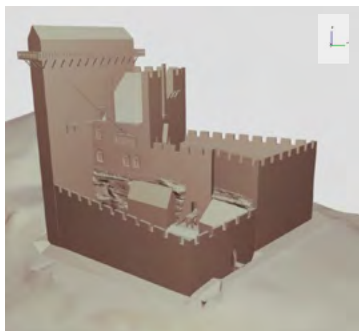


Figure 4. Maquette blanche du château à l'état d'origine (visualisation sur Sketchfab, sans texturage).

Comme expliqué dans la partie 1, nous utilisons plusieurs sources pour en déduire des théories sur la forme du château à l'état d'origine. Toutefois, certains éléments du château ont été restitués sur base d'hypothèses, faute de données fiables. Par conséquent, afin d'apporter une transparence sur le



travail rendu, nous avons effectué un premier texturage en nous inspirant des travaux de Landes et al. (2019) en représentant les différents éléments sous une couleur unie indiquant le niveau de certitude.

Un texturage plus réaliste, basé sur la cartographie UV, sera également proposé pour les éléments modélisés par primitives géométriques, en récupérant des textures génériques et gratuites sur des sites spécialisés.

4. Mise en valeur du modèle : représentation dans le Cube VR

La dernière étape consiste à mettre en valeur le modèle. Dans le cadre du projet INTERREG, le modèle sera utilisé pour une vidéo de visite virtuelle avec les autres châteaux. Toutefois, nous avons également mis en place à part une visite virtuelle en temps réel à travers le Cube VR, qui correspond à un ensemble de 6 écrans avec des caméras et des projecteurs, permettant d'interagir en 3 dimensions sans utiliser un casque conventionnel où la personne est comme fermée du monde réel. Seuls des manettes et des lunettes 3D sont nécessaires pour la détection des mouvements grâce aux caméras. L'idée est donc d'intégrer le modèle 4D dans le Cube, qui s'appuie sur le logiciel Unity agrémenté d'un plugin spécialisé, et d'y proposer des interactions comme les collisions aux murs et le déplacement sur un sol. Des options telles que la possibilité de changer rapidement dans quelle période historique interagir, ou encore définir des points de téléportation d'une partie du château à une autre sont envisagées également.

5. Conclusion et perspectives

A la rédaction de ce document, le texturage du modèle ainsi que sa mise en valeur en Réalité Virtuelle ne sont pas encore effectués. Nous vous invitons donc à consulter le mémoire de fin d'études qui comporte en détails tous les résultats obtenus, ou participer à la soutenance de ce projet.

Ce projet de fin d'études aura permis de découvrir une application de la topographie originale, pluridisciplinaire et très différente des travaux conventionnels réalisés dans ce milieu. Il met en jeu des compétences variées ainsi que la manipulation de nombreux logiciels complets, parfois complexes mais non pas inintéressants.

Toutefois, certaines perspectives n'ont pas pu être effectuées par manque de temps, mais seraient intéressantes à développer. Par exemple, il serait pratique de proposer des méthodes pour obtenir des bibliothèques de modèles 3D dont il serait facile de modifier les paramètres (pour les fenêtres notamment) sans avoir à reconstruire entièrement le modèle. Nous pouvons également penser à restituer le modèle à partir d'un croquis, importé directement dans le logiciel avec détection des contours et des différents éléments, sans avoir à tout refaire à la main. Cela permettrait d'économiser un temps non-négligeable sur la restitution du château.

Références

Dell'Unto, N., Ferdani, D., Leander Touati, A.-M., Dellepiane, M. et Callieri, M. (2013). Digital reconstruction and visualization in archaeology Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project, in, p. 621-628. Disponible sur : <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804>

Lague, D., Brodu, N. et Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, p. 10-26. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>

Landes, T., Heissler, M., Koehl, M., Benazzi, T. et Nivola, T. (2019). Uncertainty Visualization Approaches for 3d Models of Castles Restituted from Archeological Knowledge, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42W9, p. 409-416. Disponible sur : <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-409-2019>

Salesse, J. (2018). *Wasenbourg si tu m'étais contée...* Les amis de Wasenbourg

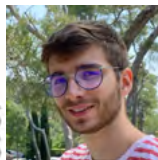


Création d'un outil de planification d'itinéraires et de guidage en temps réel pour des relevés de cartographie mobile

PFE présenté par : **Paul Verchere**
Société d'accueil : **TT Géomètres Experts**
Directeur de PFE : **Arthur Picard**
Correcteur : **Emmanuel Moisan**



**GÉOMÈTRES
EXPERTS**



1. Contexte et objectifs du projet

L'entreprise TT Géomètres Experts s'est dotée en 2014 de l'un des premiers systèmes de cartographie mobile de France. L'appareil se positionne généralement sur une voiture, et permet d'acquérir de manière continue des nuages de points sur plusieurs centaines de kilomètres de voirie.

La chaîne de production est parfaitement maîtrisée par l'entreprise, qui post-traite les données GNSS et les combine avec celles de la centrale inertielle. Après une phase supplémentaire de correction de la trajectoire, le nuage acquis par les scanners est généré.

Un des principaux problèmes rencontré par l'entreprise concerne les difficultés de guidage en temps réel et de planification du trajet. En effet, le guidage est réalisé « à la volée » par le copilote, avec pour seule optimisation son intuition. En plus de veiller au bon déroulement de l'acquisition, ce dernier guide le conducteur dans un réseau routier parfois complexe. Le copilote suit l'avancée du trajet sur son écran de contrôle où son historique de navigation est affiché sur un fond de plan.

La méthode de mesure en place requiert de mesurer deux fois chaque rue d'intérêt : une fois dans chaque sens si cela est possible et deux fois dans le même sens dans le cas des rues à sens unique. Cela permet de s'assurer de la précision des données, de leur exhaustivité, mais aussi de limiter l'influence des erreurs sur les mesures GNSS.

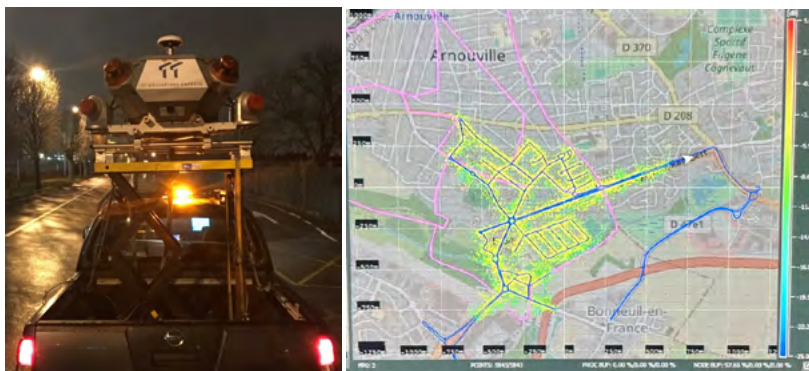


Fig. 1 : Système d'acquisition et écran de suivi du trajet

L'objectif de ce projet est la mise en place d'un outil informatique de planification d'itinéraires et de navigation, afin de simplifier les tâches du copilote et d'optimiser la durée de ces missions. De plus, cet outil permet d'avoir une estimation des temps d'acquisition pour mieux évaluer leurs coûts, et de s'assurer de l'exhaustivité des données au moment de l'acquisition.



2. Etat de l'art

L'utilisation d'une application permettant de passer par toutes les rues d'un réseau routier, intégrée à une solution de guidage n'est à ce jour pas à portée de main. On retrouve des applications similaires internes à des forces armées, afin d'assister leurs tournées de surveillance en milieu urbain. Il existe aussi un marché dans les applications qui guident les engins de déneigement et de contrôle de chaussées. Cependant, les problématiques auxquelles elles répondent ne sont pas en phase avec les contraintes de double passage citées précédemment.

Les principaux outils informatiques dits « de routage » sont destinés à l'optimisation de divers types de tournées. Ils fonctionnent tous par le renseignement de points d'intérêt par lesquels il faut passer (pour des livraisons, le ramassage de poubelles par exemple). Ces points sont ensuite ordonnés pour réduire le coût total de la tournée. Certains de ces outils incluent un géonavigateur permettant de faciliter le guidage.

On pourrait penser utiliser une telle application pour répondre à notre problématique, cependant les algorithmes de résolutions sont d'une complexité exponentielle par rapport au nombre de points d'intérêt.

Parmi tous les types de problèmes de routage, celui qui nous intéresse est le problème à l'origine de la théorie des graphes appelé « Problème du postier chinois ». Ce problème consiste à minimiser la longueur totale de la tournée d'un facteur qui doit parcourir toutes les rues d'une ville.

Ce problème possède plusieurs variations, dont les solutions sont pour la plupart calculées dans un temps fini. Pour cela, on se base sur un graphe routier qui représente les rues par des arêtes, et leurs intersections par des nœuds.

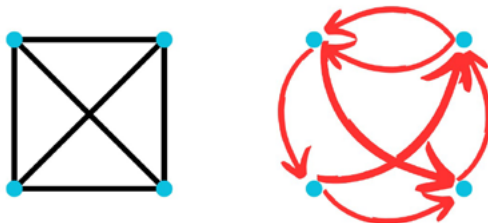


Fig. 2 : **Gauche** : Graphe possédant des arêtes de mêmes poids, **Droite** : Chemin de postier le plus court correspondant (sans retour au point initial)

3. Mise en forme des données routières

Il n'existe pas de graphe routier de la France accessible gratuitement. Les solutions qui s'en rapprochent le plus correspondent aux linéaires de voies disponibles à l'échelle de la France dans la BD_Topo de l'IGN, sur OpenStreetMap ou par l'intermédiaire d'API de fournisseurs privés de données géographiques. La solution proposée par OpenStreetMap a été retenue pour des raisons de mise à jour des données.

Il a alors fallu mettre en forme ces données sous forme de graphe, qui met en relation les nœuds (intersections) entre eux par le biais d'arêtes (tronçons de routes). Des corrections de topologies ont été appliquées afin de corriger des segments mal reliés géométriquement à ses voisins. Ces corrections permettent de créer un graphe proche de la réalité, où toutes les rues sont connectées entre elles.

La première partie fonctionnelle de l'application développée pendant ce stage consiste à transformer un fichier comportant un linéaire de voies extrait de la base de données OpenStreetMap et de la transformer en graphe. Les routes étant catégorisées en sous-types, on filtrera les routes privées, les chemins inaccessibles ainsi que les routes d'intérêt nul. Le graphe peut alors être exporté sous forme sérialisée dans un fichier texte pour une réutilisation future ou une analyse qualitative.

4. Résolution du problème de routage

Le graphe crée automatiquement présente des arêtes dirigées (qui ne sont parcourables que dans un sens) et multiples (plusieurs arêtes peuvent lier deux mêmes nœuds). Une bibliothèque Java de gestion de graphe appelée *JgraphT* est utilisée pour implanter les méthodes de pré-traitement du graphe. Elle permet entre autres de détecter le plus grand élément fortement connecté du graphe, c'est-à-dire la plus grande partie du graphe, dont toutes les rues sont accessibles, peu importe le point de départ.

La zone importée dans le programme étant plus grande que la zone d'intérêt, on définit la sous-zone d'intérêt par un polygone de sélection. L'algorithme de résolution du Problème du postier chinois existe dans la bibliothèque, cependant, il ne considère que le sous-graphe d'intérêt et ne prends pas en compte l'ensemble du réseau. Ce n'est pas le cas de la version dite rurale de ce problème qui n'est pas implémentée. Sa résolution est équivalente à créer un « cycle d'Euler » de moindre coût dans le graphe par le dédoublement de certaines arêtes. Ce cycle est défini par une boucle qui passe par toutes les arêtes d'un graphe avant de revenir au point de départ.

Pour simplifier, trouver un tel cycle est équivalent à équilibrer, pour chaque nœud, le nombre d'arêtes entrantes que d'arêtes sortantes. Pour cela, on utilise un algorithme d'appariement qui relie les nœuds excédentaires aux nœuds déficitaires. La valeur que l'on cherche à minimiser est la distance, qui est calculée par l'algorithme de Dijkstra. Enfin, les nœuds sont ordonnés pour trouver l'ordre de passage aux intersections. Tous ces algorithmes sont implémentés dans la bibliothèque *JgraphT*.

5. Intégration à une application mobile

Le code Java permettant le calcul du graphe et la résolution du problème du postier chinois a été inclus à une application Android. Pour simplifier l'intégration de cartes à l'interface graphique, le kit de développement du fournisseur de cartes MapBox a été choisi. Cet ensemble d'outils permet de développer gratuitement des applications déployées sur un faible nombre d'appareils.

Avec ces outils, un écran de visualisation des données graphiques a été mis en place. Cela permet de se rendre compte de l'emprise de données OpenStreetMap qui ont été recalculées sous forme de réseau. Cet écran permet dans un second temps de choisir l'emprise de la zone à mesurer.

Les points de passage aux nœuds du réseau (intersections du réseau routier) sont ensuite ordonnés par les méthodes abordées précédemment. Ensuite, leurs coordonnées sont envoyées à l'API de navigation de MapBox, qui par le biais d'une connexion internet renvoie un message de navigation.

Ce message sérialisé est utilisé dans une interface de géonavigation, ce qui permet de fournir à l'utilisateur des informations « virage par virage ». À la manière des applications de guidage grand public (tel que Waze, Google Maps, Apple Plan, etc...), l'avancée du trajet est suivie à l'écran où se superposent des statistiques sur l'avancée du trajet.

L'historique des arêtes parcourues est stocké dans un fichier texte, ce qui permet, en cas d'erreur de navigation ou de crash de l'application, de redémarrer le calcul sur la zone d'intérêt tout en prenant en compte les rues déjà parcourues.

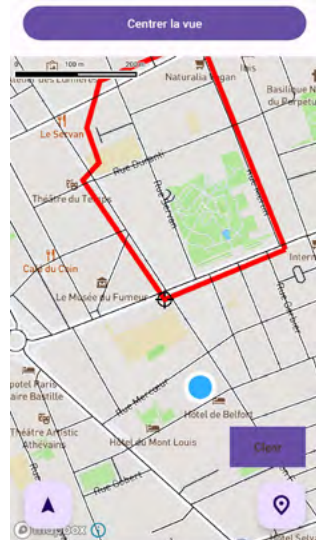


Fig. 3 : écran de sélection de la zone à parcourir

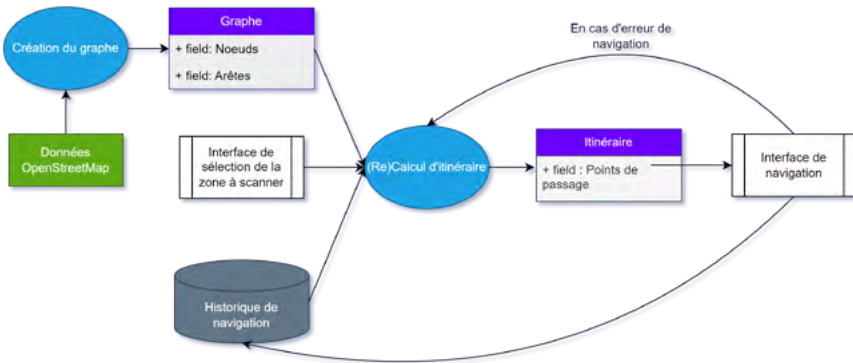


Fig. 4 : Schéma du fonctionnement général de l'application

6. Perspectives

Lors de ce projet de fin d'études, une preuve de concept d'une application de guidage de scanner de cartographie mobile a été réalisée. On peut alors dire que l'objectif principal du projet a été atteint.

Le calcul du réseau routier à partir de données en libre accès est maîtrisé. Quelques cas-limites ont cependant été identifiés. Ces derniers apparaissent rarement et dépendent de la qualité variable des données OpenStreetMap. On peut cependant faire fi de ces défauts par un recalcul en temps réel des itinéraires.

La résolution du problème du postier chinois ne pose aucun problème pratique, et l'utilisation de bibliothèques spécifiques permet de déterminer la solution dans un temps restreint.

Les premières limitations pratiques apparaissent lors de la phase de guidage. En effet, chaque trajet doit passer par l'API MapBox dit « de direction ». Cependant, chaque requête ne peut comporter que jusqu'à 25 points. C'est très peu par rapport à la taille de certains chantiers, dont le nombre d'intersections traversées est de l'ordre du millier. Ces requêtes ne peuvent pas être concaténées, ce qui oblige à enchaîner les différents trajets, composés chacun de 25 points maximums.

La flexibilité du programme réside dans sa capacité à recalculer les itinéraires pour s'adapter aux aléas de circulation. Cependant, il serait intéressant d'intégrer des fonctions permettant à l'utilisateur d'interdire le programme de le guider dans une rue dont le passage est restreint.

Un autre défaut du programme réside dans sa dépendance aux réseaux mobiles sans fil. Dans les faits, ce n'est pas très grave, mais cela peut, dans des conditions défavorables provoquer des bugs ou des ralentissements.

Les dernières fonctionnalités et l'analyse détaillée du programme sont à retrouver dans le mémoire du projet de fin d'études associé.

7. Bibliographie

Sökmen, Ö, Emeç Ş, Yılmaz M, Akkaya G, (2019). «An overview of Chinese postman problem». 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies. T. 10.

Mise en place d'un projet pilote dans le vieux Lausanne pour une restitution 3D du quartier par combinaison d'imagerie drone et piétonne en vue d'une intégration dans un moteur de rendu temps réel

PFE présenté par : **Etienne SOMMER**
Société d'accueil : **Uzufly**
Directeur de PFE : **Théo BENAZZI**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Théo BENAZZI**



1. Contexte et objectifs du projet

L'activité principale de la société *Uzufly* est la production de jumeaux numériques de quartiers, de villes et de territoires à partir d'imagerie drone ou hélicoptère. Cette activité a suscité l'intérêt de studios visuels, mais les méthodes déjà mises en place ne permettent pas d'obtenir une résolution suffisante de l'environnement photoréaliste pour une visualisation selon un point de vue piéton.

Pour répondre à cette demande, ce Projet de Fin d'Etudes a pour but de combiner les techniques de photogrammétrie aérienne et terrestre afin de restituer le vieux Lausanne de manière immersive. Il sera nécessaire de mettre en place une méthode d'acquisition sur le terrain puis de traitement des données pour arriver au résultat souhaité tout en étant capable de reproduire le procédé dans n'importe quelle ville.

Le résultat escompté est un jumeau numérique représentatif du vieux Lausanne, reproduisant fidèlement sa morphologie et son atmosphère unique. La dernière phase de ce projet consistera à l'intégrer dans un moteur de rendu temps réel.

2. Présentation de la zone d'étude

Le projet porte sur le quartier historique en plein centre de Lausanne. C'est un quartier majoritairement piéton qui comporte de nombreux bâtiments remarquables tels que la Cathédrale, l'Ancienne Académie, le Château Saint-Maire, la Préfecture ou le Grand-Conseil. Ce riche patrimoine culturel a motivé la mise en place du projet dans ce quartier en particulier.

La figure 1 présente la zone de 35 hectares qui a été relevée par drone, et les 6 hectares au sein de cette zone qui ont été relevés par de l'imagerie piétonne sont présentés par la figure 2.



Fig. 1 : Zone de relevé par drone

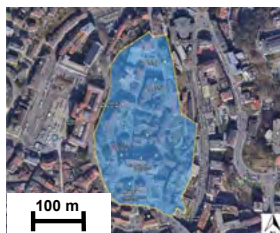


Fig. 2 : Zone de relevé piéton



3. Matériel utilisé et méthodes d'acquisition

La complexité de l'étude a nécessité d'utiliser plusieurs capteurs. La zone rouge qui est présentée par la figure 1 a été relevée avec un drone *DJI Matrice 300 RTK* équipé d'une caméra *DJI P1* avec un objectif ayant une distance focale de 35 millimètres. Environ 3500 images ont été acquises de cette manière et ont été directement géoréférencées grâce à la technologie *RTK*. L'utilisation de la fonction permettant de prendre des images obliques a permis de prendre des photos des façades des bâtiments en plus des images nadirs, et le suivi de terrain a permis de maintenir une altitude constante de 95 mètres par rapport au sol, et donc une taille de pixel au sol constante de l'ordre du centimètre. Des prises de vue cycliques manuelles se concentrant sur la zone piétonne ont été prises pour consolider le modèle et texturer les façades des bâtiments qui ne sont pas accessibles depuis le sol.

Pour intégrer le photomaillage dans un moteur de rendu temps réel avec un point de vue piéton, la résolution centimétrique des images prises avec le *DJI M300* ne suffit pas. Les photographies des façades des bâtiments de la zone piétonne ont été réalisées avec un appareil *Sony Alpha 7R4* équipé d'un objectif ayant une distance de focale de 14 millimètres. L'appareil a été monté sur un stabilisateur *DJI Ronin*, lui-même fixé sur une perche en carbone, de manière à avoir l'appareil à environ 3 mètres au-dessus du sol et photographier chaque façade du sol jusqu'au toit en une seule fois. L'appareil a été réglé pour prendre une photo par seconde afin d'avoir un recouvrement suffisant tout en se déplaçant à une allure piétonne naturelle. Environ 3200 images ont été prises de cette manière. Une caméra *GoPro Hero 9* a été utilisée pour prendre des images du sol. Son objectif fish-eye a pour avantage de limiter le nombre d'images pour avoir un recouvrement suffisant sur toute la chaussée. Environ 12 200 images ont été prises pour couvrir l'ensemble de la zone piétonne.

En se contentant des méthodes présentées ci-dessus, le modèle final aurait une résolution millimétrique sur le sol et les façades, mais la texture appliquée sur le toit des bâtiments aurait comme source les images prises au *DJI M300*, et donc une résolution centimétrique. Pour remédier à ce problème, le drone *DJI Mavic 3E* a été utilisé pour compléter les acquisitions sur la Cathédrale, l'Ancienne Académie et le Château Saint-Maire. Cette méthode permet donc d'avoir des images des toitures des bâtiments avec une résolution millimétrique, mais aussi de consolider le géoréférencement grâce au positionnement *RTK*. Plus de 7000 images ont été acquises de cette manière.

4. Homogénéisation radiométrique

L'utilisation de plusieurs capteurs implique une différence de colorimétrie malgré des acquisitions faites sous un couvert nuageux constant. Cela a pour conséquence des textures non homogènes lors de l'application de celles-ci sur le maillage. Un travail d'homogénéisation a été nécessaire pour corriger les couleurs des images venant du *DJI Mavic 3E* en se basant sur les images venant de l'appareil *Sony*. Les bibliothèques *OpenCV* et *Numpy* disponibles avec le langage de programmation *Python* ont permis de réaliser de manière automatique cette homogénéisation sur les images pour lesquelles elle était nécessaire. Au lieu de modifier les valeurs Rouge, Vert, Bleu, les expériences ont montré que les résultats sont meilleurs en modifiant les valeurs de saturation et de luminosité tout en gardant une teinte constante. La figure 3 présente les résultats de l'homogénéisation sur une image de l'Ancienne Académie.

En complément de cette méthode, une homogénéisation des couleurs en se basant sur les points de jonction a été réalisée sur l'ensemble des images de manière à assurer une cohérence entre tous les capteurs.

Enfin, une harmonisation des couleurs entre les différents maillages a été faite de manière à ne pas distinguer les différentes zones de reconstruction.





Fig. 3 : Homogénéisation des valeurs de saturation et de luminosité

5. Reconstruction de la scène et décimation du maillage

Sur les 26 000 images acquises, 19000 images ont été gardées. Elles ont été orientées de manière automatique à l'aide d'un algorithme *Python* exécutable dans la console du logiciel *Metashape*. Le géoréférencement du projet a été assuré grâce aux images ayant une position *RTK* et grâce à des points de contrôle répartis dans toute la zone.

Au vu de la taille de la scène, une reconstruction unique n'est pas envisageable. La zone a alors été découpée en plusieurs tuiles de manière à ce que chaque reconstruction nécessite environ 80 *Gigaoctets* de mémoire *RAM*. Les tâches ont ensuite été réparties sur 4 ordinateurs fonctionnant en réseau.

Aucune limite n'ayant été fixée, les triangles qui composent le maillage sont de l'ordre de quelques millimètres dans la zone piétonne de Lausanne, ce qui rend les maillages complexes et lourds à traiter pour les ordinateurs. La bibliothèque *Python pymeshlab* ([Cignoni et al., 2008]) a été utilisée pour décimer le maillage et ne garder que 20% des triangles, puis pour lisser les normales des triangles afin d'aplanir les surfaces tout en garantissant que les arêtes des bâtiments soient intactes.

Les surfaces de sol qui ont été relevées avec la caméra *GoPro* sont toujours constituées d'un nombre trop important de triangles, malgré une première décimation. Une deuxième est alors réalisée à l'aide du logiciel *Blender*. Elle a l'inconvénient d'être manuelle, mais permet d'adapter la taille des triangles selon la quantité d'information nécessaire pour représenter chaque surface.

Les figures 4 et 5 présentent le résultat de la décimation automatique avec *pymeshlab*, puis de la décimation manuelle avec *Blender*. Cette méthode a été appliquée sur toutes les surfaces au sol où la *GoPro* a été utilisée. De nouvelles textures ont ensuite été appliquées sur les maillages décimés, ce qui a permis d'avoir un résultat visuel identique tout en ayant gardé jusqu'à moins de 5% du nombre original de triangles.



Fig. 4 : Maillage après décimation automatique avec *pymeshlab*

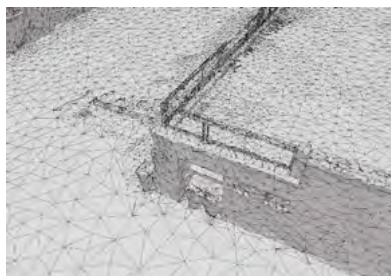


Fig. 5 : Maillage après décimation manuelle sur *Blender*

6. Intégration dans un moteur de rendu temps réel

Un moteur de rendu classique et un moteur de rendu en temps réel se distinguent principalement par la manière dont ils traitent et affichent les graphismes. *Blender*, en tant que moteur de rendu classique, génère des images statiques ou des séquences d'images pour les animations, un processus qui peut prendre beaucoup de temps, parfois plusieurs heures, voire des jours, selon la complexité de la scène. Cela permet d'obtenir une qualité d'image très élevée, idéale pour des productions cinématographiques ou des animations 3D, mais n'est pas adapté pour des applications nécessitant une interaction en temps réel.



Fig. 6 : Rendu en temps réel de l'Ancienne Académie dans un jeu vidéo

de qualité visuelle très élevée.

Les figures 6 et 7 présentent l'intégration de l'environnement photoréaliste dans le logiciel *Unreal Engine 5*. Ce ne sont pas des images calculées en avance, ce sont bien des images qui sont obtenues en temps réel, dans un environnement où l'on peut se déplacer de manière fluide sans aucune latence. Des phénomènes météorologiques, des objets avec lesquels on peut interagir, ou bien des arbres ou des véhicules en mouvement peuvent ensuite être ajoutés pour enrichir l'expérience immersive.

À l'inverse, le logiciel *Unreal Engine 5* utilisé pour ce projet est un moteur de rendu temps réel. Il est conçu pour produire des images à une vitesse suffisamment rapide (généralement 30 à 60 images par seconde) pour créer l'illusion de mouvement et permettre l'interaction en temps réel. Cela est crucial pour les jeux vidéo, les simulations et les expériences de réalité virtuelle ou augmentée. Si la qualité d'image peut être légèrement inférieure à celle de *Blender*, les progrès technologiques récents ont permis aux moteurs de rendu temps réel d'atteindre un niveau



Fig. 7 : Aperçu de la zone d'acquisition piétonne dans Unreal Engine 5

7. Conclusion et perspectives

En somme, ce projet innovant a permis de mettre en place une méthode d'acquisition et de traitement de données photogrammétriques aériennes et terrestres pour créer un jumeau numérique détaillé du vieux Lausanne. L'Ancienne Académie a été modélisée manuellement pour comparer les 2 méthodes de restitution et montrer leurs avantages et inconvénients.

Tous les processus mis en place qui le permettent ont été automatisés de manière à pouvoir appliquer cette méthode dans d'autres villes. Le produit final, intégré à un moteur de rendu en temps réel, offre à tout le monde la possibilité de s'immerger pleinement dans l'exploration virtuelle de cette partie historique de la ville. Cela permettra aux utilisateurs d'explorer le jumeau numérique de Lausanne comme s'ils se trouvaient sur place. Cet outil promet d'offrir de nombreuses applications, telles que la réalité virtuelle et augmentée, les jeux-videos, l'éducation, l'urbanisme, le tourisme, et plus encore.

8. Référence

[Cignoni et al., 2008] Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., and Ranzuglia, G. (2008). MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool. In Sixth Eurographics Italian Chapter Conference, pages 129-136.

Acquisition, traitement et analyse temps réel de données photogrammétriques acquises à l'aide d'un bras robotisé dans le cadre de la numérisation de collections de sciences naturelles.

PFE présenté par : **Nicolas Marty**
Société d'accueil : **HEIG-VD**
Directeurs de PFE : **Xavier Muth et Adrien Gressin**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



1. Introduction

Ce projet de fin d'étude s'inscrit dans le cadre d'un programme de *SwissCollNet* porté par l'académie des sciences naturelles, portant sur la digitalisation de collections de sciences naturelles.

Dénommé *MultiDigitaliS*, ce projet est une collaboration entre quatre musées suisses (Lausanne, Genève, Neuchâtel et Bâle) et deux écoles d'ingénieurs suisses (HEIG-VD, HE-Arc). Il intègre le développement d'un outil polyvalent pour la digitalisation 2D et 3D des collections. Cette acquisition devra s'adapter à une forte variabilité des textures et des formes tout en étant le plus autonome possible. Ce projet inclut également d'autres axes de développement : la conception d'un visualiseur 3D, la prise en compte de données multispectrales ou encore l'acquisition d'objets stockés en fluides.

Ma participation au projet porte sur le développement et la mise en œuvre d'une solution *open source* permettant la reconstruction 3D d'un objet de façon fiable, précise et contrôlée. Cette solution doit permettre la digitalisation de milliers de petits spécimens de tailles variés. Elle génère un nuage de points à partir de jeux d'images acquises à l'aide d'un bras robotisé dont les positions et orientations sont connues.



Fig. 1 : Robot utilisé pour l'acquisition, exemple de spécimen (taille de 1 cm) et schéma d'acquisition générique.

Ainsi, cette reconstruction 3D est réalisée en simultanée de l'acquisition robot pour pouvoir minimiser le temps de modélisation. Pour s'assurer d'une bonne qualité, une analyse des données en temps réel permet de détecter les faiblesses dans nos acquisitions. Des critères ont été développés et permettent à partir du nuage de points partiels ou des données issues de la reconstruction, de pouvoir contrôler cette acquisition. Ces critères sont adaptables et dépendront du type et de la taille de l'objet. Ils seront visualisables à travers un modèle approché calculé en amont de l'acquisition.

Tous ces critères permettront de valider notre nuage de points partiels et d'assurer la génération du nuage de points denses et des textures, qui se feront en post-acquisition.



2. Choix des méthodes

Logiciels

Une première recherche bibliographique a été nécessaire, pour mieux connaître les logiciels *open source* de photogrammétries et voir leurs différences en termes de performances et de fonctionnalités. Cependant, plusieurs critères étaient assez déterminants dans notre processus d'acquisition et permettaient de faire rapidement un premier choix des logiciels à examiner. En effet, les photos seront prises à l'aide d'un bras robot, il fallait donc pouvoir trouver un logiciel qui puisse prendre en compte ces positions/orientations des caméras a priori, pour accélérer le temps de traitement. Ce critère a déjà permis d'éliminer plusieurs logiciels comme, *Regard3D*, *VisualSFM*, *OpenMVG*, *PPT GUI* qui ne proposent qu'un processus d'acquisition classique sans prise en compte des positions.

A l'issue de ce premier choix, seulement un logiciel semblait prendre en compte cette fonction. De plus, il fallait pouvoir facilement intégrer le logiciel dans nos propres programmes pour qu'il puisse à l'avenir, être facilement implémentable et utilisable avec un bras robot. De ces critères, est ressorti uniquement *Colmap*, il est de plus régulièrement mis à jour depuis juin 2018.

<u>Logiciel</u>	<u>Extraction des points caractéristiques</u>	<u>Appariement des images</u>	<u>Génération du nuage de points partiels</u>	<u>Temps total</u>
<i>Metashape</i>	4 min 36 s		3 min 29 s	8 min 06 s
<i>Meshroom</i>	35 min	29 min 33 s	12 min 55 s	1 h 18 min 11 s
<i>Colmap</i>	1 min 21 s	14 min 12 s	55 min 50 s	1 h 11 min 23 s¹
<i>Regard 3D</i>	52 min 12 s		10 min 04 s	1 h 02 min 12 s
<i>VisualSFM</i>	2 h 20 min 17 s		1 min 55 s	2 h 22 min 12 s

Fig. 2 : Comparaison des temps de calcul à partir d'un même jeu de données (toutes les fonctions par défaut).

Bien que le temps¹ affiché ici soit très important pour un seul jeu d'image (343), celui-ci sera facilement diminué par les différentes fonctions que proposent *Colmap*, à moins de 15 minutes.

Contrôle qualité

Une seconde recherche s'est faite, afin de connaître les différentes solutions qui existaient pour déterminer/quantifier la qualité d'un nuage de points. Nous avons par la suite, essayé de mettre en place ses différents critères à partir des données obtenues par *Colmap* et de voir ceux qui étaient les plus pertinents.

Critère de qualité

L'objectif étant de s'assurer d'une reconstruction correcte, il faut pouvoir détecter des éléments critiques qui empêcheront cette reconstruction dense durant notre acquisition. L'élément principal que nous avons pu voir durant nos tests est la présence de trous ou de zones moins denses dans notre nuage de points de liaisons. Nous pouvons détecter ces anomalies, via une recherche du nombre de points voisins à partir d'une distance donnée. Une autre information récupérable à partir du nuage, est la mesure du bruit, qui peut apparaître dans le cas d'une mauvaise calibration de la caméra. Ce calcul s'appuie sur le critère de rugosité de *CloudCompare* et se définit comme étant la distance entre un point, et le plan de ses plus proches voisins. Enfin, nous pouvons récupérer l'erreur de reprojection sur les points 3D à partir des données de *Colmap*.

Cependant, il fallait pouvoir représenter simplement ces critères à l'utilisateur, pour qu'il puisse suivre l'avancement de l'acquisition. Nous nous sommes donc tournés vers l'utilisation d'un modèle approché qui sera calculé en pré-acquisition. Nous pourrions par choix, soit afficher un des critères calculés, et/ou utiliser un de ces critères pour valider ou non notre acquisition.

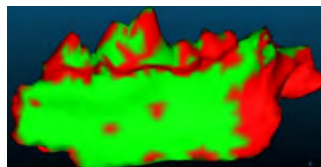


Fig. 3 : Validation sur un modèle de 5000 faces.

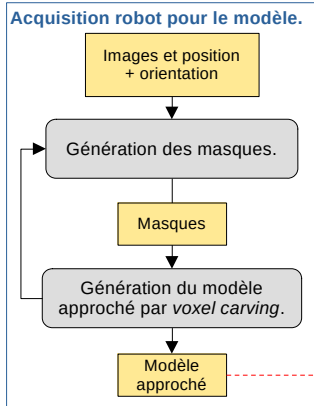
Critère de stabilité

Les spécimens que nous modéliserons auront parfois des parties mobiles (antennes, ailes) qui risqueront de bouger durant la prise de vue. Il fallait donc pouvoir au minimum, détecter ses mouvements partiels ou complets de l'objet. Pour les mouvements complets on s'est appuyé sur le rapport entre le nombre de points caractéristiques de chaque image et le nombre de points triangulés. Enfin, pour les mouvements partiels, une analyse des points *outlier* issus des appariements des images, permet de nous alerter lors de mouvements rigides d'une zone partielle de notre photo.

3. Processus de reconstruction

Voici le processus d'acquisition développé, comprenant la génération du modèle approché (pour la visualisation), la triangulation des points (génération du nuage de points partiels), le calcul des statistiques et leurs affichages sur le modèle approché.

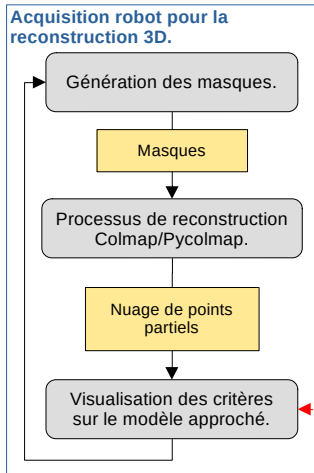
Dans un premier temps, nous retrouvons l'acquisition par le bras robot qui, à l'aide d'un schéma de prise de vue prédéfini, prend des photos de l'ensemble de notre spécimen.



Génération des masques

En temps réel ou après un nombre prédéfini d'images (par lot de 10, 15 ou plus), nous générons les masques de nos images. Cette génération se fait via le modèle d'apprentissage profond SAM (*Segment Anything Model*). Cette méthode permet de générer des masques assez rapidement, et suffisamment précis, pour pouvoir utiliser le *voxel carving*, qui nous servira à la génération du modèle approché.

Les paramètres à prendre en compte pour la génération, seront de préciser la dimension approximative de notre objet pour pouvoir générer des contours approchés sur chaque image. Cette indication améliorera grandement le modèle SAM pour une meilleure génération des contours fins de l'objet. Des traitements sur les masques finaux seront également à effectuer, pour s'assurer d'un masque noir et blanc propre, sans bruit, ni parasite.



Ils seront utilisés dans un premier temps pour un faible nombre d'image pour le *voxel carving*, puis sur toutes les images pour la reconstruction 3D.

Génération du modèle approché

À partir de ces masques, on peut utiliser le *voxel carving* pour générer un modèle approché de notre objet et ce assez rapidement (10 à 30 secondes). En effet, à partir des positions/orientations de chaque photo, des paramètres de la caméra et des masques noir et blanc, on peut « creuser » dans une grille de *voxel* qui génère petit à petit la forme de notre objet.

Il faut également pouvoir prédéfinir les paramètres de notre grille de *voxel* (taille, position et résolution). Le temps pour la génération du modèle augmente de façon exponentielle en fonction du nombre de *voxel* de notre grille. Une résolution optimale serait environ de 0,5 mm en fonction de la taille de l'objet. Le programme de *voxel carving* issue de *Open3D* génère simplement une grille de *voxel* qui est équivalent à un nuage de points avec une résolution spatiale fixée. On peut par la suite, appliquer un traitement de type *marching cube* pour en extraire un maillage puis un traitement *Laplacien* pour en affiner la forme.

Fig. 4 : Processus de reconstruction.

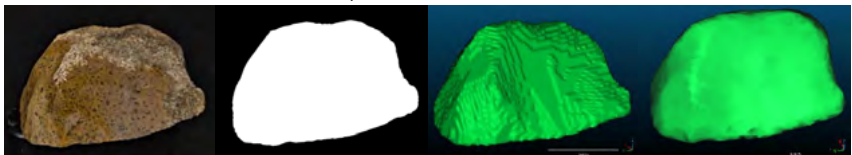


Fig. 5 : Fig. 6 : De l'image à la génération du modèle approché avec de gauche à droite : l'image, le masque associé, le modèle 3D du *voxel carving* puis le modèle 3D affiné avec le *Laplacien*.

Processus de reconstruction Colmap/Pycolmap

Après avoir intégré *Pycolmap* dans notre chaîne de traitement, un travail doit être fait pour rechercher les différents paramètres ou optimisations possibles pour accélérer les temps de calculs. On notera trois grandes étapes pour le programme : l'extraction des points caractéristiques (*sift*), l'appariement des images (*matching*) et la triangulation.

- Pour l'extraction, le principal point d'amélioration est l'utilisation des masques calculés par apprentissage profond. Cela améliore la reconnaissance des points d'intérêts sur notre objet et donc la reconstruction de notre modèle. Ils permettent aussi de limiter le nombre de points d'intérêts en supprimant ceux qui auraient été pris en dehors de l'objet (sur le support ou l'arrière-plan par exemple).
- Pour l'appariement, on peut utiliser les positions et orientations données par le bras robot pour utiliser la fonction d'appariement spatiale. Par défaut, il essaiera de récupérer les coordonnées GPS dans les données EXIF des photos, mais dans notre cas, il faudra renseigner manuellement les positions/orientations sous formes de quaternion/vecteur de translation dans la base de données de *Colmap*. Ainsi, il va simplement essayer d'associer des paires d'images qui sont les plus proches et minimiser le nombre d'essais.
- Pour la triangulation, elle permet déjà de remplacer le processus classique de reconstruction 3D sans connaissance des positions des caméras, on peut de plus accélérer ce traitement en supprimant la génération des couleurs des points. Le logiciel étant *open source*, on a pu facilement compiler une version sans cette génération des couleurs qui permettait un gain de temps d'au moins 50 %.

Visualisation du résultat

La visualisation de nos critères sur le modèle approché permet de facilement voir les zones en cours de reconstruction. Dans le visualiseur, on peut choisir d'afficher le modèle approché avec les critères, le modèle de validation (vert ou rouge) à partir d'un seuil et/ou le nuage de points.

4. Conclusion

La génération des masques, le *voxel carving*, le processus de reconstruction de *Colmap* et le *viewer*, permettent à partir des images et des positions/orientations des caméras, de générer en temps réel un modèle 3D de notre objet, en utilisant le logiciel de photogrammétrie *open source Colmap*. On peut noter les avantages suivants pour les différentes étapes de l'acquisition :

- La réalisation du modèle approché par *voxel carving* permet facilement à un utilisateur, de suivre l'évolution de la reconstruction. Cette étape implique la génération des masques par le modèle SAM qui est rapide à implémenter. On peut également faire varier la liste des critères pour la visualisation, en fonction de nos besoins. Pour la visualisation, nous projetons simplement les couleurs des points sur le modèle approché, même dans les zones avec de grandes disparités (zones concaves), la couleur sera quand même affichée au bon endroit. Cela permettra toujours de suivre l'évolution de la reconstruction et de voir les zones problématiques.
- Le choix d'utilisation de *Colmap* dès le début, a permis de réaliser une chaîne de traitement rapide et efficace. De nombreuses fonctions et paramètres sont disponibles, il faut donc pouvoir les étudier pour savoir lesquelles seraient les plus adaptées à notre projet.

Enfin, nous avons plusieurs pistes de réflexion possibles par suites des travaux menés, par exemple sur la détection des mouvements des objets. Actuellement, on peut détecter des mouvements complets des objets, (mouvement du support) ou alors des mouvements rigides d'une partie de l'objet. Notre travail permet d'ouvrir la réflexion sur les différentes stratégies à appliquer en cas de détection d'un mouvement partiel ou complet ; arrêt de la modélisation ? reprise de l'objet dans un autre repère ? changement de méthode d'acquisition ?

Le *voxel carving* souffrant d'un manque de robustesse (un seul masque faux pouvant détériorer grandement le modèle), d'autres méthodes pourraient être explorées, comme celle du *focus stacking*, permettant de détecter les zones nettes des images et générer un modèle 3D.

Mise en place du Système d'Information Géographique (SIG) d'évaluation et du modèle de récolte, de consultation et de modification des données du Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) du pays de l'Ardèche Méridionale.

PFE présenté par : **Gaëtan HAGUE**
Société d'accueil : *Syndicat Mixte du Pays de l'Ardèche Méridionale*
Directeur de PFE : *Monsieur Lionnel ROBERT*
Correcteur : *Monsieur Mathieu KOEHL*



1. Introduction et cadrage sur le SCoT de l'Ardèche Méridionale

Créé par la loi « Solidarité et Renouvellement Urbain » (SRU) du 13 décembre 2000, le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) est un outil de planification qui définit, à l'échelle d'un bassin de vie élargi et sur le long terme, les grandes orientations d'aménagement et de développement d'un territoire tout en définissant un équilibre entre protection et développement. Il s'agit aussi d'un document à valeur réglementaire qui, une fois approuvé, s'impose aux différents documents d'urbanisme. Il détermine à l'échelle de plusieurs Communes ou groupements de Communes un projet de territoire visant à aborder les thèmes touchant notamment à l'habitat, au développement économique, touristique, commercial, aux déplacements, à la préservation de l'agriculture, des paysages... Depuis l'approbation du Grenelle de l'environnement (12 juillet 2010), les SCoT deviennent obligatoires pour l'ensemble du territoire national. L'élaboration du Scot d'une durée variant entre 3 et 5 ans, repose sur une co-construction entre élus. Ceux-ci l'approuvent ensuite par délibération, puis en assurent le suivi et décident de sa mise en révision. Formellement, le SCoT se compose de 3 documents :



Fig. 1 : Carte de découpage en bassin infra du SCoT AM

Formellement, le SCoT se compose de 3 documents :

- Un rapport de présentation qui explique les choix retenus dans le projet d'aménagement et de développement durable (PADD) et le document d'orientations et d'objectifs (DOO). Il inclut également une évaluation environnementale.
- Un PADD qui décline les grands objectifs stratégiques retenus par les élus.
- Un DOO, qui décrit les orientations que doivent suivre les différentes communes du territoire du SCoT et un DAAC (Document d'Aménagement Artisanal et Commercial) dans lequel sont précisées les conditions d'implantation commerciale.

Le projet porte sur le SCoT de l'Ardèche Méridionale (SCoT AM) qui concerne le département de l'Ardèche (07) au sud de la région Auvergne Rhône Alpes. La figure 1 représente le découpage en trois

bassins infra (le bassin Albenassien, le bassin Montagne et le bassin Sud Ardèche) du territoire du SCoT AM.

La période d'application du SCoT AM est de 27 ans, avec un « T0 » arrêté en 2016. Le SCoT fait l'objet d'un suivi au fil de l'eau mais il est également évalué tous les 6 ans minimum pouvant entraîner une révision en fonction de certains constats, de la volonté des élus ou d'évolutions législatives. Du fait de la période COVID, la révision du SCoT AM n'a pas pu avoir lieu en 2022. Une révision partielle est programmée à la suite du projet.

Ce projet s'inscrit donc dans une démarche d'amélioration du SCoT AM existant en vue de sa révision partielle.

2. Définition et objectifs du projet

Les collectivités territoriales doivent assurer la mission de service public, prendre des décisions en ayant une vision globale de la réalité du territoire, suivre et évaluer la politique d'aménagement du territoire en croisant les données. Dans ce contexte, le Système d'Information Géographique (SIG) apparaît comme une solution pertinente capable de répondre à ces enjeux.

Le but de ce projet est la création d'un SIG permettant la consultation, la modification et la mise à jour du Schéma de Cohérence Territoriale de l'Ardèche Méridionale (SCoT AM). Le but est que l'ensemble des partenaires puissent avoir le même niveau d'informations et ce à tout instant. Ceci est d'autant plus nécessaire que la connaissance du territoire et les procédures administratives demandent de plus en plus de données numériques à des fins d'analyse et de diagnostic.

Ainsi, les objectifs du projet sont :

- De développer un outil partagé et simple d'utilisation pour faciliter le travail quotidien du SYndicat Mixte du Pays de l'Ardèche Méridionale (SYMPAM) et des différentes communes du territoire.
- De mutualiser les informations entre le SCoT AM et ses communes.
- De disposer d'un outil aux informations actualisées sur différentes thématiques pour aider les communes dans leur prise de décision en lien avec l'urbanisme.
- De permettre et de faciliter l'actualisation des données du SCoT en vue de sa révision obligatoire tous les 6 ans.
- De créer des notices d'utilisation et de modification de l'outil développé pour permettre aux divers utilisateurs de se l'approprier

Pour développer ce projet, il est nécessaire d'adopter une méthodologie efficace, afin de reprendre tous les objectifs du SCoT et de vérifier si la trajectoire de développement du territoire correspond à celle attendue dans le SCoT. Pour cela, il faut s'appuyer sur les indicateurs présents dans le DOO. Ces indicateurs sont des valeurs chiffrées qui permettent de rendre compte de la situation du territoire, au regard de différentes thématiques telles que la démographie, le logement, les énergies renouvelables...

Une volonté forte a été exprimée de permettre une traçabilité des diverses informations pour éviter au SYMPAM de se confronter à nouveau aux difficultés déjà rencontrées (pertes de documents papiers et informatiques, non connaissance de l'origine des données, etc).

3. Le projet

La première étape du projet a été de catégoriser les indicateurs et de récupérer les données facilement accessibles sur le site de l'INSEE (démographie, logements, activités des citoyens du territoire) pour pouvoir commencer la création du SIG.

Pour le développement de la carte le choix s'est porté sur le logiciel de SIG QGIS. Il s'agit d'une application de SIG libre et open-source qui évolue sans cesse grâce à une large communauté. Cette application permet de visualiser, de modifier et d'analyser des données géospatiales et bénéficie d'une large gamme de *plugins*, notamment une console en python ce qui permet d'étendre encore les possibilités.



fig. 2 : Carte SIG du SCoT AM découpé en communautés de communes

La première carte a été développée en partant d'une base SIG contenant les 150 communes du SCoT AM. Sachant que les valeurs des indicateurs à inclure sur la carte sont souvent données selon les bassins infra du SCoT AM (figure 1) mais qu'elles peuvent aussi être données selon le découpage en communautés de communes (figure 2), il a été nécessaire de créer deux couches SIG qui serviront de base pour l'intégration des différents indicateurs dans différentes autres couches supérieures.

Le SCoT AM possède de nombreuses thématiques composées chacune de nombreux indicateurs. Par exemple, dans la thématique "Logements" sont répertoriés les indicateurs tels que le nombre de logements, le nombre de résidences principales, le nombre de propriétaires...

La création de différentes couches d'objets ponctuels séparées en thématique permet d'enregistrer les valeurs des indicateurs. Chaque couche contient sa propre table attributaire. La figure 3 correspond à un extrait de la table attributaire de la thématique "Logements". Cette table est composée de différentes lignes correspondant chacune à une entité ponctuelle possédant différents champs correspondant chacun à un indicateur tel que le nombre de logements, le nombre de résidences principales... Chaque entité ponctuelle désigne une commune dans l'exemple présenté. La majorité des couches sont construites de cette manière.

	nbr_logmnt	res_princ	nbr_hab	res_scnd	res_vid	nom_com
S1	663	520	1144	46	99	Lalevade-d'Ardèche
S2	1568	1165	212	291	113	Lanarce
S3	296	205	490	63	29	Lanas

fig. 3 : Exemple de table attributaire pour la thématique « Logements »



Pour l'affichage de ces divers indicateurs sur la carte, la méthode retenue est l'utilisation des étiquettes d'objet ponctuel permettant une visualisation simple et rapide des données sur la carte. En utilisant l'étiquette d'un objet ponctuel avec des règles de style et d'affichage précise, il est possible d'obtenir un affichage à l'aspect Pop-Up (figure 4). De plus, les règles d'affichage développées permettent de faire apparaître les informations en fonction de l'échelle d'affichage sur la carte. Ainsi, les informations générales par bassin apparaissent avec une échelle comprise entre 1:50000 et 1:300000 alors que les informations plus détaillées par commune apparaissent pour une échelle inférieure à 1:50000. L'échelle étant modifiée par la fonction zoom sur la carte.



fig. 4 : Exemple d'affichage des informations d'une commune pour la thématique « Logements »

Il est demandé aux territoires, depuis la loi Zéro Artificialisation Nette (ZAN) de réduire de 50 % le rythme d'artificialisation et de la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers d'ici 2030 par rapport à la consommation mesurée entre 2011 et 2020. L'objectif ZAN est fixé pour 2050. Ainsi, le SYMPAM a besoin de visualiser, autrement qu'avec des chiffres, les différentes consommations du territoire en termes d'espace. Pour répondre à ce besoin, le SIG développé permet l'affichage de l'artificialisation sur différentes périodes avec les informations souhaitées.

Deux affichages sont disponibles pour cette consommation foncière. La première se base sur l'utilisation des bâtiments, directement sortis des fichiers fonciers en fonction des années. Il est ainsi possible de récupérer les surfaces consommées par commune. L'enveloppe de consommation ZAN disponible ne donne que la consommation foncière du territoire dans sa totalité.

La seconde utilise une méthode de tampon de 25 mètres à partir des bâtiments pour observer la consommation entre deux années différentes. Cette seconde méthode ne permet pas de calculer les surfaces consommées, il s'agit simplement d'une méthode graphique.

A terme, il est envisagé de mettre en place un système de consultation du SIG par Internet sur un site, aussi, une maquette de web map sur un serveur local a été créée en utilisant le logiciel open-source Lizmap. Ce logiciel permet de définir des groupes d'utilisateurs, liés à des comptes utilisateurs. Chaque groupe possède des accès différents aux couches du SIG (modification, consultation, accès non autorisé). Ainsi, un utilisateur en consultation seul ne peut pas modifier les couches alors qu'un technicien du SYMPAM possédant l'autorisation de modification peut en se connectant à son compte accéder aux couches. La maquette permet la visualisation de tout le SIG depuis un navigateur.

4. Conclusion

Le SIG développé centralise à ce jour de nombreuses données qui touchent aux thématiques abordées par le SCoT AM telles que la démographie, les logements, la population active... Toutefois, certaines données ne sont pas encore accessibles ou disponibles. Les différentes notices, rédigées au cours du projet, permettront au technicien SIG d'actualiser l'ensemble des données mais aussi d'intégrer de nouveaux indicateurs, pour maintenir à jour la carte et la faire évoluer. Ce SIG devrait constituer un outil d'aide à la décision pour les élus en leur offrant un accès à l'information simple, rapide et actualisé. Les indicateurs intégrés dans le SIG permettront de suivre les orientations et objectifs du SCoT. L'utilisation d'un serveur pour héberger les données SIG permettra de rendre toutes les données cartographiques SCoT accessibles depuis le site internet du SCoT AM.

Mise en place d'une cartographie interactive en ligne des dossiers traités par la Direction Urbanisme et Territoires (DUT)

PFE présenté par : **Tom BENTI**
Société d'accueil : **Eurométropole de STRASBOURG**
Directeur de PFE : **Olivier BANASZAK**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**
Encadrant : **Jean-Pascal KLIPFEL**



1. L'Eurométropole de Strasbourg

L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) est une collectivité territoriale française créée en 2015. Elle regroupe la ville de Strasbourg et 32 communes environnantes, pour un total de plus de 500 000 habitants. Depuis sa création, l'Eurométropole travaille à développer des politiques communes dans divers domaines tels que la mobilité, l'environnement, l'aménagement du territoire et la culture. Elle renforce également sa coopération transfrontalière avec les villes voisines en Allemagne et en Suisse.

La Direction Urbanisme et Territoire (DUT) est l'une des directions de l'EMS. Elle est une direction stratégique et opérationnelle. Ses missions sont la définition et la mise en œuvre des politiques et des projets de développement urbain en tout temps et à toute échelle. La DUT est composée de 7 services, de 3 missions ou directions de projets et de 6 directions de territoires. Seuls les services ont été mis en avant dans le cadre de mon projet. C'est-à-dire le service Aménagement du Territoire et Projets Urbains (ATPU), Conduite des projets d'Aménagement (CPA), Habitat, Police du Bâtiment (PB), Politique Foncière et Immobilière (PFI) et Politique de la Ville (DPV). Ainsi que le service géomatique et connaissance du territoire (GCT) au sein duquel j'ai été accueilli.



Fig. 1 : Communes de l'EMS

2. Objectifs du Projet de Fin d'Études

Le choix du sujet de mon stage provient d'un souhait ancien et d'un changement récent au sein de l'EMS. Une nouvelle application SIG intranet open source, appelée QGIS web, a récemment enrichi la palette des applications de SIG de l'EMS. Cette évolution technique ouvre la possibilité de répondre à une demande de longue date.

Cette demande tient dans la création et la diffusion, deux termes bien connus dans ce milieu, d'une cartographie interactive des dossiers et affaires suivis par l'ensemble des services de ce département, tout en gardant une fiabilité des données par des mises à jour simples et régulières.

Mon intervention dans ce projet se résume donc à concevoir un prototype de carte à deux caractéristiques principales. Les données qui vont y être intégrées doivent être soigneusement choisies pour que son utilisation soit utile. Les différents services de la DUT gèrent des données provenant de logiciels SIG, métiers ou bureautiques. Par conséquent, les données existent sous différentes catégories.



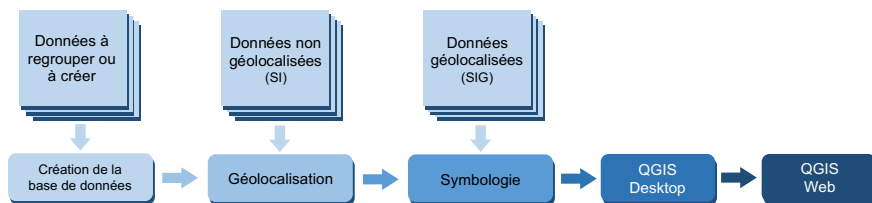


Fig. 2 : Schéma des étapes de traitement des différentes catégories de données

3. L'étude des besoins

En parallèle des recherches techniques servant à me familiariser avec les divers outils présents à l'EMS, j'ai participé à de nombreuses réunions afin d'étudier les besoins des différents services pour adapter le projet à chacun d'entre eux.

La première réunion s'est tenue avec le product owner, M. Éric CHENDEROWSKY, directeur de la DUT, afin de définir au mieux son besoin ainsi que ses attentes. Mon tuteur et moi avons ensuite organisé six réunions avec les directeurs de services pour nous présenter, exposer le projet, identifier leurs besoins et leurs jeux de données. Dans un souci d'efficacité, deux questionnaires types avaient été rédigés au préalable par mes soins. Un premier servant de fil directeur pour les entretiens et un second afin de récupérer des données précises post-entretien.

Les questionnaires ont révélé les missions de chaque service, les liens entre eux et les flux de données spécifiques à chacun. Nous avons ensuite pu lister de nombreuses couches de données intéressantes que nous avons pu regrouper au sein d'un document précisant certaines de leurs caractéristiques.

4. L'étude de faisabilité

Une fois les besoins déterminés, nous avons débuté l'étude de faisabilité. La première partie de celle-ci était de prioriser les différentes couches listées. J'ai donc défini trois niveaux de priorité : les couches à intégration prioritaire, les couches à intégration incertaine et les couches à intégration future. Par la suite, les couches ont été réparties une première fois, selon leur intérêt pour les services, les tâches à réaliser pour leur intégration et la difficulté de ces tâches.

Sujet	Temps de travail total	Complexité de la couche	Nombre de services ayant abordé	Priorité de la couche	Commentaires
Études	20	9	3+1	9	La couche "études" est apparue plusieurs fois lors des entretiens - de nombreuses dépenses inutiles effectuées par méconnaissance des études déjà réalisées pourraient être réduites.
Dossiers Réglementaires	57	10	4	9	Cette couche s'implante parfaitement dans le projet et ses objectifs. Il reste toutefois une lourde charge de travail avec les différentes retouches et ajouts qu'il reste à réaliser.
Projets	33	9	4	9	La couche a été demandée par plusieurs services. À ceci vient se rajouter que la couche apparaît comme nécessaire en vue des objectifs du projet.
Territorialisation	31	8	4	8	La couche servirait de couche de contact dans le cas où l'utilisateur aurait besoin de plus d'informations que celles déjà présentes.

Fig. 3 : Extrait du tableau de compte-rendu des données – Couches à intégration prioritaire

Afin de valider la priorisation, elle fut présentée lors d'une réunion de services regroupant tous les chefs ainsi que le directeur de la DUT. Suite à leurs réflexions, nous avons retenu quatre couches à prioriser et dont l'intégration est certaine : les études menées sur le territoire de l'EMS, les instructions des services PB et PFI, les projets urbains en cours ainsi que la répartition des agents territorialisés.



5. Développement du prototype

Une fois les couches prioritaires déterminées, il était temps de les intégrer à un projet QGIS pour ensuite créer un projet QGIS Web et à terme le publier sur le site de l'EMS. Dans un premier temps, le projet est créé dans les espaces de développement (serveur DEV) et ensuite, publié pour l'utilisation (serveur PROD) si la structure fonctionne correctement.

Le travail a débuté par la couche considérée comme la plus importante, celle traitant des diverses études réalisées par la DUT. Le problème majeur était que les études n'étaient pas stockées au sein de la DUT. Après avoir cherché des rapports d'études aux archives de l'EMS et de la ville sans grande réussite, une solution a été proposée lors d'une réunion de service. En effet, aucun rapport d'études n'a été trouvé, il a donc été décidé de créer un espace de stockage dédié aux études réalisées récemment. Dans celui-ci seront stockées les études réalisées lors de l'année en cours (2023) et si possible l'année précédente (2022). Trouver les anciennes études de 2022 s'est avéré trop complexe pour une réussite incertaine. Une fois l'espace de stockage créé, les différents services y aurait accès afin de stocker leurs futures études selon le modèle des études déjà stockées. Les documents seraient alors renommés afin de faciliter la gestion de leurs attributs et leur géolocalisation.



Fig. 4 : Extrait de la couche « Urbanisme Réglementaire »

La seconde couche est celle des dossiers de l'urbanisme réglementaire regroupant les documents de droit des sols ainsi que ceux des enseignes, des immeubles menaçant ruine et les dossiers provenant d'une déclaration d'intention d'aliéner. Le travail de cette couche avait été amorcé lors d'un projet en 2021 par certains de mes collègues. Lors de leur projet, certaines catégories de documents avaient été mises de côté alors que leur intérêt dans mon projet est prouvé. La structure SQL de la vue a donc été retravaillée pour y apporter les bases de données de ces documents manquants. Comme pour toutes les couches, la symbologie a été travaillée pour éviter la surcharge du projet car les entités étaient nombreuses.

La troisième couche est une couche mettant en valeur les divers projets urbains de l'EMS. Suite à des discussions avec les agents qui l'utilisent, le besoin d'une refonte des attributs semblait nécessaire. Le service CPA de conduite des projets voulait quant à lui, l'utiliser pour promouvoir ses projets. Pour ce faire il était nécessaire de redéfinir les attributs afin de les faire coïncider avec les besoins de tous les services. Par la suite, le système de mise à jour a été retravaillé afin de définir les tâches de chacun.



Fig. 5 : Extrait de la couche « Projets Urbains »



Fig. 6 : Extrait de la couche « Territorialisation »

La couche apportant les informations sur les agents référents par secteur a été réalisée à l'aide des différentes cartes déjà existantes. Les services m'ont fourni les cartes de territorialisation de leurs agents si leur fonctionnement marchait ainsi. Les cartes arrivaient soit sous forme de projet SIG et donc intégrables sans trop de soucis, soit sous forme de document PDF. Pour le deuxième cas, après avoir mis la main sur la découpe utilisée, il fallait ajouter l'attribut du métier défini et ensuite le remplir par requêtes SQL ou à la main.



Un fois ces couches travaillées, j'ai pu développer les étapes de la publication du projet QGIS sur le serveur QGIS Web et le passage de la structure en PROD. À ceci se sont ajoutés les quelques travaux sur les info-bulles afin de répondre au mieux aux besoins des services. Pour cela, j'ai utilisé les fonctionnalités de QGIS ainsi que des scripts HTML.

6. Mise en place et test

Dans le cadre de l'évaluation du projet de la carte interactive, le prototype a été publié dans l'espace de test en PROD. Cette carte permet aux utilisateurs de naviguer et d'explorer les données géographiques de manière interactive. On parle ici du choix des sujets ou alors de recherche par adresse. Une info-bulle apparaîtra lors de la sélection d'une entité et elle sera remplie par les informations des sujets (les couches).

Pendant cette phase de test, les retours des utilisateurs jouent un rôle crucial. Ils ont la possibilité de signaler les erreurs ou les problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la carte. Ces retours sont ensuite consignés dans un document annexe dédié. Cette approche permet de recenser de manière systématique les corrections à apporter ainsi que les améliorations souhaitées par les utilisateurs. En recueillant et en documentant ces retours, l'équipe de développement peut identifier les lacunes et les zones d'amélioration, ce qui contribue à optimiser l'expérience utilisateur et à garantir la qualité de la carte interactive avant sa version finale.

Les retours « utilisateurs » pourront aussi servir à valider la priorisation des couches choisies et à mettre en évidence les couches dont le manque se fait ressentir afin de pouvoir les prioriser dans les prochaines phases de développement qui suivront mon projet.

7. Conclusion et ouvertures

En conclusion, ce mémoire a abordé en détail le projet de développement d'une carte interactive, mettant en évidence les différentes étapes de sa conception, les défis rencontrés et les solutions proposées.

Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de cette approche en matière de visualisation et d'exploration de données géographiques. Cependant, il convient de souligner que ce projet ne se limite pas à cette étape. Au contraire, il ouvre la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration et d'extension.

Pour les travaux futurs, il est recommandé de poursuivre les efforts pour affiner la performance et l'ergonomie de la carte interactive. De plus, afin de faciliter la continuité du projet, il est essentiel de documenter les directives techniques et les bonnes pratiques, de manière à ce que les prochaines personnes travaillant sur le projet puissent s'orienter aisément et bénéficier des connaissances déjà acquises. En somme, cette recherche constitue une base solide pour le développement et l'amélioration continus de cette carte interactive, offrant ainsi des opportunités d'innovation et de valorisation des données géographiques.

Deux types de documents ont donc été rédigés. Le premier prend en compte toutes les documentations sur les systèmes de mise à jour reprenant toutes les étapes afin d'aider les agents entrant dans les services. En parallèle, des guidelines ont été écrites afin de mettre en valeur les étapes qui n'ont pas été réalisées malgré leur intérêt non discutable.

Analyse des méthodes topographiques et adaptation à la maintenance ferroviaire

PFE présenté par : **Quentin Lopez Camoche**
Société d'accueil : **Gexia Foncier**
Directeur de PFE : **Vincent Martinache**
Correcteur : **Gilbert Ferhat**



1. Contexte et objectifs

La France possède le deuxième plus grand réseau ferré d'Europe avec une longueur avoisinant les 30 000 km. Commencé au XIXème siècle, il atteint son apogée vers les années 1920. Avec l'avènement de l'automobile, le train est petit à petit délaissé et de nombreuses lignes secondaires ferment. La longueur du réseau décline et finit par atteindre la longueur que nous lui connaissons aujourd'hui.

Ce patrimoine, parfois vieux de plus d'un siècle doit être entretenu régulièrement afin de garantir aux usagers un moyen de transport confortable et fiable.

C'est ainsi que s'est développée une branche spécifique de la topographie avec des méthodes et des outils qui sont propres au domaine ferroviaire.

Le cabinet Gexia rail opère aujourd'hui sur de nombreux chantiers, chacun a ses spécificités : des voies circulées à des vitesses importantes (plus de 200km/h) et des voies de dessertes commerciales, gares de triage, technicentres (vitesse de seulement quelques km/h).

C'est dans ce dernier contexte que le cabinet voudrait se développer : les voies à circulation « lente ». Actuellement, les voies sont levées avec une canne à rail ou bien à l'aide du chariot Gedo de chez TRIMBLE couplé à une station totale. De plus, la précision utilisée est la même que pour les voies circulées à 200km/h. Le cabinet souhaiterait savoir s'il est alors possible de « dégrader la précision ». Enfin, c'est un procédé qui nécessite la mise en place d'une polygonale, des déplacements nombreux de la station dus aux portées limitées et qui est aussi contraint aux masques que peuvent occasionner les wagons stationnés.

L'enjeu de ce PFE est donc de trouver une méthode avec le bon équilibre économie/précision qui s'affranchirait de ces contraintes et qui permettrait de faire gagner du temps sur le terrain. Pour cela, différentes méthodes d'acquisition seront testées et comparées les unes par rapport aux autres. Les données sont issues de deux sites différents : une voie désaffectée située sur la commune de Andelot-Blancheville (52) et une voie de desserte pour une coopérative céréalière sur la commune de Cintegabelle (31).

2. Andelot-Blancheville

2.1. Acquisition

Sur cette voie désaffectée depuis les années 60, reconvertie aujourd'hui en parcours de cyclo-rail, trois méthodes d'acquisition furent testées. L'autorisation des tests ainsi que leurs réalisations ont été possibles grâce à un représentant de chez Geotopo. Le travail d'étude repose sur environ 150 m de voie.



L'ensemble des tests a été réalisé à l'aide du chariot Gedo de TRIMBLE, il permet de mesurer les écartements de la voie, les dévers et le gauche de façon relative.
Les différentes méthodes d'acquisition permettent de géolocaliser la voie de manière absolue.

Pour comparer ces trois techniques, la méthode employée par le cabinet servira de référence : une station totale et le chariot Gedo en mode prisme.

Premier test : Utiliser le chariot avec une antenne GNSS TRIMBLE R10 en mode RTK. Le pivot est déterminé en coordonnées en mode levé VRS NOW pour une période de 10 minutes. Le modem VRS NOW est raccroché pour passer en mode radio avec l'antenne. Cette dernière mesurera deux autres points situés à environ 80m du pivot. Pour finir, l'antenne est fixée au chariot qui mesurera la voie dans un sens aller et retour.

Deuxième test : la station totale (S5 Trimble) remplace le pivot, mise en place par centrage forcé, elle vise les deux points préalablement mesurés. Ces deux points, eux aussi positionnés en centrage forcé, sont surmontés d'un prisme permettant la mesure. Le même chariot utilisé précédemment refait un aller et un retour sur les voies. La différence étant l'antenne GNSS qui cède sa place à un mini prisme.

Troisième test : la centrale inertielle de chez Trimble couplée au chariot Gedo. Les deux points de part et d'autre de la voie ont servi de référence pour le départ et l'arrivée. La centrale se géoréférence grâce à ces derniers.

2.2. Traitement des données

L'ensemble des points a été calculé avec le logiciel Gedo Office. Il permet de voir rapidement les différents écarts entre les différents levés.

Les points sont ensuite lus sur Autocad. Le problème soulevé est l'exactitude du point de départ et de fin. Sans points uniques il n'est pas possible de faire des comparaisons. C'est l'objectif de l'utilisation de Autocad afin de sortir des listings de points avec des Points Kilométriques identiques (PK).

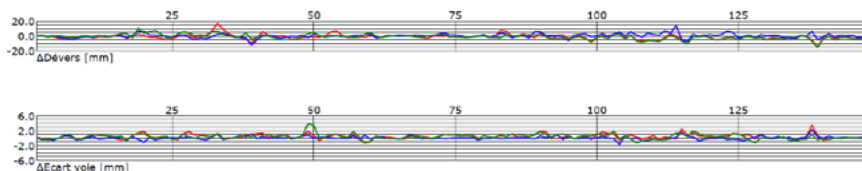


Figure 1 : comparaison du dévers et de l'écartement des voies.

- Courbe bleue : acquisition 1 GNSS
- Courbe verte : acquisition 2 GNSS
- Courbe rouge : acquisition 1 station totale

Sur le graphique (figure 1), les données obtenues au GNSS sont comparées aux données obtenues avec la station totale. Ce graphique est directement issu du logiciel Gedo Office. Il permet d'avoir un premier aperçu du comportement de chaque méthode. Les courbes suivent les mêmes tendances, ce sont des données relatives prises au chariot. Les écarts sont faibles.

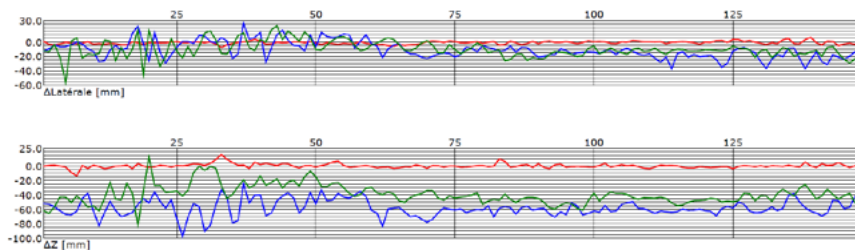


Figure 2 : comparaison des coordonnées planimétriques et altimétriques

Sur la figure n°2, les comparaisons sont faites dans le même ordre que précédemment. Il est à constater que les données en absolu sont plus dispersées et qu'elles ne suivent pas toujours la même tendance.

Le logiciel ne permet cependant pas de connaître exactement les points interpolés pour comparer les différentes coordonnées, d'où l'intérêt d'utiliser d'autres logiciels.

Pour des résultats plus significatifs, chaque fil de rail est comparé dans le même sens de levé. Ceci permet de mettre en évidence les écartements entre les deux rails, le dévers, les altitudes et les coordonnées des points.

Grâce au PK il est possible de comparer un même point du rail. Cela la fiabilité d'une méthode.

3. Cintegabelle

3.1. Acquisition

La voie de desserte de la coopérative céréalière (Arterris) est une voie servant au train venant chercher le grain des silos pour l'acheminer vers d'autres lieux où il sera transformé. La portion de voie choisie est relativement droite et mesure approximativement 150m. Comme précédemment, trois tests y ont été réalisés.

Premier test, (test de référence), il s'agit du levé au chariot Gedo couplé à la station totale. Les points de référence ont été déterminés par GNSS en mode statique (45 min d'acquisition) puis calculés en post-traitement. La station servant à l'acquisition des points est positionnée au milieu de l'emprise du levé.

Deuxième test : photogrammétrie aérienne par drone Phantom de chez DJI. Ce dernier a volé à 25 mètres du sol, pour un total de 600 photos et un pixel au sol d'environ 6.9 mm. Des cibles géoréférencées sont placées au sol grâce à la station totale.

Troisième test : levé au drone LiDAR, la technique est similaire à celle du drone photo.

3.2. Traitement des données

Les coordonnées GNSS en post traitement ont été déterminées via le logiciel Trimble Business Center. L'altitude des points de référence à quant à elle était rattachée en NGF grâce à un repère de nivellement situé à proximité de la zone.

Pour la partie photogrammétrie, le logiciel Metashape a été utilisé. C'est à partir de ce dernier que le nuage de points a été créé. Il est nécessaire d'extraire les fils de rails pour une comparaison similaire aux données obtenues avec le chariot. C'est ce que le logiciel Gedo Scan office 2 permet. Le nuage obtenu avec le LiDAR subira le même processus de traitement.



Figure 3 : nuage de points obtenu par photogrammétrie.

3.3. Etude comparative

Comme précédemment fait, chaque fil de rail sera comparé avec le levé réalisé au chariot. La grande différence sur cette étude est l'absence de points levé sur le rail directement. Il sera intéressant de comparer des données acquises au chariot et des données issues de l'extraction d'un nuage de points.

4. Conclusion

La confrontation de ces différentes méthodes d'acquisition a permis de souligner plusieurs points importants. Chacune d'elles possède ses avantages et ses inconvénients : vitesse d'exécution différentes, complexité de la mise en œuvre et vitesse de traitement au bureau. Le chariot avec GNSS, méthode rapide permet d'avancer rapidement mais est limité de part sa précision. Contrairement au chariot avec le tachéomètre.

Le drone nécessite un grand temps de traitement. Il peut s'avérer très utile sur de très grandes portions ou des lieux difficiles d'accès.

L'étude des coûts finaux qui reprend les différents paramètres de chaque process, permettra de souligner les méthodes les plus efficaces selon les types de chantiers.

Enfin, cette analyse permet de mettre en évidence que le géomètre a à son service une variété d'instrument qu'il doit utiliser selon ses besoins. Pouvoir adapter les outils au type de chantier permet de respecter le cahier des charges et de rester économiquement compétitif. Il sera aussi intéressant de comparer la rentabilité des méthodes selon le linéaire à parcourir (1km, 5km, 10km).

Études et mise en place de procédures d'acquisition et de traitement de nuages de points à mettre en œuvre pour répondre aux précisions exigées par le cahier des charges SNCF.

PFE présenté par : **Vincent Leroux**
Société d'accueil : **Gexia Rail**
Directeur de PFE : **M. Simon Vanderhaeghe**
Correcteur : **Mme. Hélène Macher**
Encadrant : **M. Simon Vanderhaeghe**



1. Contexte et objectifs

Gexia Rail est une entreprise toulousaine effectuant des travaux topographiques tels que des études de quais, relevés de rails, quais et ouvrages d'art dont le maître d'ouvrage est la SNCF.

Pour cela, l'entreprise réalise actuellement des levés topographiques ainsi que des levés par scanner statique (Trimble X7). Gexia Rail sous-traite également des relevés réalisés à l'aide du système Trimble Gedo Scan (scanner dynamique) et souhaite dans le futur pouvoir louer un appareil pour réaliser soi-même ces relevés. L'achat d'un nouvel appareil n'est pas envisagé.

Les travaux topographiques réalisés pour le compte de la SNCF doivent suivre un cahier des charges complet qui encadre chaque type de levé en termes de méthodologies employées et de précisions attendues. Dans ce cahier des charges, la tolérance du relevé de la plateforme ferroviaire est de 1cm en précision relative et de 2cm en précision absolue en planimétrie et en altimétrie selon l'IG94053 de la SNCF.

Actuellement, Gexia rail parvient à respecter ce cahier des charges lors de relevés par scanner statique pour des linéaires inférieurs à 200m. Cependant, l'entreprise rencontre des difficultés lors de l'acquisition de linéaires plus importants. La topologie très linéaire des chantiers ferroviaires à grande échelle impacte le calcul de consolidation en causant une dérive du nuage, mais impacte aussi le géoréférencement du nuage de points, notamment à cause de l'altération linéaire.

Ce Projet de Fin d'Étude vise dans un premier temps à analyser et à améliorer la méthodologie d'acquisition et de traitement actuellement utilisée par Gexia Rail par scanner statique en vue d'atteindre les précisions fixées par le cahier des charges de la SNCF sur des grands linéaires.

Dans un second temps, une solution de scanner dynamique sera testée et comparée aux acquisitions effectuées par scanner statique. L'objectif est de pouvoir choisir la méthodologie d'acquisition et de traitement de données optimale en fonction de l'environnement du chantier afin d'augmenter en productivité, tout en respectant le cahier des charges fixé.



2. Analyse de la méthodologie par scanner statique actuellement employée par Gexia Rail

Actuellement, Gexia Rail emploie la méthodologie décrite par le schéma suivant :

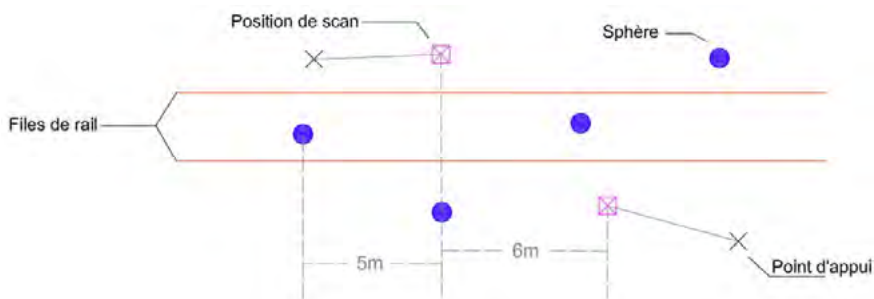


Fig. 1 : Schéma de la méthodologie actuellement employée

Le Trimble X7 est positionné en quinconce le long de la (des) voie(s) tous les 5 à 7 mètres linéaires. Le temps d'acquisition est de 2 min ce qui donne un espacement entre deux points de 11mm à 10m (selon la fiche technique de l'appareil). La consolidation du nuage de points est réalisée à l'aide de sphères placées en quinconce tous les 5m. Dans des environnements riches en détails (quais de gare par exemple), la consolidation peut être réalisée par méthode ICP (consolidation « nuage – nuage »). Pour géoréférencer le nuage, des points d'appui sont placés et visés tous les 30 à 50m. Le géoréférencement est donc indirect.

Cette méthode possède deux principales faiblesses :

- La première concerne le calcul de détection de sphères, et donc de consolidation. Pour consolider deux stations, ces dernières doivent scanner un minimum de 3 sphères communes. En plaçant des sphères tous les 5m, la distance du scanner à la troisième sphère commune (la plus proche) entre deux stations peut atteindre 10m dans le cas le plus défavorable. En effectuant des acquisitions de 2min, nous avons alors une densité de points suffisante (1 point tous les 11mm à 10m selon la fiche technique de l'appareil) pour le calcul de détection d'une sphère. Cependant, le nombre de sphères communes sera limité pour le calcul de consolidation, car au-delà de 10m, la faible densité de points crée des imprécisions dans le calcul de détection de sphères les rendant inexploitable. Cela limitera ainsi la surabondance des observations dans le calcul de consolidation.
- La deuxième faiblesse de cette méthode est liée à l'altération des distances. Les stations de scan sont d'abord consolidées en un seul nuage de points. Celui-ci est ensuite géoréférencé dans un système de coordonnées projeté par l'application d'une transformation d'Helmert 3D. Le scanner mesure des distances inclinées tandis que les distances exprimées dans le système de coordonnées sont des distances « projetées ». Dans le cas de cette méthodologie, l'altération linéaire et la réduction des distances à l'ellipsoïde ne sont pas appliquées aux mesures de distances inclinées du scanner. Ces erreurs vont être observées lors du calcul de géoréférencement du nuage de points car l'accumulation des différences entre les distances inclinées et projetées, si elles sont minimales et négligeables à petite échelle (au sein d'un seul nuage ou sur un petit linéaire) ne le sont plus sur de grands linéaires.

3. Proposition d'améliorations de la méthodologie actuelle au Trimble X7

L'analyse de la méthodologie actuellement employée nous a permis de soulever deux principales sources d'erreurs. Une nouvelle méthodologie a alors été élaborée afin de minimiser ces dernières. Le principe de fonctionnement de la méthodologie proposée au Trimble X7 est le suivant. Le relevé est segmenté en plusieurs cheminements encadrés. Des stations dites « principales » seront effectuées tous les x mètres. Celles-ci sont géoréférencées par calcul de relèvement : le scan va alors viser un minimum de 3 points connus pour déterminer ses coordonnées. Ces points sont placés lors de la mise en place de la polygonale de chantier et sont donc calculés dans le système de coordonnées projetées. Cela permettra d'avoir des stations fixes connues dans le système projeté. Des stations de scan dites « secondaires » vont ensuite être positionnées entre les stations principales. Ces dernières seront consolidées, et donc géoréférencées à l'aide de sphères placées sur le terrain.

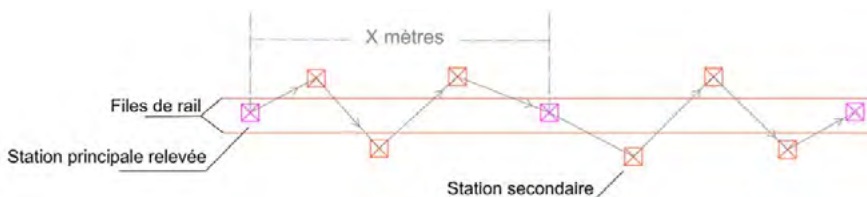


Fig. 2 : Schéma de la méthodologie proposée

En segmentant la zone en plusieurs cheminements encadrés, les erreurs liées à la projection dans le système de coordonnées ne s'appliqueront donc plus qu'entre deux stations principales et seront ainsi minimisées. La distance x séparant deux stations principales est choisie en calculant la distance maximale pour laquelle l'altération linéaire peut être considérée comme négligeable. Des tests sont ensuite réalisés pour déterminer la distance x pour laquelle l'erreur de consolidation reste acceptable par rapport aux prescriptions de précisions imposées par la SNCF dans son cahier des charges. Pour cela, nous avons effectué des cheminements de différentes distances x , puis nous avons observé les résidus. Le but de ce test est de trouver la distance x maximale permettant de gagner en temps d'acquisition tout en obtenant des résultats acceptables.

Les sphères sont positionnées tous les 3m (contre 5m pour la méthodologie initiale). Cela permet d'avoir une meilleure densité de sphères dans le nuage et donc d'améliorer les résultats de consolidation. On passera ainsi à 5 sphères communes entre deux stations dans un rayon de 10m (contre 3 pour la méthodologie initiale).

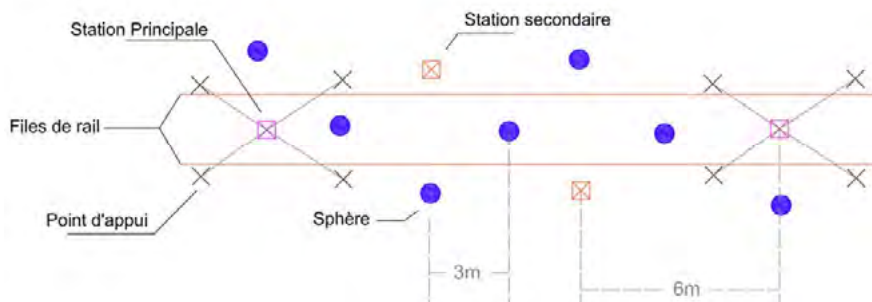


Fig. 3 : Schéma de la disposition des stations et des sphères

4. Essai d'une solution de scanner dynamique : le Trimble Gedo scan

En parallèle de l'amélioration de la méthodologie au Trimble X7, une solution de scanner dynamique a été testée : le système Gedo Scan. Le système Gedo de Trimble est un chariot multi-capteurs permettant de mesurer l'écartement et le dévers des rails de façon très précise. En effet, les précisions annoncées par le constructeur dans la fiche technique du chariot Gedo sont de $\pm 0,3$ mm sur les mesures d'écartement, et de $\pm 0,5$ mm sur les mesures de dévers.

Un prisme peut être fixé au chariot afin de réaliser des mesures par tachéométrie, soit sur un point fixe, soit tous les x mètres par mesure continue.

Le module « scan » ajoute une fixation permettant d'y installer un scanner Trimble TX8.



Fig. 4 : Photo du Trimble Gedo Scan

Principe de fonctionnement du module scan :

Le chariot est poussé par l'opérateur à une vitesse s'approchant de 0,60m/s, vitesse conseillée par Trimble. Il mesure l'écartement et le dévers de la voie. Pendant ce temps, le scanner effectue des mesures en position fixe, c'est-à-dire qu'il ne tourne pas sur lui-même. Ces mesures sont géoréférencées par tachéométrie. Un tachéomètre est positionné aux abords de la voie et vise un prisme installé sur le chariot. L'appareil effectue des mesures continues : il mesure un point tous les x mètres sur le chariot en mouvement. De plus, des points fixes appelés « points de synchronisation » sont mesurés ponctuellement. Ces points permettent de lier les acquisitions scanner et les mesures prises par tachéométrie.

5. Evaluation des différentes méthodologies et conclusion

Les méthodologies proposées seront comparées sur plusieurs critères : la précision relative et absolue du nuage produit, le temps d'acquisition et le temps de traitement du nuage ainsi que la visibilité du scanner. Des évaluations quantitatives et qualitatives sont en cours. L'exactitude des nuages produits sera calculée à l'aide de plusieurs données de référence : un levé tachéométrique de la voie, des points de contrôle placés dans le nuage, la comparaison du nuage avec un nuage de référence.

L'analyse des résultats étant en cours, nous ne sommes pas encore en mesure d'apporter une conclusion sur la qualité des nuages produits par chacune des méthodes. Cependant, nous pouvons tout de même conclure sur les autres critères définis.

Sur le côté pratique, chaque méthode a ses avantages. Le système Gedo scan permet d'effectuer des acquisitions bien plus rapides que la méthodologie proposée au Trimble X7 (pour un temps de traitement similaire). Il faut cependant le calibrer au début de chaque journée de levé. Le Gedo scan nécessite également un arrêt de la circulation des trains sur la ligne, ce qui n'est pas le cas de tous les chantiers. Après calibration, il est possible de relever 200m de linéaire en une heure en comptant la mise en station du tachéomètre et l'installation du chariot. Ce temps pourra être revu à la hausse dans le cas de levés de voies en courbes où l'intervisibilité du tachéomètre et du prisme sera plus limitée. Pour la méthodologie par scanner statique, les 200m sont réalisés en trois heures. Ce temps d'acquisition est compté au plus défavorable car les tests ont été réalisés dans des zones pauvres en détail, ce qui a causé des difficultés lors du placement des mesures des points d'appui. Le temps de terrain pourra alors être revu à la baisse lors d'acquisitions en gare.

Dans les zones de gare, le système Gedo ne pourra pas observer les quais. Il sera alors indispensable de réaliser des relevés complémentaires par scanner statique.

Avant tout résultat sur la qualité des nuages produits, nous pouvons dire que la méthodologie par scanner statique au Trimble X7 sera plus adaptée aux relevés en gare. La méthodologie par scanner dynamique sera alors plus adaptée aux relevés de linéaires plus longs et plus pauvres en détail, tels que des relevés en pleine voie.

Modélisation 4D du château de l'Oedenbourg (Petit Koenigsbourg) par combinaison de relevés de terrain et d'hypothèses archéologiques.



PFE présenté par : Jade-Emmanuelle Heitz
Société d'accueil : Laboratoire ICube, Equipe TRIO, INSA Strasbourg PAGE
Directeur de PFE : Mathieu Koehl
Corretrice/Correcteur : Tania Landes, Mathieu Koehl
Encadrant : Mathieu Koehl



1. Contexte et objectif du projet

L'Alsace rayonne par son riche patrimoine castral. Avec plus de 500 châteaux recensés, l'Alsace est comptée parmi les zones d'Europe les plus densément peuplées en château fort (*Châteaux forts Alsace*). Datant parfois du XI^{ème} siècle, la majorité d'entre eux est en ruine. C'est donc dans ce contexte que ce projet de fin d'études s'inscrit. Il intervient au sein du programme européen INTERREG VI. Plus précisément, au sein des actions 4.6 portée par l'INSA de Strasbourg et 5.4 portée par Tourismus Südliche Weinstraße, axées sur la numérisation et la valorisation numérique du patrimoine castral rhénan. Ce projet de fin d'études se concentrera sur le château de l'Oedenbourg, encore appelé château du Petit Koenigsbourg.

Le château de l'Oedenbourg nous parvient aujourd'hui sous la forme d'une ruine méconnue. Il est situé à Orschwiller (Bas-Rhin, France), à quelques centaines de mètres d'un célèbre voisin, le château du Haut Koenigsbourg. L'Oedenbourg daterait d'une époque antérieure au XV^{ème} siècle où il est déjà mentionné comme *Oden burg*, signifiant « château abandonné ». Voyageant au travers de plus de cinq siècles, ces ruines (cf. Fig 1) nous décrivent un logis gothique du XIII^{ème} siècle. Il est précédé par des murs d'enceinte barrant la crête d'Ouest en Est, probablement construits entre le X^{ème} et le XI^{ème} siècle, et à la destination inconnue. Ceux-ci sont ensuite agrémentés d'une tour maîtresse dès le début du XII^{ème} siècle, servant de point haut et de démonstration de force sur les vallées voisines. Ce n'est qu'une ou deux générations plus tard que le logis, encore visible aujourd'hui, ne sera construit (informations à la date de février 2023).



Fig. 1: Ruine du logis gothique de l'Oedenbourg

L'objectif de ce PFE est alors de reconstituer la vie du site au travers d'une maquette numérique 4D. Celle-ci sera mise en valeur au sein d'une vidéo promotionnelle portée par Alsace Développement Tourisme dans le cadre d'INTERREG VI. Ce PFE forme à la même occasion, un projet d'essai et de recherche d'une méthodologie applicable à l'ensemble de l'action 4.6 (modélisation 3D) du programme INTERREG VI. Cette méthodologie débutera aux acquisitions de données sur le terrain, explorera les exploitations et modélisations du site et s'achèvera à la mise en valeur des modèles 3D finaux historiques. Nous vous proposons donc au travers de ce résumé, de parcourir ces étapes du projet.

2. Acquisition, traitement et exploitation des données

Le site de l'Oedenbourg a connu trois interventions archéologiques et architecturales durant ces 150 dernières années. Ces divers travaux nous fournissent aujourd'hui des données archéologiques et topographiques du lieu à différentes époques. En vue de diversifier et d'enrichir ce jeu de données, une



campagne d'acquisition multi-capteurs a été entreprise durant ce projet. En complément de dessins, d'élévations, de croquis et d'un levé topographique (réalisé entre 1860 et 2001), ont donc été réalisés :

- une campagne d'acquisition lasergrammétrique terrestre, permettant l'acquisition du bâti ruiné (XIII^{ème} siècle), mais aussi des restes d'enceinte (XI^{ème} siècle).
- une campagne photogrammétrique aérienne, offrant un point de vue sur les zones non visibles depuis le sol du site.
- une campagne photographique terrestre, indispensable au texturage du modèle de l'état ruiné du château, mais aussi à la création d'une bibliothèque d'images/textures.
- une campagne topographique liant tachéométrie et relevés GNSS, permettant de rattacher l'ensemble des données acquises dans un système de coordonnées national.

Ces acquisitions se sont vu suivre de la phase de traitement des données brutes, permettant l'obtention de données interprétables et exploitables. Dans un premier temps, les nuages de points bruts acquis par lasergrammétrique ont été consolidés, puis géoréférencés, et par la suite segmentés et classifiés (cf. Fig. 2). Cela permet ainsi de simplifier et d'individualiser leur exploitation, selon les caractéristiques de l'objet représenté, mais aussi du résultat souhaité. Ces nuages de points lasergrammétriques ont ensuite été complétés par un nuage de points photogrammétrique issu de la campagne drone, afin de représenter les parties sommitales des murs du logis.

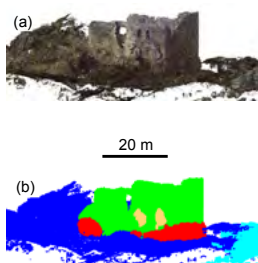


Fig. 2: vue Sud (a) nuage de points propre du site ; (b) classification du nuage de points ; (c) mosaïque d'images de la façade sud du logis (sans échelle)

Concernant les photographies terrestres, nous avons pu générer des mosaïques d'images ou des textures génériques (cf. Fig. 2) servant pour la mise en valeur des modèles.

3. Modèle 3D de la ruine

L'objectif de cette étape est la création d'un modèle 3D photo-réaliste de l'état actuel du site et notamment du logis gothique. Pour cela, nous en avons donc réalisé un maillage sur la base du nuage de points résultant de l'étape précédemment décrite. Ainsi, nous avons veillé à plusieurs points :

- Une topologie correcte

La topologie représente l'organisation et la cohérence géométrique d'un objet (*Office québécois de la langue française*). Elle peut être validée suite à de nombreux contrôles visuels manuels, ou automatique, à l'aide d'outils logiciels tels que l'outil de vérification de maillage de 3DReshaper, l'outil *CleanUp* de Maya etc.

- Une cohérence géométrique

Le but d'une modélisation 3D sur la base d'acquisition est de restituer un ensemble cohérent. Nous parlons de cohérence métrique (dimensions et échelles) et de cohérence géomatique (géoréférencement). Ces dernières ont pu être respectées par l'usage de notions et méthodes, aidées d'outils adaptés. Nous citons notamment les algorithmes de triangulation de Delaunay ou de poisson, ainsi que des outils de nettoyage et création de géométrie. Ceux-ci sont réunis dans la plupart des logiciels de gestion/édition d'objet 3D tels que CloudCompare, 3DReshaper, Meshlab, Maya, Blender et bien d'autres.

- Une cohérence visuelle

En effet, dans l'objectif du projet, la cohérence visuelle (ou esthétique) (couleurs et textures) est très importante. Elle permet de créer l'effet de réalisme et d'immersion pour le spectateur. Celle-ci a donc reposé sur la qualité de la campagne photographique et sur le travail de l'image brute pour le texturage.

Nous avons procédé à des essais de texturage par différentes méthodes, se basant sur des images/photos ou encore sur les informations colorimétriques du nuage de points. Le résultat est visible en figure 3.



Fig. 3: Maillage texturé final du site actuel

4. De la supposition archéologique, à la modélisation 3D pour une visualisation 4D

La restitution 3D d'édifices du patrimoine est un enjeu important. Le modèle 3D est à la fois une source d'information, représentant un matériel scientifique et pédagogique réel, mais aussi un état d'information figé permettant ainsi sa sauvegarde (Shao *et al.*, 2019; Tejedor *et al.*, 2022). La restitution 3D est aussi un moyen ludique de partager l'information sans frontière quelconque.

Nous avons choisi de restituer trois époques du site. Ces modélisations ont été exécutées sous Autodesk Maya. Le choix de l'outil logiciel a été réalisé afin de tester et d'explorer ses possibilités. Le but étant de trouver les techniques permettant une optimisation de la chaîne de modélisation et de post-modélisation pour ce projet et les projets futurs.

La restitution des états historiques a été réalisée à l'aide de primitives géométriques, la majorité des constructions ayant disparue. Nous avons décidé de procéder ainsi pour l'ensemble des constructions du site afin de garder une homogénéité dans le rendu final du modèle 4D.

La base de la restitution est l'information (existante, décrite dans des documents anciens, ou conjecturée, métrique ou non). En partant des données et connaissances dont nous disposons et grâce à l'aide de Jacky KOCH (archéologue travaillant sur l'Oedenbourg), nous avons alors pu les mettre en résonance. Au final, nous avons réalisé des modèles 3D à l'aide : du maillage, permettant de modéliser à l'échelle et géoréférencé ; du plan topographique (par Faber-Schaller 1991 et Waton 1994), nous donnant la position d'éléments aujourd'hui ensevelis ; de dessins techniques architecturaux ; mais aussi, du travail d'analogie archéologique réalisé par et avec Jacky Koch durant ce projet.

5. Mettre en vie et en valeur les modèles 3D

La mise en valeur d'un modèle 3D passe tout d'abord par son texturage. Il permet aussi la restitution de matériaux d'époque, ce qui vient donc ajouter une plus-value archéologique au modèle.

Le texturage débute par la cartographie UV, permettant l'organisation de la géométrie du modèle. Puis, est projetée sur cette cartographie, une image ou texture (*Map*). Sous Maya, il est possible de réaliser ces deux étapes. Nous avons pour cela favorisé l'utilisation de photographies prises sur site pour plus de réalisme et de cohérence. Ces photographies ont été traitées afin d'en créer des *color/albedo map*, *normal*, *height*, *bump map* (cf. Fig. 4). Ces différents types de « cartes »/images permettent alors de simuler le réalisme sans pour autant faire grimper le budget polygone de la scène (très important pour les calculs lors de la réalisation de rendu).



Fig. 4: (a) photographie brute prise sur le terrain ; (b1) albedo map ; (b2) height map ; (b3) specular map ; (b4) normal map



Une fois le modèle texturé, nous pouvions alors le « mettre en vie », en l'ancrant dans sa réalité historique, en y incorporant de la végétation, le terrain et un environnement météorologique. Cette étape permet de créer la quatrième dimension, en intégrant une temporalité à la mise en vie des modèles. Pour ce projet, nous avons donc expérimenté plusieurs outils proposant des bibliothèques d'objets et de textures. Nous pouvons citer Lumion, V-Ray ou encore TwinMotion (cf. Fig. 5). C'est donc sur cette base que la création de la vidéo promotionnelle (ADT : INTERREG VI Action 5.4) pourra être créée.



Fig. 5: Exemple de rendu réaliste du logis gothique de l'Oedenbourg exécuté sous Lumion

6. Conclusion

Au final, ce projet de fin d'études a permis de mettre en place une chaîne de traitement ; de l'acquisition à la mise en lumière du modèle 3D, permettant la création de modèle 4D du château de l'Oedenbourg. Réalisée sous Autodesk Maya, les modèles 3D ont servi de base à la création d'une vidéo de découverte de ce monument alsacien. Ce projet a aussi aidé à balayer un éventail de méthodes et d'outils qu'ils soient de traitement de nuage de points, de modélisation, de création de *texture map* et d'autres. Ces essais ont pour but de guider les projets analogues futurs des actions de l'INSA de Strasbourg au cours du programme INTERREG VI.

Notons enfin que l'ensemble des restitutions historiques du site de l'Oedenbourg ont subi une évaluation (historique) sous l'égide de Jacky KOCH. Le développement de cette thématique est présent dans le mémoire de PFE associé.

Les perspectives

Les perspectives du projet sont nombreuses. La première est la mise à jour des modèles suite aux fouilles archéologiques en cours su. La seconde est la paramétrisation de certains éléments architecturaux. Nous pouvons aussi citer la perspective d'interactivité de la maquette, la rendant manipulable et explorable.

7. Bibliographie

Châteaux forts Alsace: Châteaux forts Alsace - Château fort. Disponible sur: <https://www.chateauxfortsalsace.com/fr/ressources-pedagogiques/chateau-fort/> (Consulté le: 3 Juillet 2023).

Office québécois de la langue française: Office québécois de la langue française. Disponible sur: <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/> (Consulté le 3 Juillet 2023).

Shao, J., Zhang, W., Mellado, N., Grussenmeyer, P., Li, R., Chen, Y., Wan, P., Zhang, X. and Cai, S. (2019) 'Automated markerless registration of point clouds from TLS and structured light scanner for heritage documentation', *Journal of Cultural Heritage*, 35, pp. 16–24. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.013>.

Tejedor, B., Lucchi, E., Bienvenido-Huertas, D. and Nardi, I. (2022) 'Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives', *Energy and Buildings*, 263, p. 112029. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112029>.

Paramètres opérationnels de la rotation de la Terre par filtrage de Kalman



PFE présenté par : **Sharansing Moosary**
Société d'accueil : *Observatoire de Paris*
Directeur de PFE : *Christian Bizouard*
Correcteur : *Gilbert Ferhat*
Encadrants : *Christian Bizouard et Jean-Yves Richard*

1. Introduction

Les paramètres de rotation de la Terre (PRT) sont les petits angles qui décrivent les irrégularités de la rotation entre les référentiels terrestre et céleste. Ces paramètres ne font pas l'objet de modèles prédictifs et doivent être déterminés régulièrement. Or, ils revêtent une grande importance pour opérer la navigation spatiale et le géopositionnement avec la précision requise, de l'ordre du centimètre voire moins pour certaines applications. Les déterminer précisément sur les derniers jours précédant la date courante est une gageure, car, dans ce cas, les données d'observation et les traitements restent partiels. A l'heure actuelle, le Service International de la Rotation de la Terre, constituant l'une des composantes de l'IERS (International Earth Rotation and Services), les calcule en combinant les PRT venant des techniques de navigation par système de satellites (GNSS (Global Navigation Satellite System), SLR (Satellite Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)) et ceux provenant des observations de radio-interférométrie à très longue base (VLBI).

Dans cette étude, nous proposons de mettre en place une méthode plus rigoureuse, fondée sur un filtre de Kalman. Celle-ci intègre le modèle d'évolution dynamique de ces paramètres (équations de Liouville) à partir de leur forçage océanique et atmosphérique qui produisent leur variation sub-saisonnaire. Ainsi, nous espérons réduire l'incertitude des PRT de la date courante par un facteur 2. Après avoir testé la chaîne de traitement sur des PRT opérationnels et démontré son efficacité, nous l'étendrons au problème de la prédiction à l'horizon d'une semaine.

2. Paramètres de rotation de la Terre

Les paramètres de rotation de la Terre représentent la rotation de la Terre autour du Soleil. Ils sont au nombre de cinq. Cependant, d'autres phénomènes agissent sur la rotation de la Terre.

Les forces gravitationnelles de la Lune, du Soleil et des autres planètes qui entourent la Terre forment le phénomène de précession-nutation. Les marées océaniques mais aussi terrestres causées par la Lune, forment un bourrelet équatorial. Celui-ci varie et est responsable du déplacement du centre des masses de la Terre. De ce fait, l'axe de rotation est perturbé et n'est pas stable, il décrit alors un cône autour de l'axe équatorial, on peut alors parler de précession. L'axe de rotation pointe, aujourd'hui, vers l'étoile polaire Alpha Petite Ourse ou Alpha Ursae Minoris. Néanmoins, dans environ 13000 ans il pointera vers Vega, ou Alpha Lyrae puis repointera vers Alpha Petite Ourse après 13000 ans. A la précession s'ajoute la nutation. Il s'agit d'un mouvement oscillatoire périodique qui se superpose à la précession et qui oscille autour du cône de précession. Les nutations les plus importantes ont des périodes d'oscillation allant de 9 jours à 18,6 ans. Ces phénomènes sont



aujourd'hui très bien modélisés théoriquement, la précision des modèles sont de l'ordre du milliseconde de degré (mas) [J-Y. Daniel et al. (2014)].

L'axe instantané de rotation de la Terre et l'axe du référentiel terrestre qui joint le pôle Nord géographique ne sont pas confondus. En effet, leur décalage s'inscrit dans un carré de quelques mètres à la surface de la calotte polaire. Pour imager ce mouvement, nous pouvons prendre l'exemple d'une toupie qui décélère et qui oscille autour de son axe de rotation. Ce mouvement est un couplage entre l'oscillation de Chandler (430 jours) et l'oscillation annuelle. En observant ce mouvement, nous remarquons que le pôle décrit une spirale sur la surface de la Terre qui varie au cours du temps. Ce mouvement n'est pas encore totalement prédictible mais il serait d'origine géophysique. Le pôle de rotation présente une position moyenne annuelle qui se décale vers le Groenland à une vitesse angulaire de 3,7 millisecondes d'arc par an. Ce phénomène est attribué à la fonte des calottes glaciaires, que nous appelons rebond post-glaciaire, il y a 20 000 ans. Aux oscillations de Chandler et annuelle, il faut ajouter l'influence des variations des masses atmosphériques, océaniques et hydrologiques. Ce mouvement du pôle est aussi appelé polhodie [C. Bizouard (2014)]. Le dernier paramètre est la vitesse de rotation de la Terre. Elle n'est pas uniforme, nous observons une décélération séculaire qui a pour conséquence d'augmenter la longueur du jour de 1.6 ms par siècle. Cette décélération peut être expliquée notamment par, la formation du bourrelet équatorial qui freine la rotation de la Terre. En effet, le bourrelet équatorial, dirigé par la force qu'exerce la Lune sur la Terre, entraîne un couple de freinage permanent sur la rotation de la Terre. En plus de ce phénomène, il faut ajouter l'effet des vents qui produisent des variations sur la vitesse de rotation de la Terre [C. Bizouard (2014)]. Pour conclure, les paramètres de rotation de la Terre sont définis par les cinq paramètres que sont : la précession-nutation (p, n), les coordonnées du pôle (x, y) et la vitesse de rotation de la Terre (v).

3. Equation de Liouville

La dynamique du mouvement du pôle de la Terre est représentée par l'équation de Euler-Liouville. Cette équation modélise l'excitation géophysique que nous retrouvons dans le filtrage de Kalman, sous la forme d'une équation différentielle du premier ordre, en coordonnée complexe. Sous cette forme, elle représente l'équation d'état de notre filtre de Kalman.

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser le bruit de l'excitation géophysique. Pour ce faire, nous avons donc conçu un programme, sous Python, calculant l'écart-type entre l'excitation hydro-atmosphérique et l'excitation que nous calculons à l'aide de l'équation de Euler-Liouville.

La formule de l'excitation géophysique est la suivante :

$$p + i*((dp/dt)/\sigma_c = \Psi$$

Avec :

p : coordonnées du pôle (p=x -iy)

dp/dt : dérivée des coordonnées du pôle par rapport au temps

σ_c : pulsation de Chandler égale à $2*\pi/432*(1+i/(2*70))$

Ψ : excitation géophysique

L'écart type que nous obtenons est égale à 28 micro-arc seconde en coordonnée x et 42 micro-arc seconde en coordonnée y.

De l'équation ci-dessus, nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$\Leftrightarrow \begin{aligned} dp/dt &= i * \sigma_c * p - i * \sigma_c * \Psi \\ dp/dt &= F * p + G * u \end{aligned}$$

Avec :

F et G : matrices (2x2)

u : vecteur de l'excitation géophysique selon l'axe x et y



Nous discrétisons l'équation afin de la transformer sous la forme d'une équation d'état pour le filtrage de Kalman :

(1)

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}_{k+1} = \phi_k * \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}_k + \begin{pmatrix} \omega_{xk} \\ \omega_{yk} \end{pmatrix}$$

x_p, y_p : coordonnées du pôle

k : nombre entier

ϕ : matrice d'état (2x2)

ω_x, ω_y : bruit blanc en x et y représentant l'excitation

De cette équation, en découle l'équation d'observation qui nous sera également nécessaire pour le filtrage de Kalman :

$$[z_k] = H[x_k] + [v_k] \quad (2)$$

Avec :

z_k : vecteur de la mesure observée (2x1)

H : matrice de transfert (2x2)

x_k : vecteur d'état (2x1)

v_k : erreur sur la mesure représentée par un bruit blanc (2x1)

4. Filtrage de Kalman

Bien qu'elle soit appelée filtrage, cette méthode d'estimation ressemble plus à un algorithme qu'à un filtre. Le filtrage de Kalman minimise l'erreur d'estimation de l'état du système, dans notre cas (x_p et y_p , coordonnée du pôle).

Pour commencer, nous devons renseigner l'équation d'état vue précédemment. Nous devons également fournir au filtre la matrice de covariance des erreurs de cette équation d'état que nous nommerons P . Nous attribuons une valeur initiale à cette matrice, qui sera par la suite mise à jour lors du processus. Enfin, nous renseignons la matrice de covariance d'erreur du bruit blanc, que nous nommerons R . Grâce à ces données d'entrées, nous pouvons calculer le gain de Kalman de la façon suivante :

(3)

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$

Avec :

K : gain de Kalman

P : matrice de covariance des erreurs (2x2)

H : matrice de transfert (2x2)

R : matrice de covariance des erreurs du bruit blanc (2x2)

Le gain de Kalman permet d'optimiser l'erreur d'estimation qui intervient dans la mise à jour de l'estimation. Il sert donc de facteur d'amélioration de la qualité lors de la mise à jour de l'estimation à l'aide des observations Z_k .

Nous calculons la mise à jour de l'estimation à l'aide de l'observation à l'époque k :

(4)

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$

Avec :

\hat{x} : coordonnées du pôle après mises à jour de l'estimation (état x à l'époque k a posteriori)

\hat{x}^- : coordonnées du pôle initiales (état x à l'époque k a priori)



Les résultats de ce calcul fournissent les estimations du temps k a posteriori des coordonnées du pôle.

À cette étape du filtrage de Kalman, se succède la prédiction de l'état x du système à un temps k+1. Pour cela, la matrice de covariance P est calculée, dans un premier temps, en prenant en compte le gain de Kalman :

(5)

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

Avec :

P : la matrice de covariance des erreurs sur les coordonnées du pôle mise à jour (a posteriori)

P- : la matrice de covariance des erreurs initiale (a priori)

I : la matrice identité

Ensuite, en se servant de la nouvelle matrice de covariance des erreurs au temps tk et des nouvelles valeurs de l'état xk a posteriori, le filtre calcule une prédiction de l'état et de sa covariance, au temps k+1. Les formules sont les suivantes :

(6)

$$\hat{x}_{k+1}^- = \phi_k \hat{x}_k$$

(7)

$$P_{k+1}^- = \phi_k P_k \phi_k^T + Q_k$$

Qk = la matrice de covariance du bruit du modèle au temps tk ;

Le filtrage de Kalman relève de cette suite d'opérations au temps tk itératives pour chaque nouvelle mesure zk :

- 1- Calcul du gain optimal de Kalman au temps tk : Kk
- 2- Calcul de l'état xk a posteriori à partir de la nouvelle mesure zk et du nouveau gain de Kalman Kk
- 3- Calcul de l'erreur d'estimation a posteriori : matrice de covariance Pk
- 4- Calcul de l'état du système xk+1 a priori et de sa matrice de covariance a priori Pk+1
- 5- Les valeurs de xk+1 et Pk+1 sont alors rebouclées en (1) pour le temps tk+1 suivant

5. Comparaison avec la méthode d'estimation par les moindres carrés

La comparaison des résultats, provenant de ces différentes méthodes, que sont d'une part le filtrage de Kalman et de l'autre les moindres carrés, nous permettra de distinguer la qualité de l'estimation de ces deux méthodes. Nous nous attendons à une meilleure précision avec l'usage du filtrage de Kalman.

La méthode des moindres carrés qui sera utilisée consiste à effectuer une somme pondérée des coordonnées du pôle (xp,yp) estimées sur N dates précédentes (méthode auto régressive d'ordre N) pour évaluer ces coordonnées aux dates futures (de 1 à 7 jours par exemple).

6. Bibliographie

- Daniel,J-Y. et al. (2014). Sciences de la Terre et de l'Univers. Vuibert. ISBN 978-2311009675
 Bizouard, C. (2014). Le mouvement du pôle de l'heure au siècle-Modélisation géophysique. Académiques, France. ISBN 978-3-8416-2792-6

Proposition d'une méthode d'extraction automatique d'objets dans un nuage de points issu d'un système de cartographie mobile équipé d'un LiDAR.

PFE présenté par : **Yannick COUEILLES**
Société d'accueil : **PARERA**
Directrice de PFE : **Amandine BAQUÉ**
Encadrant : **Kyle RAJAONA**
Correcteurs : **Hélène MACHER, Emmanuel ALBY**



1. Introduction et contexte de l'étude

Parera est une société composée de plus de 800 collaborateurs, elle fut fondée en 1968 et a développé ses activités autour des opérateurs réseaux. Cette dernière 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 L'Isle Jourdain (32) dans le Gers, à une trentaine de kilomètres de Toulouse (31). Depuis 2013, Parera a mis en place le service Mass Data. Il opère sur divers marchés de réalisation de plans topographiques à grande échelle, en utilisant des nuages de points linéaires à l'échelle du corps de rue, provenant de l'acquisition par LiDAR terrestre dynamique (MMS). Dans un premier temps il a fallu mettre en place une chaîne de traitement optimisant ces processus de production pour améliorer la qualité des produits et réduire les temps de digitalisation, et désormais, il s'agit de minimiser le temps de reprise manuelle des fichiers créés, notamment pour la détection d'affleurants C'est donc dans un souci de compétitivité que la société doit rester à la pointe de la technologie et proposer de nouvelles solutions dans un domaine en constante évolution.

Dans cette perspective, cette étude vise à améliorer la qualité du traitement des données acquises par MMS. La principale problématique concerne l'amélioration du processus de détection d'éléments dans un nuage de points à l'échelle de la rue.

Pouvoir détecter des objets récurrents avec un haut niveau d'exhaustivité nécessite un temps de travail relativement important s'il doit être effectué manuellement. Ces objets et affleurants sont omniprésents en ville, comme en campagne, mais ils possèdent néanmoins des caractéristiques pouvant varier d'une région à l'autre. Leur taille les rend parfois difficile à repérer au sein d'un nuage de point.

La détection directe au sein d'un nuage de points étant trop compliquée à mettre en place à mon échelle et les résultats présents dans la littérature de trop faible qualité par rapport aux attentes de l'entreprise, il a été choisi d'utiliser les photographies générées lors des sessions d'acquisitions par le MMS. Dans cette étude, la méthode a été développée sur l'ETL FME et fait donc le lien entre les photos orientées provenant du MMS et le nuage de points, afin de géolocaliser les affleurants automatiquement dans ce dernier afin d'augmenter la productivité lors de la digitalisation de PCRS.

2. Objectifs du Projet de Fin d'Études

Face à une demande croissante concernant la digitalisation de PCRS, le but est d'intégrer un processus de traitement de la donnée en amont de la digitalisation, afin de permettre un meilleur rendement aux équipes de dessinateurs.



Les objectifs de ce projet de fin d'études sont donc :

1. Comprendre, évaluer et valoriser le système d'acquisition MMS, le PEGASUS Two : Ultimate ainsi que les données qu'il peut fournir ;
2. Mettre en place une méthode d'extraction de l'information sur des photos orientées et la géoréférencer automatiquement dans le nuage de points ;
3. Intégrer la méthode d'extraction de l'information créée dans la procédure de digitalisation.

3. Valorisation des données photographiques

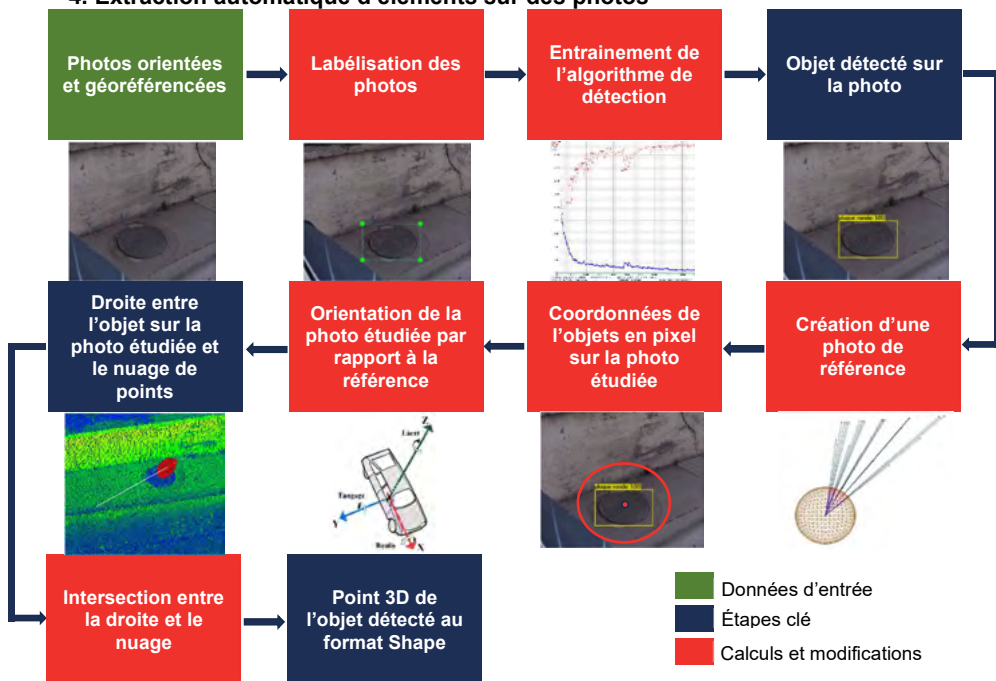
Jusqu'à présent, les photos issues du PEGASUS Two : Ultimate n'étaient utilisées que pour la création d'ortho-images en couleur ou pour de la publication sur plateformes immersives la création de jumeaux numériques. L'occasion de valoriser ces dernières a été saisie. À partir des fichiers d'orientation qui les accompagnent, nous pouvons reconnaître directement sur les photos des affleurants tels que : les bouches à clé, les regards, les grilles ou les coffrets gaz et élec.

La détection d'objets au sein d'une photographie peut se faire principalement de deux façons :

1. À l'aide d'algorithmes de détection de contours qui considère l'image sous forme matricielle ;
2. En utilisant l'apprentissage automatique (ou machine learning) et en entrainant un algorithme à reconnaître une forme en lui donnant une bibliothèque d'objets de référence.

Cette deuxième option a été retenue pour l'étude car elle ne nécessite pas de rééchantillonnage et se voit plus polyvalente quand il s'agit de s'adapter aux changements d'environnements. De plus plusieurs groupes de scientifiques s'accordent à dire que cela reste la méthode la plus efficace à ce jour pour le traitement de ce type de données.

4. Extraction automatique d'éléments sur des photos



Afin d'avoir un algorithme de détection suffisamment robuste vis-à-vis des changements d'environnements, il a fallu créer une base de données spécifique pour les affleurants que l'entreprise a déterminée, en fonction des marchés actuels et à venir.

Au cours de cette étude, un nombre impressionnant de 46 000 images a été traité. Ces images ont été labélisées en six classes d'objets, ce qui a permis de recenser plus de 114 000 entités au total. Ces chiffres significatifs sont le résultat d'un protocole de labélisation simplifié mis en place, de la mobilisation d'une équipe de sept personnes pendant plus d'une semaine et de la multiplication des données, basée sur les résultats d'une étude publiée par des scientifiques chinois en 2022 (Figure 2).

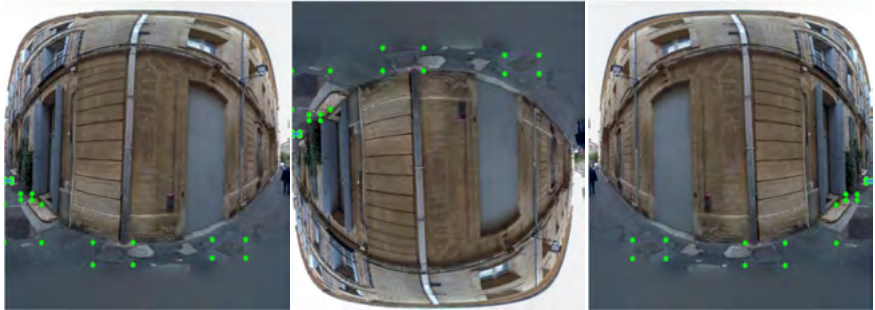


Figure 2 : Gauche : photo de base, Milieu : axe vertical inversé, Droite : axe horizontal inversé

L'idée derrière la création de ces photos jumelles est que l'algorithme de détection d'objets considère différemment deux photos identiques qui voient leurs axes horizontaux et verticaux inversés. Cette technique a permis de lisser la courbe d'apprentissage de notre algorithme tout en fournissant des données supplémentaires « gratuitement » du moment où la labélisation reste juste. Le programme a été pensé pour s'adapter aussi bien aux photos planaires qu'aux photos sphériques cela permet d'accroître fortement le panel d'applications possible.

Une cellule qualité a été mise en place et la labélisation des photos a été contrôlée à hauteur de 30% du nombre total d'images. C'est une équipe différente qui s'est chargée de contrôler et corriger les photos. Cette étape est nécessaire pour s'assurer, d'une part, de la qualité des données servant à l'entraînement de l'algorithme et d'autre part pour qu'il n'y ait pas trop d'éléments mal labélisés qui viennent entacher les résultats finaux de la détection.

L'objectif du programme écrit est de tracer une droite entre la position de l'objet sur le capteur photo, et la position de ce dernier sur le nuage. Il a fallu trouver le moyen de faire le lien entre les coordonnées pixel de l'image et 3D d'un point sur le nuage, correspondant à ce même pixel. Connaissant la position et l'orientation du centre du capteur ainsi que les couples de coordonnées pixel/3D, l'image de référence a pu être créée. La création de cette dernière est donc le cœur du fonctionnement du programme.

L'orientation des photos a dû être réalisée suivant les trois angles relatifs à la position du véhicule et donc du MMS, on parle ici des angles de tangage, de lacet et de roulis. Certaines opérations ont été réalisées afin que l'orientation se déroule correctement. Ainsi les droites ont pu être corrigées dans leur orientation vis-à-vis la position de l'affleurant qu'elles étaient censées pointer (Figure 3).

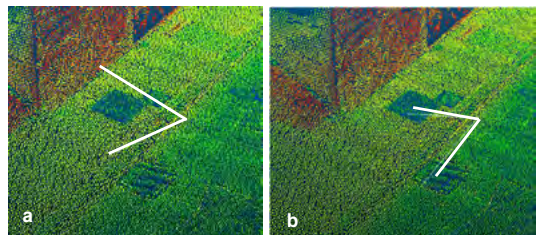


Figure 3 : a) Avant l'orientation des droites, b) Après l'orientation

6. Conclusion et perspectives

Cette étude complémente une chaine de traitement déjà existante. Elle permet d'aider au repérage d'objets et d'affleurants au sein d'un nuage de points. L'autonomie presque totale du programme à pointer un élément quel qu'il soit du moment où il a été entraîné à le faire, permet un gain de rentabilité au niveau du temps de digitalisation. Le technicien n'a plus besoin de chercher plusieurs minutes la position d'un affleurant invisible sur le nuage de points, il est guidé par des marqueurs qui le positionne à $\pm 40\text{cm}$.

Au moment de l'écriture de ce résumé, les résultats sont très encourageants. L'optimisation de l'algorithme de détection est donc le point le plus important pour l'obtention de meilleurs résultats. C'est une étape très chronophage en « temps machine », limitée par les capacités de calcul de l'ordinateur.

Classe	Précision de l'algo	Nombre réel	Nombre détecté
Bouche a clé	77%	770	582
Plaque ronde	92%	1204	980
Plaque carrée	74%	966	606
Plaque carrée-ronde	88%	787	694
Grilles-avaoires	91%	753	602
Coffrets gaz / élec	92%	1705	1422
TOTAL	87%		

Tableau 1 : Résultat de la détection sur un jeu de données test de 3500 images.

Ce projet a permis à l'équipe Mass Data d'élargir son champ de compétences en termes d'utilisation de la donnée, mais également à l'équipe chargée de la détection de réseaux grâce à une détection plus précise des réseaux d'eau potable, ainsi qu'au Pôle Patrimoine de l'entreprise grâce à la détection d'objets sur les photos sphériques.

Cependant, il est possible de voir plus loin que la détection d'objets sur des photos orientées. Les recherches et tests effectués en parallèle, ont permis de mettre au point un algorithme de détection sur des ortho-images géoréférencées, ce qui permet notamment de géolocaliser l'ensemble de la signalisation horizontale en fonction de la qualité de l'image avec une précision relative de $\pm 4\text{cm}$.

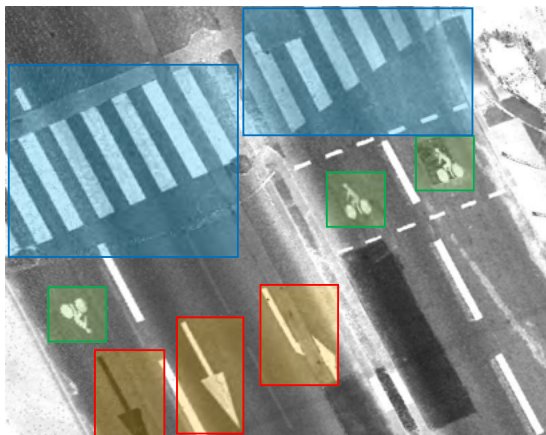


Figure 4 : Visuel de la détection possible pour la signalisation horizontale sur une ortho-image.

Exploitation de nuages de points 3D acquis par lasergrammétrie terrestre pour l'estimation de *Leaf area index* (LAI) en milieu urbain

PFE présenté par : **Camille Taufflieb**
Société d'accueil : **INSA Strasbourg - TRIO**
Directeur de PFE : **Georges Najjar**
Correctrice : **Hélène Macher**
Encadrante : **Nathalie Breda et Tania Landes**



1. Contexte et objectifs de l'étude

La climatologie des villes est devenue un sujet déterminant pour le bien être des habitants, en particulier depuis la prise de conscience du réchauffement climatique. L'étude du microclimat urbain porte notamment sur les îlots de chaleur urbains, un phénomène issu de la densification urbaine et qui traduit une surchauffe de la température de l'air en ville par rapport à la campagne. Ces élévations localisées des températures engendrent par exemple un inconfort thermique de moins en moins supportable pour la population. L'une des solutions développées est de végétaliser les villes en introduisant davantage de pelouse et d'arbres. Ces derniers rafraîchissent l'environnement grâce aux ombres portées (sur les passants et les façades) et leur capacité à maintenir une température de feuillage raisonnable en régulant leur propre chaleur en transpirant (Landes, 2023).

L'émission de l'eau dans l'air se réalise sous forme gazeuse par l'intermédiaire des feuilles, et notamment des stomates. Ceux-ci désignent les petits orifices présents sur les tiges ou les feuilles qui permettent à la plante de respirer et d'opérer des échanges avec l'atmosphère. Connaître la surface de l'ensemble des feuilles d'un arbre permet donc d'estimer la quantité de ces orifices responsables des échanges gazeux, d'où la nécessité de déterminer l'indice foliaire de l'arbre.

L'indice foliaire, ou indice de surface foliaire (LAI pour *Leaf Area Index*), est un paramètre précieux pour caractériser la contribution de la végétation au rafraîchissement de l'air. En effet, il est défini comme la surface de l'ensemble des feuilles par unité de surface de sol. Il se calcule en divisant la surface foliaire totale par la surface projetée verticalement au sol de la couronne (cf. figure 1).

Au regard de la définition de cet indice, il semble naturel qu'aucun capteur simple ne puisse mesurer directement sa valeur, comme on pourrait le faire pour la température de l'air ou la vitesse du vent. Différentes méthodes, plus ou moins fiables et chronophages, ont donc été développées au fil des années afin de déterminer cet indice le plus efficacement possible. Aujourd'hui, ce milieu peut bénéficier de la lasergrammétrie, une technologie émergente pour la mesure du LAI mais exploitée depuis déjà plusieurs années en topographie. Une application terrestre, à l'aide d'un scanner laser, est particulièrement intéressante en milieu urbain, souvent encombré par les bâtiments et autres éléments de voirie. Ce Projet de Fin d'Etudes vise ainsi à étudier la possibilité d'extraire, à partir de nuages de points acquis par lasergrammétrie terrestre en milieu urbain, la surface de feuilles d'un arbre afin d'en définir son LAI.

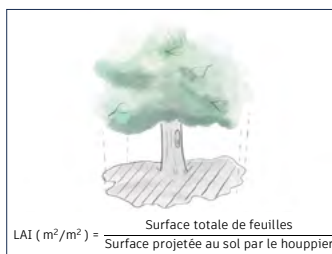


Fig. 1 : schéma de calcul du LAI (Triollet et al., 2021).

Le fonctionnement de la végétation en ville et son impact sur l'îlot de chaleur urbain sont au cœur de plusieurs travaux menés depuis 2013 à Strasbourg par l'équipe TRIO du laboratoire ICube, dont le programme de recherche ANR TIR4sTREEt (*Thermal InfraRed for Street Trees*). Ce projet rassemble



des scientifiques de divers horizons et vise à reproduire l'impact physique des bâtiments et des arbres sur le microclimat urbain grâce à des mesures et modélisations 3D du site. Pour cela, six arbres (platanes, micocouliers et tilleuls) dans trois rues d'un quartier résidentiel de Strasbourg (cf. figure 2) ont été sélectionnés. Ils ont été équipés de nombreux capteurs afin de suivre différentes données au fil des saisons, dont leur état de santé, l'humidité alentour, leur température de surface ou encore celle des bâtiments.

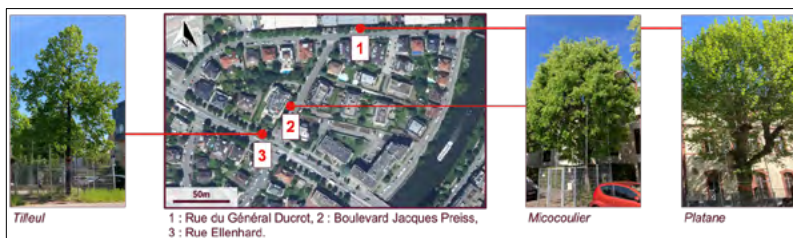


Fig. 2 : vue satellite tirée de Géoportail et photos du site (04/05/2023).

2. Méthode appliquée

Cette étude s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux déjà réalisés au sein de l'équipe TRIO, notamment la collaboration de Bournez et Hu (2018) ainsi que la thèse de Hu (2018). Ce dernier a développé une méthode d'estimation de LAI (méthode PATH) qui repose sur moins d'approximations que les autres approches et qui se base sur des données acquises par lasergrammétrie. Ayant présenté des résultats prometteurs jusqu'ici, son efficacité a encouragé son application dans cette étude.

2.1. Acquisition et consolidation des nuages de points

Un arbre est une structure à géométrie complexe. La reconstruction de l'enveloppe de sa couronne demande alors la mise en place de différentes stations de balayage autour de celui-ci afin de minimiser le phénomène d'occlusion, que ce soit en son cœur (feuilles, branches) ou dans son environnement (arbres voisins, mobilier urbain, etc.). De cette manière, il n'est pas nécessaire que l'arbre soit entièrement visible à chaque balayage, mais que suffisamment de stations puissent le caractériser une fois les nuages de points consolidés entre eux. Cette étape de consolidation est fondamentale car elle permet de travailler par la suite sur le nuage fusionné (pour la reconstruction de l'enveloppe) ainsi que sur les nuages de points exportés par station et géoréférencés au moins localement.

2.2. Reconstruction de l'enveloppe de la couronne

Après avoir segmenté la couronne de l'arbre à partir du nuage fusionné, un algorithme est ensuite appliqué au nuage de points pour reconstruire son enveloppe. Cet algorithme de création de formes dites « formes alpha » permet de générer des enveloppes convexes et concaves. La forme convexe désigne la plus petite surface (convexe) qui englobe tous les points, tandis que la seconde traduit davantage la tortuosité de la couronne de l'arbre (cf. figure 3).

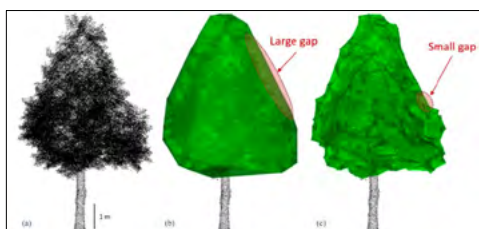


Fig. 3 : nuage de points (a), enveloppe convexe (b) et enveloppe concave (c) d'une couronne (Hu, 2018).

2.3. Calcul de la densité de surface foliaire

L'enveloppe de la couronne générée à partir du nuage fusionné est utilisée comme **masque** pour chaque station de balayage. L'objectif est d'exclure les impulsions laser sans intersection avec

l'enveloppe (cf. figure 4, impulsions a) et également d'évincer celles bloquées par des objets situés devant l'arbre (cf. figure 4, impulsions b). Ce filtrage permet de ne conserver que les impulsions qui ont pénétré l'enveloppe de la couronne (cf. figure 4, impulsions c, d et e) et qui sont intéressantes à exploiter pour le calcul.

Les intersections entre les impulsions laser émises et l'enveloppe de la couronne sont calculées pour chaque station de balayage. Il est alors possible de déterminer la longueur de chemin d'un rayon, définie comme la distance entre le point d'intersection d'entrée et celui de sortie de l'impulsion à travers l'enveloppe (cf. figure 4, impulsions d et e). Les impulsions avec un retour à l'intérieur de la couronne (cf. figure 4, impulsions c) sont aussi prises en compte, même si elles ne traversent pas strictement l'enveloppe. Ces statistiques permettent ainsi de calculer la **distribution des longueurs de chemins** des faisceaux laser pour chaque station.

A partir du masque de la couronne, il est également possible de filtrer les différents faisceaux laser et de déduire la **probabilité de trouées** pour chaque station de balayage. En pratique, celle-ci est calculée comme le rapport entre le nombre d'impulsions traversant réellement la couronne et toutes celles qui y entrent de manière générale. Les impulsions traversant totalement la couronne, avec ou sans retour d'un objet derrière l'arbre, sont considérées comme des trouées, tandis que celles bloquées par des objets devant l'arbre sont omises du calcul.

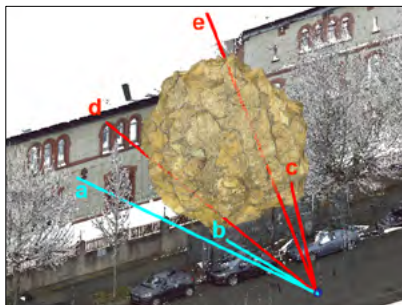


Fig. 4 : 5 types d'impulsions laser : (a) – sans intersections avec l'enveloppe, (b) – bloquées par des objets devant l'arbre, (c) – intersection avec l'enveloppe et retour dans la couronne, (d) – traversée de l'enveloppe et retour derrière l'arbre, (e) – traversée de l'enveloppe et sans retour. Inspiré de Hu (2018).

La densité de surface foliaire est ensuite déduite du modèle de distribution des longueurs de chemins (modèle PATH) calculées pour chaque station individuellement. Plutôt que de choisir l'une de ces valeurs comme résultat pour l'arbre complet, une **moyenne pondérée** des résultats par station permet d'aboutir à la densité de surface foliaire de l'arbre en utilisant davantage d'échantillons tout en obtenant un niveau de confiance plus élevé. Concernant le facteur de pondération, le principe est de dire que plus il y a d'observations, plus elles sont fiables et méritent donc un poids plus important. Les critères du nombre d'impulsions laser et la somme des longueurs de chemins ont donc été testés en tant que poids, le premier se rapportant au nombre d'échantillons dans la direction de balayage, tandis que le second contient des informations supplémentaires sur la profondeur et est lié à la proportion du volume.

2.4. Calcul de l'indice foliaire

Pour finir, le produit de la densité de surface foliaire de l'arbre avec le volume de l'enveloppe aboutit à la surface foliaire de la couronne. Il est alors possible de calculer le rapport entre cette surface foliaire et la surface projetée au sol de la couronne afin d'accéder au LAI (cf. figure 1).

3. Contributions personnelles

3.1. Appropriation de la méthode PATH et étude de différents paramètres

Ce travail a pour premier objectif de s'approprier la méthode PATH développée par Hu (2018) et de l'appliquer au site d'étude. Pour cela, plusieurs campagnes d'acquisition au scanner laser ont été réalisées à différents stades du cycle de vie des arbres : deux relevés en période sans feuilles (février et mars) et un relevé en cours de feuillaison (mai). Ces premiers traitements ont mis en évidence l'attention à apporter à certaines étapes du protocole. Dans le nuage de points fusionné, la difficulté de la segmentation peut, par exemple, résider dans la proximité des arbres voisins, du mobilier urbain ou encore, des bâtiments proches. Les capteurs installés (température, vitesse du vent, etc.) ainsi que leur support peuvent également pénétrer la couronne et rendre la segmentation complexe. De même, l'algorithme



utilisé pour calculer la densité de surface foliaire nécessite de déterminer manuellement un seuil d'intensité. Cette valeur dépend des spécifications internes du scanner laser et permet de classer les pixels du ciel (sans retour) et de la canopée.

D'autre part, les applications de la méthode PATH sur les différents jeux de données ont souligné l'importance de certains critères. Ce travail a donc également consisté à évaluer l'influence de ces paramètres sur les valeurs finales de LAI. Parmi ceux étudiés, on trouve notamment la forme de l'enveloppe de la couronne (concave ou convexe), le nombre de faces de celle-ci, la gestion du bruit dans les nuages de points ou encore le choix du critère de pondération pour le calcul de densité de surface foliaire.

3.2. Acquisition de valeurs de comparaison au LAI-2000

Afin de disposer de valeurs de comparaison, des mesures ont été réalisées en parallèle au LAI-2000. Cet appareil utilise des relations entre l'indice foliaire et la proportion de lumière interceptée par la végétation afin de déterminer le LAI du couvert. Contrairement à la méthode PATH, il ne tient pas compte de la distribution non aléatoire des feuilles dans l'espace, effet dit « d'agrégation », et a donc tendance à sous-estimer les résultats. Les comparaisons entre ces deux méthodes de calcul restent ainsi limitées.

3.2. Utilisation et/ou développement de scripts

Enfin, l'application de la méthode PATH repose sur l'utilisation de deux algorithmes essentiels : un premier, destiné à la création de l'enveloppe de la couronne (Bournez, 2018), et un second, pour le calcul de la densité de surface foliaire (Hu, 2018). Dans le but de réunir ces fichiers et d'automatiser un maximum d'étapes, ce PFE a conduit au développement d'une application. Celle-ci associe des programmes existants (enrichis de quelques fonctionnalités) à de nouveaux scripts, développés spécifiquement dans le cadre de ce projet. De cette manière, elle rassemble la segmentation et la création de l'enveloppe de la couronne ainsi que les calculs de densité de surface foliaire et de LAI.

4. Conclusion et perspectives

Ce projet visait à étudier la possibilité d'estimer, à partir de nuages de points acquis par lasergrammétrie terrestre, le LAI d'un arbre en milieu urbain. La méthode PATH, choisie pour ses résultats prometteurs, a été appliquée à différents moments du cycle de feuillaison de six arbres. De nombreux tests et manipulations ont également permis de déterminer la sensibilité du LAI à plusieurs paramètres, dont la forme de l'enveloppe de la couronne, ou encore son nombre de faces. Néanmoins, l'évaluation de ce travail et la précision de ces résultats restent encore à établir. Par ailleurs, des données de comparaison ont été acquises au LAI-2000. A ce stade, ces mesures sont délicates à comparer avec les résultats issus de la méthode PATH mais des modes de traitement différents pourraient affiner ces valeurs et faciliter leur exploitation. Enfin, ce projet a mené au développement d'une application qui rassemble différents scripts utilisés pour l'exécution de la méthode PATH. D'autres fonctionnalités pourraient également être ajoutées par la suite.

Une autre perspective de ce projet consisterait à étudier la possibilité d'appliquer la méthode PATH à des nuages de points acquis par lasergrammétrie mobile, à partir de systèmes montés sur voiture ou sur drone. Ce type d'acquisition permet en effet de couvrir une large zone plus rapidement qu'avec un système fixe et serait une piste intéressante pour une application en milieu urbain.

5. Références bibliographiques

- Bournez, E. (2018) *Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains*. Thèse réalisée à l'INSA Strasbourg. Université de Strasbourg. pp.1-217.
- Hu, R. (2018) *Estimation cohérente de l'indice de surface foliaire en utilisant des données terrestres et aériennes : Consistent forest leaf area index retrieval using ground and airborne data*. Thèse réalisée dans l'équipe TRIO d'ICUBE. Université de Strasbourg. pp.1-191.
- Hu, R., Bournez, E., Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., Saudreau, M., Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J. and Yan, G. (2018) *Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 144 357–368.
- Landes, T. (2023) *D'où vient le pouvoir rafraichissant des arbres en ville ?* [Internet] The Conversation. Disponible sur : <https://the-conversation.com/dou-vient-le-pouvoir-rafraichissant-des-arbres-en-ville-199906> [Consulté le 12/04/2023].



Étude du Leica Pegasus Backpack visant à explorer ses limites et optimisation du temps de traitement

PFE présenté par : Valentin BELINGARD
Société d'accueil : Géodis Géomètres-Experts
Directeur de PFE : Samuel PITIOT
Correctrice : Hélène MACHER
Encadrant : Alexis ELISABETH



1. Introduction et contexte de l'étude

Ces dernières années, la demande de données géographiques 3D de nos environnements ne cesse d'augmenter. Leur usage est de plus en plus poussé et de plus en plus complexe. C'est pourquoi le mobile mapping est un domaine en pleine croissance et la collecte d'un large panel de données tridimensionnelles fait de plus en plus partie des compétences des cabinets de Géomètres-Experts. Le point fort des MMS (Mobile Mapping System) et notamment des Backpacks réside dans la rapidité et la mobilité. En effet, ce système est peu intrusif et offre la possibilité de couvrir de grandes surfaces en un temps limité. L'acquisition des données se base sur un balayage LIDAR et un déplacement continu du système créé par la marche de l'utilisateur.

En 2021, le cabinet a fait l'acquisition du sac à dos Leica Pegasus Backpack. Alors que l'investissement reste très important, aujourd'hui, le cabinet n'exploite pas tout son potentiel. Il n'y a pas de protocole précis pour optimiser la ligne de production ou même la chaîne de traitement. En règle générale le temps passé sur un dossier faisant appel au Backpack est plus long que s'il avait été traité en topographie traditionnelle. Ce qui n'est évidemment pas le but. En effet, l'objectif est de couvrir de longs linéaires routiers en peu de temps, limitant ainsi les déplacements et les frais annexes associés.

2. Objectifs du Projet de Fin d'Études

Mon champ d'investigation va se porter tout particulièrement sur la ligne de production. Etudier le Backpack va me permettre d'analyser chacun des éléments qui composent ce sac à dos et apprendre à connaître leur fonctionnement mais aussi leurs limites. L'objectif est de trouver des réponses aux différentes interrogations et de rendre l'utilisation du Backpack par le cabinet plus performante. Il s'agit de diminuer le temps d'acquisition sur le terrain sans pour autant dégrader les données collectées. Tous les axes de réflexion et tous les tests sont réalisés dans l'optique de fournir un plan topographique à l'échelle 1/200 et des profils en travers de la chaussée tous les 20m. Les précisions planimétrique et altimétrique doivent être inférieures à 5cm.

3. Le fonctionnement du Backpack

Le Backpack est le fruit d'une combinaison de différentes technologies, ce qui lui permet de réaliser en continu des estimations de positionnement, des mesures tridimensionnelles et des acquisitions photogrammétriques tout en étant en mouvement. Son ordinateur embarqué permet de synchroniser et stocker les données entre elles. La tablette qui fait office de terminal portable permet de visualiser en temps réel le levé.





Fig. 1 : Description du Leica Pegasus Backpack

Le processus général d'utilisation du Backpack est divisé en quatre grandes étapes : l'acquisition, le calcul de la trajectoire, l'extraction du nuage de points et la digitalisation.

L'acquisition reste l'étape la plus importante de tout le processus. En effet, tout le reste de la chaîne de traitement découle de celle-ci. C'est pourquoi, une antenne GNSS multi-constellation doit être mise en place comme pivot dans une zone dégagée et proche du chantier. Avant de commencer l'acquisition, une phase de calibration de la centrale inertielle et de couplage des données doit être réalisée. Pour se faire, le Backpack doit suivre une initialisation statique puis mobile. Lors de la phase statique de trois minutes, l'appareil enregistre des observations GNSS pour se positionner dans l'espace. La phase dynamique quant à elle permet d'étalonner la centrale inertielle et de coupler les informations obtenues avec celles du GNSS.

Lors de la phase dynamique, l'utilisateur met le Backpack sur son dos et commence à marcher pendant trois minutes à vitesse soutenue en formant des quadrilatères. A mi-parcours il doit faire une diagonale pour reprendre la même trajectoire mais dans le sens inverse.

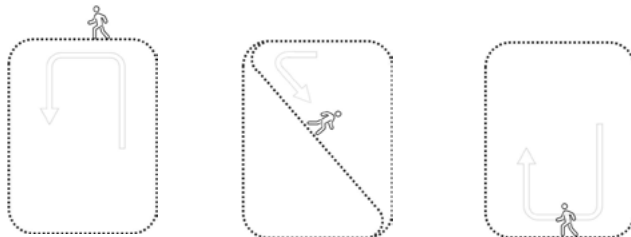


Fig. 2 : Illustration de la phase d'initialisation dynamique du Backpack

L'objectif est d'enregistrer le comportement de l'utilisateur lorsqu'il marche à vitesse constante, lorsqu'il accélère et lorsqu'il tourne aussi bien à droite qu'à gauche. Lors de cette phase d'initialisation dynamique si l'utilisateur ne tourne pas aussi bien à droite qu'à gauche, la centrale inertielle n'aura pas enregistré assez d'informations pour être correctement étalonnée.

Après la première phase d'initialisation s'ensuit la phase de levé des zones d'intérêts. Pendant cette étape il faut chercher les trajectoires les plus rectilignes avec une couverture GNSS optimale. Si ces conditions ne sont pas réunies il faudra densifier la zone où les masques GNSS sont présents, avec des points de calage (GCP). Du début à la fin, le calcul et l'enregistrement de la trajectoire sont ininterrompus. Seule l'acquisition lidar est ponctuelle, l'opérateur peut choisir de lancer ou d'interrompre un cycle de mesure appelé « Walk ». Une mission est donc constituée d'une multitude de walks qui lors du post-traitement apparaîtront comme plusieurs nuages de points bien distincts.

Après export des données collectées, le post traitement de celles-ci commence par **le calcul de la trajectoire**. Cette étape se fait sous l'extension Inertial Explorer dans l'interface du logiciel Leica Pegasus Manager. Les informations transmises par l'INS vont être couplées aux données du GNSS afin de déterminer la position du système en chaque point d'acquisition. Le calcul du pivot situé à proximité du chantier va fixer les ambiguïtés GNSS à partir des données observées par l'antenne GNSS du pivot et celle du Backpack.

Pour effectuer ce calcul dans Pegasus Manager il faut utiliser la méthode « Tightly Coupled, both ». Le terme « both » signifie que le logiciel va prendre en considération les données de la trajectoire dans le sens aller mais aussi retour. Derrière cet outil se cache en réalité un algorithme robuste qui emploie un filtre de Kalman. Il est donc capable de prédire des paramètres et des erreurs en combinant toutes les informations qu'il a à sa disposition, ce qui fera tendre les résultats vers la solution la plus probable. En connaissant les coordonnées et l'orientation du point précédent et en ajoutant les informations du GNSS et de la centrale inertielle, on pourra prédire, calculer puis contrôler avec la position du point suivant et ainsi de suite. Comme vu précédemment, dans la présentation des différents composants du Backpack, la centrale inertielle à une fréquence de 200Hz ce qui permet de calculer les positions intermédiaires entre les prises de mesure du GNSS qui lui à une fréquence de 1Hz. L'IMU définit également l'orientation (Heading, Roll et Pitch) en tous points de la trajectoire. Les prédictions fournies par l'IMU permettent de valider les coordonnées obtenues par le GNSS, et d'écarter les résultats du calcul GNSS potentiellement erronés. L'IMU contrairement au GNSS n'est pas impactée par les masques GNSS, c'est pourquoi le calcul de la trajectoire se fait uniquement à l'aide de la centrale inertielle sur le principe Reverse/Forward.

Suite au calcul de la trajectoire, **la génération des nuages de points** de chaque walk peut être effectuée. Ce n'est pas parce que l'on obtient un nuage de points qu'il est forcément juste. C'est pourquoi il faut ajuster les walks les uns avec les autres, pour compenser les erreurs d'ajustement. Grâce au logiciel Pegasus Manager il est possible de déformer des portions de walk sans toucher au reste du nuage de points. Cette opération ne peut être réalisée que sur du mobile mapping.

Aujourd'hui nous connaissons trois méthodes pour recalibrer les walks, un ordre précis est à suivre pour éviter de trop déformer le nuage de points et réussir à tendre vers le résultat souhaité. En effet, les walks sont recalculés en prenant en compte l'ajustement précédent.

Ajustement sur les points de référence (GCP) :

Chaque walk est accroché à un maximum de GCP.

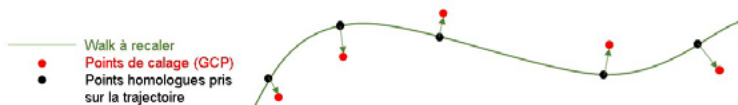


Fig. 3 : Illustration d'un recalage à l'aide de GCP

Ajustement avec point de contrôle virtuel (VGCP) :

Si sur une zone commune entre deux walks des écarts persistent après l'ajustement GCP, et que l'un des deux peut être considéré comme plus fiable (selon le signal d'origine et la densité de GCP déjà accrochés ...), il faut alors caler le second walk sur celui considéré comme référence.



Fig. 4 : Illustration d'un recalage à l'aide de VGCP

Méthode par Tie point :

Si dans le cas précédent, aucun des walks ne peut être considéré comme meilleur, il est possible de déplacer les walks l'un vers l'autre pour les ajuster sur leur moyenne.

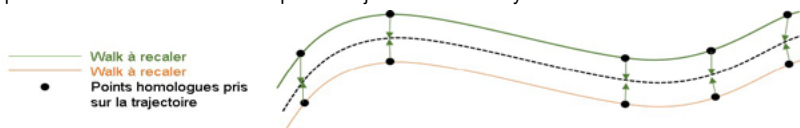


Fig. 5 : Illustration d'un recalage par la méthode des tie points

Maintenant que la consolidation de tous les walks est terminée, il ne reste plus qu'à exploiter ces données lidar. Lors de la **digitalisation** le cabinet Géodis Géomètres-Experts utilise quasi exclusivement le Backpack pour livrer des plans de corps de rue simplifiés, jamais le nuage de points 3D ne sera livré avec le plan. Il utilise uniquement la passerelle que propose Leica Pegasus Manager vers Autocad. Il est donc possible de dessiner en direct sur Autocad en sélectionnant les points d'intérêt sur le nuage de points.

4. Analyse et étude du Backpack

Dans un premier temps, des estimations de la densité du nuage de points ont été réalisées en se basant uniquement sur les données constructeur. Un tableur Excel a été dressé pour quantifier la densité du nuage de points en tenant compte de la vitesse de déplacement de l'utilisateur mais aussi de la distance moyenne objet-appareil.

		Vitesse							
		1km/h	3km/h	5km/h	10km/h	15km/h	20km/h	25km/h	50km/h
Portées	1,6m	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8
	5m	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,9	2,3
	10m	0,8	1,3	1,6	2,3	2,7	3,0	3,5	4,3
	15m	1,2	2,0	2,5	3,5	4,2	4,7	5,4	6,6
	20m	1,4	2,3	2,9	4,1	4,8	5,4	6,2	7,7
	40m	2,2	3,8	4,9	6,9	8,2	9,2	10,6	13,0
	45m	3,3	5,7	7,5	10,5	12,5	13,9	16,1	19,7
	50m	3,4	6,0	7,8	11,0	13,0	14,5	16,7	20,5
	60m	3,8	6,5	8,5	12,0	14,2	15,9	18,3	22,4
	70m	4,0	6,9	8,9	12,6	14,9	16,7	19,3	23,7
	80m	4,3	7,3	9,5	13,4	15,8	17,7	20,5	25,1
100m	4,9	8,4	10,9	15,5	18,3	20,4	23,6	28,9	

Fig. 6 : Extrait du tableur Excel

Dans un second temps, des acquisitions ont été menées en conditions réelles pour voir directement dans quelles circonstances le nuage de points final est le plus facile d'interprétation pour le dessinateur. Nous pouvons retenir que lorsque la zone d'étude n'est pas très large (inférieure à 20m) il est préférable de ne faire qu'un seul walk. Les temps passés sur le terrain et en post-traitement sont réduits, la phase de consolidation est supprimée, ce qui évite la création de doubles peaux.

5. Conclusion et perspectives

Aujourd'hui le monde de la topographie ne cesse d'évoluer, en proposant chaque année de nouveaux produits toujours plus performants les uns que les autres. Pour obtenir des outils encore plus sophistiqués nous en venons même à rassembler plusieurs technologies en un seul produit pour le rendre plus compact et encore plus polyvalent mais la marge d'évolution est encore grande. Le Leica Pegasus Backpack en est un excellent exemple. Cependant, le développement de ces technologies est plus rapide que le temps consacré par chacun pour étudier ces appareils. Ce projet m'a permis de dresser une liste d'informations utiles pour les utilisateurs. Nous pourrions également retenir le tableur Excel qui laissera une trace écrite dans le temps. Il répond parfaitement à l'objectif principal de ce PFE qui est de guider les utilisateurs dans leurs choix. Parce qu'il connaît l'environnement et les attentes du clients, l'utilisateur pourra définir la vitesse limite à ne pas dépasser mais aussi la vitesse de déplacement optimale pour allier rapidité d'exécution sur le terrain et précision des données.



Mise en place d'une modélisation de l'état des lieux contextuel dans un processus CIM pour faciliter une exploitation architecturale et technique des éléments

PFE présenté par : **Marie Pasquet**
Société d'accueil : **ACTI-géo**
Directeur de PFE : **Laurent Tassel**
Correcteur : **Emmanuel Alby**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Nos territoires vont subir de profondes modifications, nous obligeant à reconsidérer notre manière de vivre, notamment dans les villes qui seront les premières à subir une augmentation massive de la population. D'ici la fin du siècle, les scientifiques prévoient aussi une augmentation de la température moyenne annuelle de 1°C à 4°C.

C'est pourquoi en 2017, la ville de Paris a lancé une stratégie de résilience pour faire face aux bouleversements climatiques. Le projet OASIS (*Ouverture, Adaptation, Sensibilisation, Innovation, Solidarité*) conçoit le réaménagement des cours d'écoles encore principalement asphaltées et imperméables, qui participent aujourd'hui massivement à l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Dans la capitale, ces cours d'écoles représentent plus de 600 hectares de surface et sont réparties de manière homogène sur l'ensemble de la ville. Ce projet, a pour but de rénover ces espaces et de les rendre plus naturels en densifiant la végétation, en améliorant la gestion de l'eau de pluie et des points d'eau tout en proposant des aménagements ludiques et adaptés aux besoins des enfants. Pensées comme de véritables îlots de fraîcheur au cœur des quartiers, certaines cours accueilleraient également un public plus large en dehors du temps éducatif. Ouvertes au public le week-end, elles participeraient à des espaces de convivialité, rafraîchissants et accessibles à tous et formeraient de véritables « refuges » pour les personnes vulnérables durant les vagues de chaleur.

Fortement inspiré par ce concept, l'appel à projet de recherche *PÆNDORA 2 (Pour IA gEstion du confort estival : Données, Outils et Recherche-Action 2)* de l'ADEME - PACT²e 2021 dans le cadre « Planifier et Aménager, face au Changement climatique, la Transition des Territoires », a pour objectif principal de mettre à disposition des informations urbaines et climatiques pour guider l'action des collectivités territoriales dans le cadre de la gestion du confort estival et de la surchauffe urbaine. Les axes de recherches du projet portent principalement sur : le rafraîchissement de la ville de manière pérenne avec des solutions adaptées et la conception de formes urbaines durables notamment plus ciblées et proches des enjeux du territoire toulousain.



Fig 1 : Logo du projet PÆNDORA 2

En effet, *Toulouse Métropole* a choisi de participer à ce projet sur une période de 3 ans qui a débuté en janvier 2022 pour étudier principalement le diagnostic et la priorisation d'actions de verdissement et de désimperméabilisation des cours d'écoles et autour des écoles.

Aujourd'hui, on recense plus de 200 écoles primaires en métropole toulousaine dont certaines ont été sélectionnées pour participer à ce projet. Les abords de l'école primaire du quartier des Amidonniers ont donc été retenus pour cette expérimentation.



Toulouse Métropole est également partie prenante d'un autre projet lancé par le Lab'2051 concernant la mise en place de maquettes numériques CIM (*City Information Modeling*) pour divers projets urbains. Il a donc semblé intéressant de créer un PoC (*Proof of Concept*) d'une maquette CIM à la fois comme support visuel de la zone, comme base de données et d'aide à la décision au projet PAENDORA 2. Cette maquette sera conçue avec le logiciel de modélisation 3D collaboratif REVIT.

Ce projet de fin d'étude (PFE) présente dans un premier temps l'acquisition, le traitement et la préparation des données nécessaires au montage de la maquette, puis dans un second temps, la modélisation des éléments attendus pour l'étude PAENDORA 2 et le rendu final de la maquette CIM.

2. Acquisition, traitement et préparation des données

Le repérage en amont sur site a permis de faire un inventaire des éléments à relever, répondant au cahier des charges établis par Toulouse Métropole et les acteurs du projet PAENDORA 2. A terme, la maquette CIM sera composée des catégories d'éléments suivants : Environnement (modèle numérique de terrain, limites de propriétés, façades du bâtiment) ; VRD (principaux réseaux sous le domaine public à proximité de la zone) ; Paysage (végétation, aménagement de voiries) et Urbanisme (mobilier urbain et équipements publics).

Pour ce faire, une phase d'acquisition a été réalisée selon deux techniques différentes : la tachéométrie et la lasergrammétrie statique.

La tachéométrie a permis de relever globalement la totalité des éléments hors bâtiment de la zone sans grande difficulté. Cette technique reste néanmoins assez chronophage en temps et demande une grande concentration. Elle n'a pas permis d'accéder au relevé de tous les éléments notamment en raison d'une forte circulation automobile à proximité de la zone d'étude. C'est pourquoi, le relevé lasergrammétrique a permis de combler ce manque d'informations mais également de relever en détail les façades du bâtiment et de reconstituer la troisième dimension des éléments à faire figurer dans la maquette afin qu'elle soit la plus réaliste possible à partir d'un nuage de points.

Pour le montage de la maquette CIM, plusieurs sources de données étaient nécessaires, certaines déjà disponibles, d'autres à acquérir :

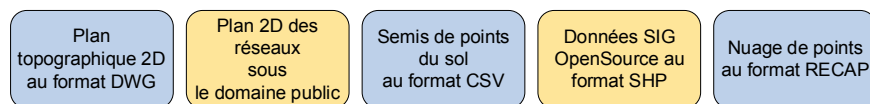


Fig 2 : Jeu de données disponibles (jaune) et à acquérir (bleu)

3. Modélisation 3D et rendu de la maquette numérique

La maquette CIM a été élaborée progressivement sur REVIT selon un ordre logique. Tout d'abord, le plan topographique 2D a servi de base au montage de la maquette et à la géoréférencer.

Le modèle numérique de terrain (MNT), représentation 2.5D de la surface du terrain qui décrit uniquement les points du « sol » et ne prend pas en compte les points dits de « sur-sol », a permis de représenter le relief de la zone d'étude. Construit sous forme d'un réseau de triangles (TIN), il prend la forme d'une surface maillée à partir d'un semis de points irréguliers. Les points reliés les uns aux autres formant alors une triangulation basée sur la méthode de Delaunay.



Fig 3 : Modèle Numérique de Terrain brut de la zone d'étude

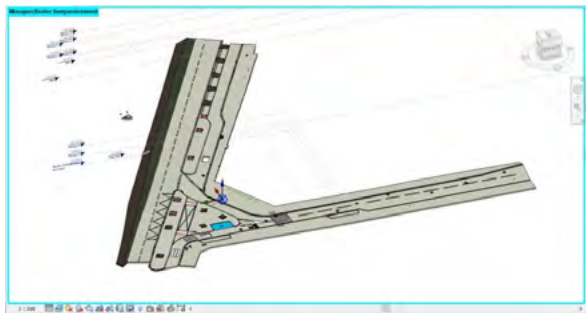


Fig 4 : Les différentes natures de sols

Plusieurs sols ont été modélisés et « plaqués » via un script *Dynamo* sur le MNT brut pour différencier les différentes natures de sols (route, herbe, terre, trottoir, etc.) et ainsi créer un MNT sémantique pour les études ultérieures du projet.

Pour obtenir un maillage plus esthétique, une phase de lissage a été réalisée pour éliminer les « pics » de triangulation grossiers.

La modélisation des façades du bâtiment a été réalisée à partir du nuage de points. Un inventaire des matériaux qui les composent a été également effectué (briques, béton, tuiles en terre cuite).

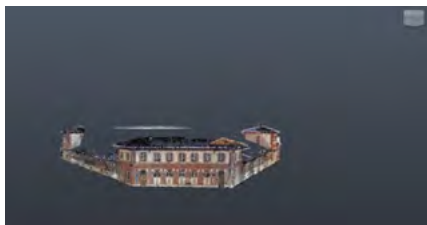


Fig 5 : Modélisation des façades du bâtiment de l'école des Amidonniers

La modélisation du site définit l'intégration des éléments qui constituent les extérieurs de la zone d'étude. Il s'agit des éléments de mobilier urbain (potelets et barrière de sécurité, arceau de vélo), d'équipements publics (poubelle, banc, arrêt de bus), la végétation, la VRD (les réseaux sous le domaine public, les systèmes d'évacuation), les aménagements de voiries (lampadaire d'éclairage, place de parking, feu de signalisation, signalisation au sol) et les limites de propriétés. Cette modélisation donne une attention particulière à la végétation. En effet, celle-ci a été complétée par un diagnostic phytosanitaire définissant l'état de santé actuel des arbres aux abords de l'école et permettant d'anticiper d'éventuels conflits entre les systèmes racinaires et les réseaux souterrains lors de futures plantations.

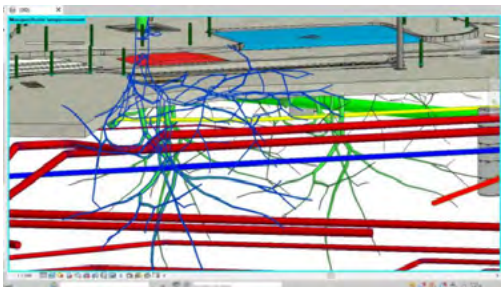


Fig 6 : Conflit entre système racinaire et réseaux sous le domaine public

Les membres du projet *PAENDORA 2* envisagent de placer des capteurs IoT aux abords des écoles (température, humidité, ensoleillement, vents) pour recueillir des données statistiques pour leur étude. Dans ce PFE, nous avons mis en place un serveur Web qui simule les données de capteurs IoT virtuels situé à proximité de la zone. Via un script *Dynamo*, la maquette numérique est capable de récupérer ces mesures et de les afficher. Cette dernière peut donc être ainsi mise à jour automatiquement en temps réel.



Une fois la maquette finalisée, elle peut être exportée sous différents formats pour être exploitée par les différents utilisateurs du projet *PAENDORA 2*. Par exemple, le format standard d'échange IFC est celui le plus utilisé sur le marché puisqu'il permet de lire la maquette par tous à partir de viewers OpenSource. Pour plus de réalisme, la maquette peut aussi être intégrée dans un environnement photo-réaliste du logiciel *Lumion*.



Fig 7 : Export de la maquette dans un viewer (format IFC) et dans un logiciel photo-réaliste Lumion (format COL-LADA)

4. Conclusion et perspectives

Cette maquette CIM permettra aux membres du projet *PAENDORA 2* dans un premier temps d'avoir un aperçu de la zone d'étude dans son contexte réel, de disposer d'informations de traçabilité de matériaux sur des éléments particuliers tels que les sols, les façades du bâtiment, de connaître le positionnement de tous les éléments figurant dans le périmètre, d'un diagnostic phytosanitaire des arbres recensés afin d'étudier les causes des effets d'îlots de chaleurs urbains des abords de l'école primaire des Amidonniers pour prévoir dans un second temps un futur réaménagement selon les méthodes OASIS.

Ce projet a permis de montrer les nombreuses applications possibles en termes de modélisation 3D sur un seul logiciel en l'occurrence *REVIT*. Les nombreux tests effectués ont permis d'obtenir des résultats très encourageants.

Le recours au CIM semble avoir un réel intérêt puisqu'il permet de valoriser les informations du territoire, toujours plus nombreuses et invite à développer des outils numériques permettant de structurer ces informations et de les exploiter utilement.

Au travers de ce PoC, il a été montré que le logiciel *REVIT* est un bon candidat pour ce type d'outil numérique. Destiné au départ à des modélisations du bâtiment, il doit cependant améliorer ses outils existants ou en créer de nouveaux afin de rendre plus simple la modélisation des maquettes urbaines.

Les méthodes de modélisation peuvent être amenées à évoluer. Notamment en ce qui concerne la végétation, si des études plus poussées sont demandées. L'utilisation d'algorithmes par exemple qui, à partir d'un nuage de points de l'arbre, peuvent reconstruire son enveloppe, son tronc et faire des simulations de son emprise racinaire peut être envisagée. De même, pour l'exploitation de la maquette, une plateforme collaborative hébergée sur le *Cloud* peut être proposée. Les utilisateurs pourront y accéder via des smartphones ou tablettes connectés à Internet.

Pour la suite de ce PFE, l'idée est d'industrialiser une maquette simplifiée (géoréférencée, MNT, limite de propriété, emprise bâtis, regard des réseaux, etc.) à destination des cabinets d'architectes. Préférable à un plan 2D traditionnel, souvent difficile à interpréter par ces professionnels, cette maquette permettrait d'intégrer directement leur projet architectural et de le modifier au besoin.

Mise en place d'une maquette BIM pour la gestion des terres polluées dans le cadre d'un chantier de terrassement

PFE présenté par : **Nicolas KRIES**
Société d'accueil : **Spie Batignolles Valérien**
Directeur de PFE : **Dominique OGER**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**
Encadrant : **Julien AKBAS**



1. Introduction et contexte de l'étude

Valérien est une société qui a été intégrée dans le groupe Spie Batignolles devenant ainsi Spie Batignolles Valérien (SBV). Le groupe est composé d'environ 8 000 collaborateurs, il fut fondé en 1846 et a développé ses activités dans les travaux publics, la construction, l'énergie, l'immobilier.

La ligne EOLE (Est-Ouest Liaison Express) est un projet du Réseau Express Régional d'Île-de-France qui a pour but de relier l'Est et l'Ouest franciliens via la gare souterraine Haussmann-Saint-Lazare. Le projet est divisé en deux phases. La première qui consiste à mettre en œuvre la ligne Est et la seconde qui correspond à son prolongement vers l'Ouest.

La seconde phase du chantier a déjà commencé. Afin d'assurer la réparation et la maintenance des rames de la ligne EOLE deuxième génération, il est prévu de construire un technicentre avec un ensemble d'infrastructures sur un site ferroviaire situé à proximité de la gare de Mantes-la-Jolie.

Le terrain du chantier étant un ancien site industriel, il faut donc prendre en compte que le sol est pollué. On retrouve différents types de pollution : ISDD (K1 pour SBV), ISDND (K2 Valo), ISDI (K3) et ISDI+ (K3+). On trouve également du mâchefer dans le sol. C'est un résidu de combustion du charbon ou des déchets ménagers dans les unités d'incinération de déchets non dangereux. Les terres polluées sont soumises à des réglementations pour être réemployées ou évacuées. C'est dans ce cadre que l'entreprise Spie Batignolles Valérien a mis en place la création d'une maquette.

Pour réaliser ce terrassement, on effectue des reconnaissances géotechniques et géochimiques (sondages) pour classer les types de sols ainsi que les types de pollutions. Cette campagne de sondages se représente à l'aide d'un maillage 20m x 20m qui peut être réduit à un maillage 10m x 10m à la demande du Maître d'Œuvre si les taux de pollutions sont trop élevés.

2. Objectifs de l'étude

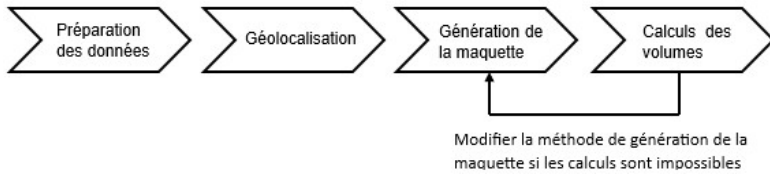
La méthode de création de la maquette qu'utilise Spie Batignolles aujourd'hui est chronophage et très manuelle. Certaines des étapes de la création de la maquette présentent de forts risques d'erreurs notamment de la saisie de coordonnées.

L'objectif de l'étude est donc la mise au point d'une méthode de création de la maquette plus simple, plus rapide et comportant moins de risques d'erreurs. Il faudra également tester le calcul de volume de déblais et remblais par type de pollutions lors du terrassement.

3. Solution proposée

Pour atteindre cet objectif, nous proposons une méthode composée de 4 étapes.





La méthode principale utilisée lors de cette étude est basée sur une étude précédente réalisée par un consultant de Spie Batignolles. Nous allons donc générer la maquette grâce au logiciel Revit et plus particulièrement au Script Dynamo intégré à Revit.

4. Préparation des données

Pour créer la maquette, il faut préparer les données dont nous disposons pour pouvoir les utiliser efficacement. Nous disposons de plusieurs types de données qu'il faudra mettre en forme avant d'être utilisés.

La préparation du fichier Excel se fait en récupérant les données du laboratoire pour les transformer dans le format souhaité : Maille – Niveau NGF – Filière. Sur la figure 1, nous trouvons les données dont nous disposons qui sont composées du nom de la maille, du niveau NGF du Terrain Naturel et des profondeurs hautes et basses des différents échantillons prélevés dans le sondage ainsi que les types de pollutions correspondants aux échantillons.

Nom_Son	TN	Fh1	Fb1	Fh2	Fb2	Fh3	Fb3	Fh4	Fb4	Fh5	Fb5	Fh6	Fb6
0.35	32,48	0,3	0,5	0,5	1,5	1,5	2,5	3,5	3,5	9,5	4,5	4,5	5,7
Anal1	Anal2	Anal3	Anal4	Anal5	Anal6								
K3 sans mâchefer	K3 sans mâchefer	K3 sans mâchefer	K3 sans mâchefer	K3 sans mâchefer	K3 sans mâchefer								

Figure 1 : Exemple de données brutes du fichier Excel

A la suite de plusieurs opérations, nous obtenons un fichier Excel dans le format requis. Ce fichier contiendra donc toutes les informations sur les différentes couches de toutes les mailles (voir figure 2).

Maille	Niveau NGF	Filière
MAILLAGE_A26	33,1-32	K3 sans mâchefer
MAILLAGE_A26	32-31	K3 sans mâchefer
MAILLAGE_A27	32,8-32	K3 sans mâchefer
MAILLAGE_A27	32-31	K3+ sans mâchefer
MAILLAGE_A28	33,9-33,2	K3 sans mâchefer

Figure 2 : Extrait du fichier Excel préparé

Pour préparer le fichier DWG, il faudra créer un calque pour chaque maille. Après avoir attribué un calque à chaque maille, il faut supprimer les mailles qui ne sont pas présentes dans le fichier Excel et purger le fichier pour ne pas avoir de calque inutile (voir figure 3). Il faudra également faire attention à fermer toutes les polygones qui composent les mailles.



Figure 3 : Fichier DWG et extrait de la liste des calques uniques.

4. Géolocalisation

Maintenant que les données sont prêtes, il faut géolocaliser le fichier DWG dans Revit pour réaliser la maquette. Pour cela, on dessine un bloc (voir figure 4) à un emplacement défini, que l'on extrait du dessin lors de l'enregistrement. Sur Revit, on peut insérer le bloc avec l'outil Lier CAO et en déplaçant le bloc sur le point de base du projet. Il faut ensuite importer les coordonnées utilisées dans le fichier DWG. On peut maintenant insérer le fichier DWG en veillant à utiliser le positionnement à l'emplacement partagé.



Figure 4 : Géolocalisation sur Revit

5. Génération de la maquette

L'étude effectuée par le consultant de Spie Batignolles n'est plus utilisable en l'état à la suite des différentes mises à jour de l'application Dynamo et du logiciel Revit. Cependant, il est possible d'utiliser une partie de cette étude pour concevoir une nouvelle version du programme Dynamo (voir figure 5).

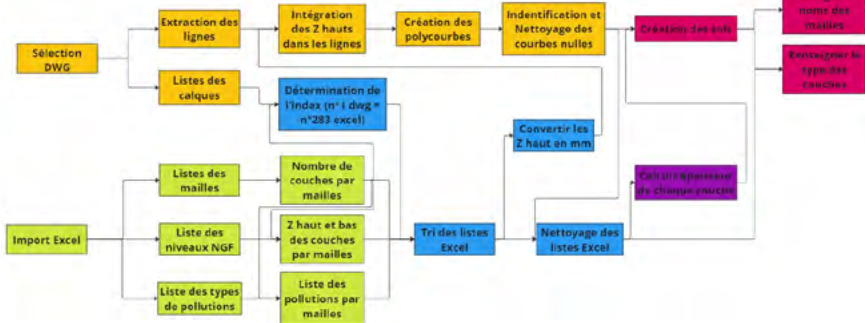


Figure 5 : Schéma de conception du programme Dynamo

Les étapes qui m'ont le plus posé de problèmes sont le « Tri des listes Excel » qui dépend de la « Détermination de l'index » et « L'intégration des Z hauts dans les lignes » car la moindre erreur se répercute dans tout le programme et provoque des erreurs lors de la génération de la maquette.

L'intégration des valeurs de Z dans les lignes extraites du fichier DWG a été la plus complexe. En effet, c'est cette étape qui a été la plus source d'erreurs dans le programme. La réalisation de cette étape à l'aide des nœuds Dynamo étant trop complexe, la solution a été d'écrire un script python (voir figure 6).

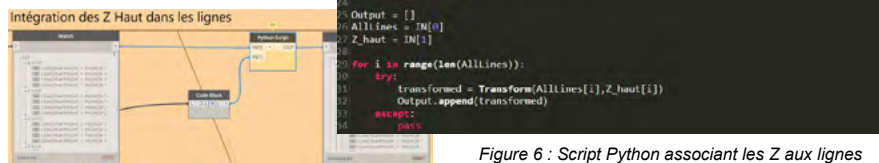


Figure 6 : Script Python associant les Z aux lignes du .dwg et nœuds du programme Dynamo

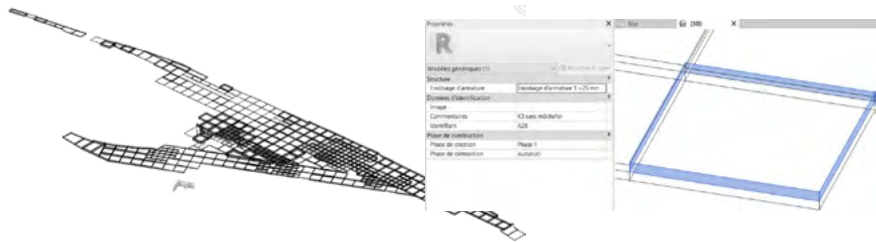


Figure 7 : Maquette réalisée sur Revit

6. Calculs des volumes

Une fois la maquette créée, on peut tester des calculs de volumes pour déterminer les volumes de déblais et remblais par type de pollution pour différentes étapes de terrassement. Si les tests ne sont pas concluants, on peut penser à modifier le type de sols « Création des sols » créés dans la maquette.

Nous avons pensé à une autre méthode permettant de calculer des volumes de terrassement. C'est une méthode de photogrammétrie aérienne à l'aide d'un drone DJI Mini 2. Une étude nous a permis de déterminer les meilleures positions des GCP pour optimiser la précision de notre levé. Une autre étude nous a permis de déterminer l'altitude de vol à utiliser lors des tests (voir figure 8). L'entreprise ne possédant pas de logiciel de traitement photogrammétrique, il a été décidé de sous-traiter le traitement des images à l'entreprise RezoProcess.

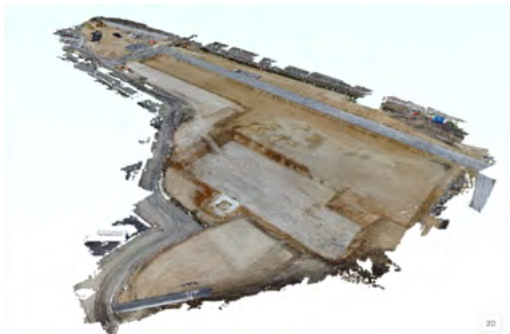


Figure 8 : Orthophotographie de levé aérien par drone

Cependant, cette méthode ne permet pas de calculer directement les volumes par types de pollutions. L'outil de calcul de volume de terrassement ou de stock étant en cours d'amélioration, le levé par drone servira comme outils d'appréciation d'avancement des travaux dans la démarche BIM à l'aide de BIMSync (voir figure 9).



Figure 9 : Utilisation alternative de l'orthophotographie dans la démarche BIM

7. Conclusions et perspectives

La première méthode de traitement de la maquette fonctionne, il faudra tester s'il est possible de faire des calculs de volumes par types de pollutions. Si ces calculs n'aboutissent pas, on pourra tester de générer la maquette sur Autodesk Civil 3D. En effet, Civil 3D possède également l'application Dynamo. Il faudra évaluer la précision de l'orthophotographie pour s'assurer des paramètres sélectionnés lors du test. Il faudra également rédiger des protocoles pour effectuer les levés aériens ainsi que les levés GPS.

Numérisation dynamique type *backpack* appliquée au levé de grande ampleur

PFE présenté par : **Augustin CHUILON**
Société d'accueil : **NOVATLAS**
Directeur de PFE : **Fabien NEYENS**
Correctrice : **Hélène MACHER**



1 Contexte et objectifs

1.1 Contexte de l'étude

Ces dernières années, l'entreprise NOVATLAS a développé de manière conséquente son pôle Acquisitions 3D comportant tous les travaux de photogrammétrie et lasergrammétrie. Récemment, à la suite des demandes des clients pour des relevés de grande ampleur, les relevés avec scanners statiques et drones ne suffisaient plus. En 2021, le scanner dynamique BMS 3D de l'entreprise Viametris a été acquis. Plusieurs chantiers ont pu ainsi être réalisés, comme la numérisation du tram de Liège, de la zone du projet d'extension du tram à Marseille ou d'une avenue de Neuilly.

Puis, en début 2023, un programme partenaire a été mis en place avec l'entreprise Viametris. Il consiste en l'acquisition du dernier modèle de Viametris (MS-96) avant l'ouverture du modèle à la vente. En échange, des comptes-rendus sont effectués régulièrement au gré des chantiers par les utilisateurs au sujet des problèmes rencontrés sur le terrain et lors des traitements ainsi qu'au sujet de pistes d'améliorations envisageables et souhaitables.

Le bond en avant technologique entre les deux modèles explique l'acquisition par l'entreprise de ce deuxième scanner dynamique : en effet, le MS-96 a des composants de meilleure qualité comme la centrale inertielle comportant une dérive plus faible, les capteurs Lidar produisant un nuage moins bruité. En plus de cela, la capacité de ce dernier modèle à fonctionner, arrimé à un véhicule, ainsi que son poids réduit, font de cet appareil, un outil indispensable au développement de la lasergrammétrie dans l'entreprise.

1.2 Objectifs de l'étude

Le but de ce PFE est donc de participer au développement du pôle Acquisitions 3D, en étudiant les divers champs d'actions de ces nouvelles méthodes de relevés 3D à grande échelle, ainsi que les problèmes qui pourraient se poser : méthodes de géoréférencement, précision du levé, stockage, partage et exploitation des données, réalisation de livrables type plan 2D ou modélisation...

Pour cela un état de l'art et une recherche bibliographique sont effectués pour évaluer les méthodes et solutions actuelles concernant l'utilisation de scanners dynamiques.

Parallèlement à cela, nous évaluons et analysons le MS-96 sur deux chantiers : en intérieur pour le relevé d'un immeuble de 18 000 m² en mode « *backpack* », et en extérieur pour le relevé d'un tronçon de voie rapide avec le système installé sur un fourgon.

Par la suite nous comparons ce système en environnement intérieur à la version précédente, le BMS 3D de l'entreprise Viametris, ainsi qu'au système concurrent direct, le VLX 2 de l'entreprise Navvis dont une présentation et un test ont été effectués par un commercial.

Enfin, en vue d'améliorer l'utilisation du scanner dynamique MS-96 au sein de l'entreprise, un protocole d'utilisation de cet appareil et du traitement des données acquises par celui-ci sera dressé, ainsi qu'un document d'aide à la décision d'utilisation de ce scanner.



2 Etude du scanner dynamique MS-96

2.1 Tests sur les chantiers

Le MS-96 a, selon le constructeur, une précision de la mesure LIDAR de 5mm à 1 σ soit 15mm à 3 σ (99.7 % des points).

Deux chantiers seront présentés, représentant les principales configurations d'utilisation possibles du MS-96 : un immeuble, en rénovation, et un tronçon de route nationale.

- Le premier chantier consiste en un immeuble composé de 5 bâtiments curés, ayant une superficie de 18 000 m².

Nous nous attardons plus précisément sur le parking souterrain d'un des bâtiments. Il mesure 40 x 46 m et a une hauteur sous plafond de 2.3 m. Le parking a été relevé au scanner statique RTC 360 de

Scanner	Cotes mesurées (m)					Moyenne
	A	B	C	D	E	
RTC 360	29.126	24.384	58.198	24.517	36.451	
MS-96	29.123	24.388	58.177	24.504	36.433	
Ecart abs	0.003	0.004	0.021	0.013	0.018	0.012
Erreur (%)	0.010	0.016	0.036	0.053	0.049	0.03

Figure 1 : Tableau de comparaison des mesures effectuées sur les deux nuages

Tout d'abord, pour évaluer la précision en relatif du nuage du MS-96 par rapport au nuage du RTC 360, cinq cotes (voir Figure 1) ont été prises dans chacun des deux nuages.

Sur le logiciel CloudCompare, la distance entre les nuages a été calculée avec l'outil de Calcul de la distance nuage-nuage dans le but de déterminer l'exactitude du levé au MS-96 par rapport au levé du RTC 360.

Nous pouvons constater à partir de ce tableau (Figure 2) que la moyenne des écarts est d'1.2 cm pour les 5 cotes mesurées et 1.5 cm pour la totalité du nuage. 68 % des écarts sont inférieurs à 1.6 cm ; comparé aux 0.5 cm de précision du capteur LiDAR, cela s'explique par l'ajout de l'imprécision du calcul de trajectoire et du recalage manuel sur les damiers.

Intervalle	Nb de points	Dist entre nuages (cm)	Pourcentage
1	49054670	[0 ; 1]	43.2
2	37558081	[1 ; 2]	33.1
3	17726400	[2 ; 3]	15.6
4	6191771	[3 ; 4]	5.5
5	1333671	[4 ; 5]	1.2
6	1623222	[5 ; +∞]	1.4
Total	113487815	Dist moyenne	1.5 cm

Figure 2 : Tableau de comparaison des nuages

- Le deuxième chantier consiste en un tronçon de route nationale dans le cadre du projet de classement en autoroute de ce tronçon.

Ce tronçon a été relevé avec le MS-96 installé sur un véhicule. Nous avons effectué un aller-retour en passant une fois dans chaque sens de circulation. Le géoréférencement des données et le calcul de trajectoire ont été effectués avec le couplage des données de la centrale inertielle et celles de l'antenne GNSS intégrée. Après une première acquisition, le résultat ne fut pas satisfaisant : l'erreur de trajectoire étant trop importante, les points acquis durant l'« aller » et le « retour » avaient un décalage bien trop important entre eux. La cause est due à une distance trop importante de la station du Réseau GNSS Permanent (RGP) la plus proche, ainsi qu'à des conditions ionosphériques défavorables. Dans l'optique d'une amélioration, ne pouvant pas jouer sur la centrale inertielle, il reste les données GNSS. Pour améliorer la correction GNSS, nous avons mis, lors d'une deuxième acquisition, en place une antenne GNSS en guise de pivot au centre de l'étendue de la zone à relever. Les résultats tirés de cette deuxième acquisition sont bien meilleurs : Comme nous pouvons le voir dans le tableau des erreurs (Figure 3), l'erreur

moyenne est réduite de près de moitié, seulement en ajoutant les corrections d'une antenne pivot installée par nos soins.

	Moyenne		Ecart-Type		Emq		Valeur Max	
	Hz	V	Hz	V	Hz	V	Hz	V
Sans pivot (cm)	2.7	3.6	1.0	0.7	2.8	3.7	8.2	6.4
Avec Pivot (cm)	1.3	2.1	0.2	0.3	1.3	2.1	2.5	2.8
% de réduction	52	42	79	56	54	43	69	56

Figure 3 : Tableau des erreurs de positions sans et avec prise en compte du pivot

2.2 Comparaison du MS-96 aux scanners dynamiques à disposition

Le MS-96, contrairement au BMS 3D, a la capacité d'être utilisé sur un véhicule. Le MS-96 étant l'évolution technologique du BMS3D, les composants de ce dernier sont moins performants et son poids doublé.

Ces deux scanners ont le même mode de fonctionnement et les nuages de points produits sont géoréférencés de la même manière : des damiers sont peints avec des pochoirs ou fixés au sol ; ceux-ci sont géoréférencés au moyen d'une station totale. Puis la zone du lever est numérisée avec le scanner dynamique. Ensuite, au bureau, après avoir calculé la trajectoire et corrigé le nuage de points en relatif, les damiers sont sélectionnés dans le nuage de points pour qu'ils servent de GCP.

Un troisième scanner dynamique, le VLX 2 de Navvis a été testé lors d'une présentation du produit par un commercial. Il a été pris en compte lors des tests, étant un produit très abouti et concurrent au MS-96. Contrairement aux deux précédents, ce scanner ne comporte pas d'antenne GNSS. Son utilisation en extérieur doit donc être limitée à des zones proches de bâtiments, éléments lui permettant d'utiliser la méthode du SLAM pour définir la trajectoire. Hors de ces zones, l'absence de données GNSS rendrait compliqué le positionnement du système au cours du lever. La méthode de géoréférencement de ce scanner est la suivante : tout au long du lever, des points connus en coordonnées peuvent être pointés par l'opérateur en positionnant et enregistrant le scanner sur chacun des points. Cette méthode élimine donc la source d'erreur, existante avec les deux premiers scanners, provenant de la sélection du centre des damiers dans le nuage de points. Enfin, bien que les résultats soient performants, l'opérateur a très peu la main sur les étapes de traitement, étant donné que ceux-ci sont effectués à distance sur un serveur ; cela donne un effet « boîte noire » aux traitements.



Figure 4 : BMS 3D (geo-matching.com), MS-96 en mode piéton et véhicule (Novatlas) et VLX 2 (bimnd.es)

Pour résumer, voici les principales caractéristiques de ces trois scanners :

Scanner	BMS3D	MS-96	Vlx2
Constructeur	Viametris	Viametris	Navvis
Année de sortie	2018	2023	2021
Distance maximale de mesure	100 m	120 m	100 m
Précision de la mesure	20 mm	5 mm (1 sigma)	6 mm (1 sigma)
Vitesse d'acquisition	600.000 pts/s	960.000 pts/s	600.000 pts/s
Camera	30 Mpx	96 Mpx	80 Mpx
Poids	13.5 kg	5.6 kg	8.7 kg
Prix à titre indicatif	150 000 €	150 000€	80 000€ +abonnement annuel

Figure 5 : Tableau des caractéristiques principales des scanners

Pour effectuer la comparaison de ces trois scanners, nous avons relevé une partie d'un parking souterrain avec chacun des appareils.

Cette zone du parking mesure à peu près 80 mètres sur 40 et comporte sur les piliers, des damiers référencés dans un système de coordonnées locales. Connaissant ces damiers en coordonnées locales, nous pourrions mieux comparer les différents nuages. En plus de l'acquisition de la zone avec chacun des scanners dynamiques, la zone a été relevée avec un scanner statique dont le nuage produit servira de référence aux comparaisons.

- Précision en relatif

Pour évaluer la précision des nuages en relatif, des coupes horizontales et verticales ont été effectuées dans le logiciel Cyclone 3DR, dans lesquelles des cotes ont été prises à un même endroit dans chacun des 4 nuages. Puis nous avons évalué l'erreur de positionnement, c'est-à-dire la différence de cotes entre celles des scanners dynamiques et celle du scanner statique servant de valeur la plus probable. Le pourcentage d'erreur par rapport à la distance en a été déduit. En effectuant la moyenne les résultats, nous arrivons aux résultats affichés dans le tableau ci-côté.

Scanner	Moyenne du % d'erreur
BMS	0.31
MS-96	0.10
V LX 2	0.10

Nous pouvons en déduire qu'en relatif, le BMS 3D produit un nuage 3 fois plus déformé qu'avec les deux autres.

Figure 6 : Moy. du % d'erreur entre cotes tirés du nuage du scanner dynamique par rapport à celui du Z&F 5016

- Bruit et épaisseur de nuage

Pour évaluer le bruit dans le nuage, dans les coupes précédentes, aux endroits à partir et vers lesquels les cotes ont été effectuées, les épaisseurs des différents nuages ont été répertoriées. Ci-dessous, voici les valeurs moyennes (pour chaque case, quatre valeurs ont été utilisées) :

Scanner	Moyenne (mm)	
	à la verticale	à l'horizontal
BMS	12	20
MS-96	7	10
V LX 2	2	5

Figure 7 : épaisseur des nuages

Ces résultats peuvent s'expliquer avec la précision de la mesure annoncée par le constructeur (cf. fig.2). La finesse du nuage du VLX 2 (de 2 et 5 mm) peut provenir d'un filtrage très performant.

- Précision du recalage

Les nuages des scans ont été recalés avec quatre à cinq damiers. A partir des coupes dans les différents nuages, nous pouvons en déduire plusieurs choses :
Le VLX 2 a le meilleur recalage, ses écarts avec le nuage du scanner statique ne dépassant pas le centimètre. Les écarts du MS-96 sont plus prononcés, pouvant ponctuellement aller jusqu'à 3cm, mais globalement restent sous la valeur des 2 cm. Les écarts du BMS 3D vont jusqu'à 7 cm et dépassent souvent les 3 cm.

En résumé, le VLX 2 reste parmi ces trois, le scanner donnant le meilleur résultat, du fait de son erreur relative et son épaisseur de nuage qui s'avèrent négligeables, ainsi que de son erreur de recalage en dessous du cm.

Le BMS 3D produit un nuage peu exploitable du fait de son erreur relative importante et de son écart de recalage trop manifeste.

Le MS-96, quant à lui, a une précision relative et une épaisseur du nuage qui garantissent une donnée exploitable et conforme aux caractéristiques du constructeur dans la mesure où un minimum de points de calage sont pris en compte.

3 Conclusion et perspectives

L'objectif de ce PFE est de développer l'expérience d'utilisation des scanners dynamiques dans l'entreprise. Pour cela des tests ont été effectués avec le MS-96. Deux chantiers de caractéristiques différentes (en extérieur sur un fourgon et en intérieur en mode *backpack*) ont été analysés et ont permis de développer la méthodologie d'utilisation de ce système.

Ensuite, le MS-96 a été comparé en environnement intérieur à sa version précédente, le BMS 3D, ainsi qu'à son concurrent direct, le VLX 2 de Navvis. Parallèlement à cela, la procédure d'utilisation du MS-96, et de traitement des données a été rédigée.

Par la suite, les avis des personnes ayant modélisé à partir du nuage de points du MS-96 seront pris en compte pour donner notre avis final sur le scanner dynamique MS-96.



Agrégation, traitement et exploitation automatisés de données en amont des missions d'ingénierie et de rétro-ingénierie en milieu maritime, portuaire et fluvial



PFE présenté par : **Grégoire Marfaing**
Société d'accueil : **FERRCAD**
Directeur de PFE : **Yvon Kila**
Correcteurs : **Hélène Macher, Mathieu Koehl**
Encadrant : **Yvon Kila**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Aujourd'hui, les données OpenSource font partie d'une grande majorité des projets, que ce soit en amont pour des analyses et de la préparation, ou tout au long des travaux pour certaines données mises à jour quotidiennement et qui participent à l'étude de l'avancée du processus. C'est notamment le cas pour les projets d'infrastructures maritimes, portuaires et fluviales avec la disponibilité grandissante de nombreuses données pertinentes. Ce travail de collecte de la donnée est fastidieux et chronophage puisque d'une part, il n'existe pas de plateforme centralisant toutes ces informations, et ce, quel que soit le fournisseur, et que d'autre part proposer des possibilités d'automatisation de téléchargement n'apparaît pas comme étant une priorité. De plus, ce sont des données qui sont souvent visualisées et traitées séparément puisqu'elles proviennent de différentes sources, alors qu'il est plus avantageux pour l'entreprise est de les compiler. Idéalement, toutes les informations nécessaires seraient ainsi sur une même plateforme. Il serait donc intéressant de développer un moyen d'automatiser ces étapes de l'utilisation des données OpenSource, à savoir leur agrégation, traitement et exploitation. Cela permettrait ainsi un gain de temps et d'énergie précieux ainsi que la suppression de certaines tâches sans valeur ajoutée.

Ce projet est la suite du PRT réalisé par [Grondin, 2022]. Ce dernier a listé les données OpenSource ayant un intérêt pour l'analyse en amont de projets d'ingénierie et de rétro-ingénierie en milieu maritime, portuaire et fluvial. En se basant sur le travail accompli par Laurent GRONDIN, nous allons collecter les différentes données nécessaires aux études de cas auxquelles nous serons confrontés, avant de les traiter et de les exploiter de façon à ce que le livrable final consiste en des visualisations 2D et 3D. Parmi les données à collecter, on retrouve notamment celles liées aux réseaux enterrés et aériens, ou les images satellites ainsi que les données topographiques plus brutes, telles que les relevés bathymétriques ou encore celles issues du LiDAR. Pour automatiser les différentes étapes d'agrégation, traitement et exploitation, il est demandé de développer un plug-in en utilisant le langage de programmation Python. Il sera nommé FerrAPD (pour Agrégation et Partage des Données) et permettra d'automatiser les étapes le plus efficacement et de la manière la plus pertinente possible.

2. Développement du plug-in FerrAPD

2.1. ArcGIS Pro

Nous avons commencé par chercher une plateforme capable de supporter les différents formats des données collectées (.las, .shp, .xml...) et supportant aussi l'utilisation du langage de programmation Python. Notre choix s'est rapidement porté vers un logiciel de SIG puisque nos données seront essentiellement, voire uniquement, des données géographiques. La référence dans



ce domaine est ESRI et en particulier son logiciel ArcGIS Pro. De plus, ESRI a développé il y a quelques années la bibliothèque Python ArcPy, qui contient toutes les fonctions disponibles sur ArcGIS [Toms and O'Beirne, 2017]. Cette combinaison de possibilités a ainsi fait d'ArcGIS Pro le meilleur choix pour développer le plug-in FerrAPD. Un autre avantage du logiciel d'ESRI est aussi qu'il permet d'obtenir des boîtes de dialogue faciles à utiliser et sur lesquelles il est possible d'inclure des explications quant aux données d'entrée et en sortie. L'un des inconvénients, en revanche, est que son environnement Python n'offre pas la possibilité d'utiliser certaines bibliothèques spécifiques (telles que Geopandas) et il faut donc parfois s'adapter et convertir certaines fonctions qui auraient pu nous être utiles.

2.2. Workflow du plug-in

Six mois étant tout de même relativement court pour développer un plug-in, nous nous sommes donc concentrés sur les besoins principaux de l'entreprise dans un premier temps. On retrouve ainsi dans le plug-in (développé sous la forme d'une toolbox) différentes fonctions réparties en groupes.

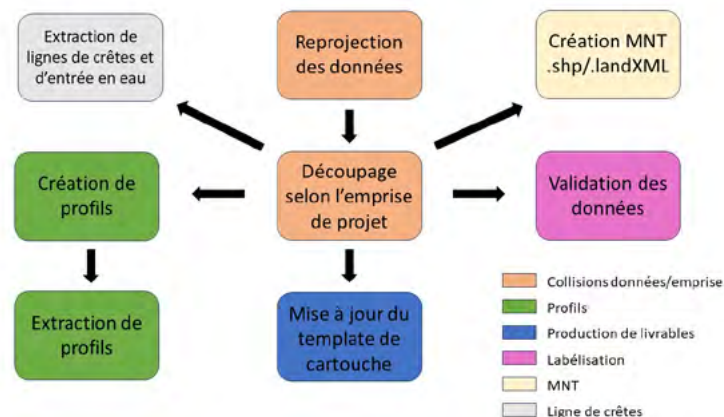


Fig. 1 : Workflow du plug-in FerrAPD avec les différentes fonctions qui le composent

On a ainsi un bloc central constitué du groupe de fonctions « Collisions données/emprise » qui sert en tout premier lieu à avertir l'utilisateur d'une possible intersection entre des données et une zone d'intérêt du projet. Ce besoin est notamment lié à l'importance de connaître la position des réseaux enterrés et aériens, mais aussi celle d'éventuelles zones protégées, avant de débiter un projet d'infrastructures. Les deux fonctions qui composent ce bloc seront les premières à être utilisées une fois les données collectées et compilées dans ArcGIS (en utilisant des fonctions built-in, donc déjà implémentées dans le logiciel). Elles permettront de s'assurer que les données soient dans le bon système de projection. En effet, même si ArcGIS permet de compiler et de visualiser des données de systèmes de coordonnées différents, certaines de ces données seront ensuite extraites vers d'autres logiciels tels qu'Autocad et nécessiteront donc d'être dans le système du projet. Le découpage permet ensuite de supprimer toutes les informations superflues et d'avertir l'utilisateur via un message d'erreur lorsqu'une collision a lieu entre les données et la zone d'intérêt qu'il aura déterminée au préalable.

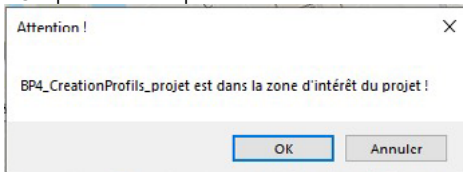


Fig. 2 : Exemple de message d'alerte



Le deuxième bloc composé de plusieurs fonctions est le groupe « Profils », dont les noms de fonctions sont assez explicites : on va d'abord venir créer une entité contenant des polygones perpendiculaires à un axe de cours d'eau avant d'extraire les valeurs d'altitude d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) au format raster au niveau des coordonnées des lignes créées précédemment.

On retrouve ensuite des fonctions seules, mais qui pourraient dans le futur être rejointes pas d'autres fonctionnalités. Les deux opérations les plus importantes sont la création de MNT maillé et l'extraction de lignes de crêtes et d'entrée en eau. Pour le MNT, l'étape de classification des points au sol est notamment incluse dans la fonction. On laisse ensuite la possibilité à l'utilisateur d'obtenir un MNT au format .shp, ou bien .landXML qui est convertible en état de terrain sous Covadis. Le MNT peut donc être ensuite utilisé pour la suite du projet, car l'entreprise réalise une partie de ses modélisations en utilisant ce logiciel. Pour l'extraction des lignes de crêtes et d'entrée en eau, le besoin est lié aux installations des infrastructures proches des berges : les lignes de crêtes représentant l'arase supérieure du talus de la berge, la ligne d'entrée en eau étant l'intersection entre le plan d'eau et le talus de la berge. Ici l'extraction est réalisée via une analyse de fichiers raster successifs.

Finalement, les deux dernières fonctions sont quant à elles liées au livrable. Il faut savoir qu'une grande partie de ces visualisations produites de manière automatisée est destinée à être consultée par des spécialistes du domaine en question. En effet, pour leurs projets, FERRCAD est amené à traiter de grandes quantités de données impactant le lieu où se trouvera l'infrastructure, et notamment des données étrangères à leur corps de métier (les données géotechniques par exemple). Les livrables pourront permettre aux spécialistes de consulter la donnée et de la valider ou non. Cette validation indiquera ainsi si la donnée est viable et utilisable. Pour le cartouche, nous avons créé un template conforme aux besoins de l'entreprise et qui permettra de reconnaître les livrables qui auront été produits en utilisant les différents programmes du plug-in. Grâce à la fonction de mise à jour, il sera possible de modifier facilement les différentes informations présentes sur celui-ci.

2.3. Estimation du nombre d'arbres

Pour le respect de normes écologiques, FERRCAD est aussi amené pour chaque projet d'aménagement à donner une estimation du nombre d'arbres qui seront impactés par la mise en place des projets d'infrastructures maritimes, fluviales ou portuaires. Cette estimation est encore aujourd'hui réalisée par comptage manuel sur des images satellites, d'où l'intérêt d'essayer de trouver des méthodes plus efficaces et si possible automatisées. Après l'essai de plusieurs méthodes peu fructueuses, un algorithme Matlab proposé par [Latella et al., 2021] a fourni des résultats cohérents et apparaissant comme pertinents. Il nécessite en entrée des données issues du LiDAR et classifiées de manière à contenir uniquement les points de végétation. Nous pouvons obtenir des données brutes grâce au programme LiDAR HD de l'IGN qu'on peut classifier grâce au modèle de Deep Learning entraîné proposé par ESRI (à terme les nuages LiDAR seront classifiés directement par l'IGN).

2.4. Exemple sur un cas d'étude

Le projet BP4 est un projet initié par la SNCF pour une pose de palplanches au nord de Toulouse (31), le long du Canal latéral à la Garonne. C'est le projet d'infrastructure sur lequel nous avons le plus travaillé au long de ce PFE, et c'est aussi celui sur lequel nous avons collecté le plus de données différentes.

RÉÉCHANTILLONAGE 0,5M			RÉÉCHANTILLONAGE 0,2M		
Zone	Nb d'arbres	Durée	Zone	Nb d'arbres	Durée
Z1_Est	82	13s	Z1_Est	81	16s
Z2_Est	61	14s	Z2_Est	61	16s
Z3_Est	142	19s	Z3_Est	141	24s
Z41_Est	54	6s	Z41_Est	54	7s
Z42_Est	96	15s	Z42_Est	96	16s
Z5_Est	101	9s	Z5_Est	101	8s
Somme	536		Somme	534	

Fig. 3 : Résultats d'estimation du nombre d'arbres pour deux niveaux de rééchantillonnage

On constate que les résultats d'estimation du nombre d'arbres sont quasiment identiques pour deux niveaux de rééchantillonnage différents, ce qui est assez intéressant puisque cela montre une certaine logique et une cohérence dans les résultats proposés par l'algorithme. Cependant, les résultats fournis par l'entreprise pour comparaison ne prennent en compte que les arbres ayant un diamètre de tronc minimal de 15cm (en l'occurrence 280 mais avec une marge d'erreur de 30%), tandis que l'algorithme prend en compte tous les arbres. Cette limitation pourrait être problématique, mais il serait néanmoins pertinent de réaliser de nouveaux tests sur un autre projet afin d'analyser s'il est possible d'établir un schéma mathématique permettant d'isoler le nombre d'arbres que souhaite annoncer l'entreprise.

Au niveau des livrables, vous pouvez observer ci-contre un exemple de visualisation des données bathymétriques du projet, fournies par la VNF, selon les différentes zones composant l'emprise du projet. On reconnaît le découpage des données selon cette emprise, et on retrouve le cartouche commun aux livrables de FerrAPD.



Fig. 4 : Exemple de livrable

3. Perspectives et conclusion

Durant ce PFE, nous avons pu travailler sur divers projets, en France et à l'international, ce qui nous a permis de nous représenter un peu mieux la difficulté de collecter des données pour certaines géolocalisations. Une des motivations de FERRCAD, notamment à travers l'application de FerrAPD, serait de pallier à ce manque en créant et en diffusant la donnée manquante lorsque cela est possible. De plus, tant que les fournisseurs de données ne sont pas encore engagés dans une démarche permettant la facilitation de téléchargements et d'utilisation de la donnée, leur collecte restera longue et fastidieuse. Le but de l'entreprise est que la version finale du plug-in puisse télécharger les données OpenSource directement depuis une seule et même plateforme, en ayant seulement besoin de rentrer les emprises de projet et en indiquant les données que l'on souhaite manipuler. Cependant, cette possibilité ne devrait pas voir le jour rapidement puisque certaines entreprises et organisations commencent tout juste à proposer leurs données publiquement.

Une autre question qui se pose est celle de la diffusion des livrables vers les clients. Nombre d'entre eux ne disposent pas d'ArcGIS et une représentation figée telle qu'un fichier .pdf ou une image n'est parfois pas suffisante pour pouvoir analyser la donnée de manière efficace. L'un des besoins de l'entreprise serait donc de proposer à ses clients d'accéder aux différentes cartes et scènes ArcGIS qui composent le projet, ainsi qu'aux livrables qu'ils pourront télécharger via une seule plateforme : Viktor. Les prochaines étapes de développement du plug-in vont donc se tourner vers l'extraction des données depuis ArcGIS Pro afin de les implémenter dans la plateforme Viktor, qui regroupera à terme tous les plug-ins de l'entreprise.

4. Bibliographie

[Grondin, 2022] Grondin, L. (2022). Compilation de données géographiques pour l'étude de faisabilité de projets d'infrastructures maritimes, fluviales ou portuaires. Projet de recherche technologique, INSA Strasbourg.

[Latella et al., 2021] Latella, M., Sola, F., and Camporeale, C. (2021). A density-based algorithm for the detection of individual trees from lidar data. *Remote Sensing*, 13(2) :322.

[Toms and O'Beirne, 2017] Toms, S. and O'Beirne, D. (2017). *ArcPy and ArcGIS*. Packt Publishing Ltd.



Mise en place d'une solution d'acquisition et d'exploitation de nuages de points issus de capteurs dynamiques pour la réalisation de PCRS

PFE présenté par : **Axel Nico**
Société d'accueil : **Un Point Six**
Directeur de PFE : **Joël SIMLER**
Correctrices : **Tania LANDES, Hélène MACHER**
Encadrant : **Etienne SUPPER**



1. Contexte du projet

L'émergence des systèmes de cartographie mobile au sein des cabinets de Géomètres-Experts a amené le cabinet Un Point Six, situé à Sélestat, Schiltigheim et Colmar en Alsace, à examiner les solutions existantes sur le marché afin de proposer un service compétitif pour la réalisation de travaux topographiques de type Plan de Corps de Rue Simplifié (PCRS). L'activité des différents services du cabinet est actuellement sous tension à cause d'une demande client très importante. Il devient alors judicieux de trouver une solution permettant d'augmenter la productivité et de répondre aux différents services proposés par Un Point Six (levés d'intérieur, relevés d'ouvrage d'art, récolement, etc.).

Pour pallier l'acquisition chronophage des données effectuée au tachéomètre, les systèmes de cartographie mobile (MLS) se présentent comme une alternative rapide et optimisable. Les MLS permettent de trouver un juste milieu entre les scanners terrestres fixes (TLS) et les scanners laser aériens (UAV) entre vitesse d'acquisition et densité de données. Ces instruments permettent de couvrir des distances importantes, ce qui a pour conséquence un grand volume de données et nécessite un traitement efficace des données au bureau. Le rendement par rapport à la méthode traditionnelle est amélioré par une acquisition rapide, le site est protégé grâce à un levé par méthode non-destructive et la numérisation est simplifiée par la liberté de mouvement des instruments qui permet d'acquérir plus facilement l'ensemble du site. L'exactitude de ce type d'appareil ne permet pas d'obtenir un ordre de grandeur centimétrique mais répond au cahier des charges des plans de type PCRS qui exige une exactitude des données inférieures à dix centimètres.

L'objectif de ce Projet de Fin d'Étude est la mise en place d'une solution d'acquisition et d'exploitation des nuages de points à partir de systèmes mobiles afin d'améliorer la productivité du cabinet. Ce projet a permis d'analyser les solutions existantes sur le marché, de déterminer la solution la plus adaptée au cabinet et d'analyser l'impact économique d'une telle solution.

2. Mise en place du cahier des charges

La première étape pour la réalisation du projet a été la mise en place d'un cahier des charges auquel doit répondre les solutions matérielles et les logiciels de traitement.

Le choix du matériel est orienté vers une solution polyvalente afin de répondre à tous les types de services du cabinet avec une ergonomie permettant à la fois la réalisation de chantiers de grande envergure et le passage dans des espaces étroits. L'acquisition des données Lidar doit être complétée par des photos permettant la colorisation des nuages de points ainsi que le dessin directement sur l'image. La prise de photo sur le terrain, permet de compléter la donnée Lidar car le nuage de points n'est pas homogène, la densité spatiale des points est dépendante de la disposition des capteurs et de l'éloignement de l'objet mesuré, ce qui est évité par la visualisation sur l'image.



Nous avons également déterminé des critères de qualité du nuage de points : la précision, l'exactitude, la densité de points et la complétude de la donnée (critère de couverture d'acquisition des zones d'intérêt).

Pour le traitement des données, le but a été de limiter au maximum le passage entre différents logiciels de traitement afin de limiter les temps d'export et les coûts financiers. Le volume et la longueur de chantiers de type PCRS n'étant pas assez conséquent, le cabinet Un Point Six ne faisant que rarement des relevés supérieurs à plusieurs kilomètres, il a été décidé de ne pas étudier les logiciels utilisant des techniques de machine learning et deep learning. Ces méthodes demandent des temps d'entraînement très longs et ne permettent pas d'être entraînés à certaines spécificités rencontrées sur les chantiers réalisés. Cependant, le volume de données généré est trop important pour que la vectorisation se fasse entièrement manuellement. Nous avons donc conservé comme critère l'utilisation d'outils automatiques ou semi-automatiques avec un support technique à l'écoute et prêt au développement d'outils personnalisés. La notion de polyvalence est également conservée pour les logiciels afin de répondre aux nombreux chantiers de levés d'intérieur et de relevés de carrières.

3. Analyse des solutions existantes

Ce cahier des charges nous a ainsi permis d'éliminer les solutions de MLS sur voiture et sur chariot car elles ne permettent pas de remplir les critères de polyvalence et de complétude de la donnée, les solutions de MLS sur canne sont écartées pour des raisons d'ergonomie en plus d'être la plupart du temps des solutions qui ne sont pas combinées à une caméra pour les prises de vue, ainsi que les solutions de photogrammétrie qui ne permettent pas la réalisation de relevé d'intérieur. Il en ressort alors les MLS de type backpack et à main. A partir des critères que nous avons mis en place, nous avons sélectionné trois appareils : le VLX de NavVis, le MS96 de Viametris et le Zeb-Horizon de GeoSLAM.



Figure 1 : VLX de NavVis



Figure 2 : MS96 de Viametris



Figure 3 : Zeb-Horizon de GeoSLAM

Pour la vectorisation des données, plusieurs démonstrations ont été suivies au cours de ce projet, desquelles sont ressortis trois logiciels : le module Geo2Cloud du logiciel Topocalc, LimitAddict et Trimble Business Center.

Geo2Cloud et LimitAddict sont des solutions qui n'utilisent que des outils manuels ou semi-automatiques ne nécessitant pas d'entraînement préalable des algorithmes avec des bibliothèques de dessin déjà prédéfinies. Ces logiciels n'ont cependant pas pu être testés au cours de ce projet car les entreprises les commercialisant n'ont pas pour politique de proposer des licences d'essai afin de s'assurer de la bonne utilisation de leurs solutions par leurs clients et les fidéliser par l'apport de leur support technique.

Le logiciel Trimble Business Center a quant à lui été acheté au cours du projet, indépendamment des recherches effectuées, afin d'être testé par les employés. Il a pour avantage d'être utilisable directement avec les instruments de la marque Trimble utilisés par le cabinet Un Point Six et réduire

les exports avec différents formats de fichier mais n'est cependant pas adapté à l'utilisation des photos des MLS.

A partir des différentes démonstrations suivies au cours de ce projet de fin d'études nous avons pu sélectionner une liste restreinte de solutions à analyser. Pour nous aider dans ce choix, une analyse économique des instruments et des logiciels sélectionnés a été réalisée selon plusieurs paramètres comme le nombre et le type de licences ou encore la fréquence de mise à jour des logiciels de pré-traitement.

4. Etude comparative des solutions matérielles

L'étude comparative des instruments est composée d'une analyse quantitative et d'une analyse qualitative. Le VLX, le MS96 et le Zeb-Vision ont été testés sur une même zone permettant d'effectuer séparément un relevé extérieur et intérieur. Pour respecter ces conditions, le site retenu est situé à Schiltigheim, en banlieue proche de Strasbourg, et correspond aux bureaux secondaires du cabinet Un Point Six avec son parking. Les données issues des MLS ont été comparées à un TLS Faro X330. En intérieur et extérieur tous les instruments testés ont été utilisés avec un algorithme SLAM (Simultaneous Localization And Mapping, excepté en extérieur pour le MS96 pour lequel les données ont été acquises à l'aide d'un GNSS intégré à une centrale inertielle.

a) Exactitude

Pour réaliser le calcul de l'exactitude un protocole a été mis en place selon la méthodologie définie par Salgues (2020). Cette méthodologie a été utilisée car les jeux de données n'ont pas été relevés avec les mêmes points de calage et à des moments différents, ce qui aurait impacté les résultats de nos calculs. Les jeux de données ont d'abord été échantillonnés et segmentés afin d'obtenir des nuages homogènes en retirant les objets qui ne se retrouvent pas dans les deux scènes ainsi que les artefacts. Un premier alignement des nuages de MLS avec le nuage du TLS a été effectué à partir de trois paires de points homologues puis le résultat a été affiné par l'utilisation de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point). Le calcul de l'exactitude a ensuite été réalisé à partir du plug-in M3C2 du logiciel CloudCompare. Cette analyse a permis de confronter les algorithmes SLAM à des éléments répétitifs, dans notre cas des escaliers sur plusieurs niveaux, afin de confirmer leur robustesse.

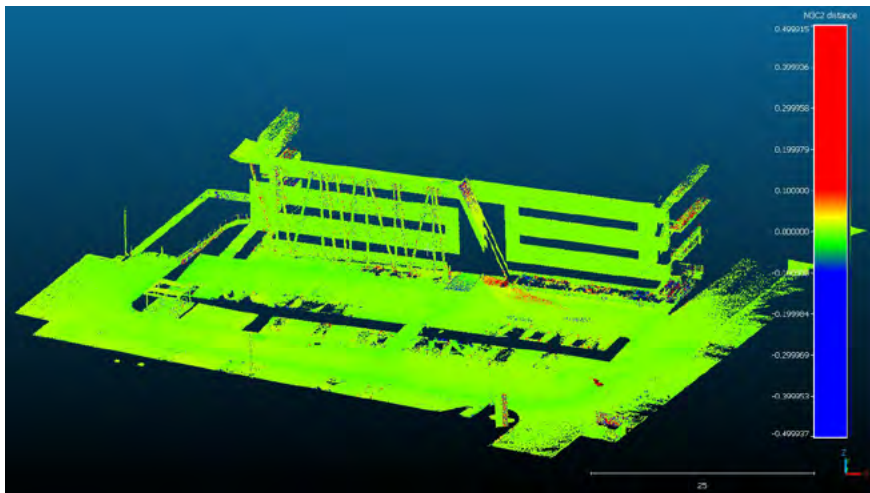


Figure 4 : Calcul des écarts entre le nuage de points du Faro X330 et le nuage du NavVis VLX en extérieur avec l'outil M3C2 de CloudCompare



b) Précision

Le critère de précision a ensuite été calculé à partir des résidus par rapport à un plan moyen. Différentes surfaces ont été définies selon le type d'objets de la scène et à différentes hauteurs afin de mieux appréhender les résultats du Lidar. Les résultats sont calculés à l'aide de l'algorithme Cloud-to-Mesh de CloudCompare.

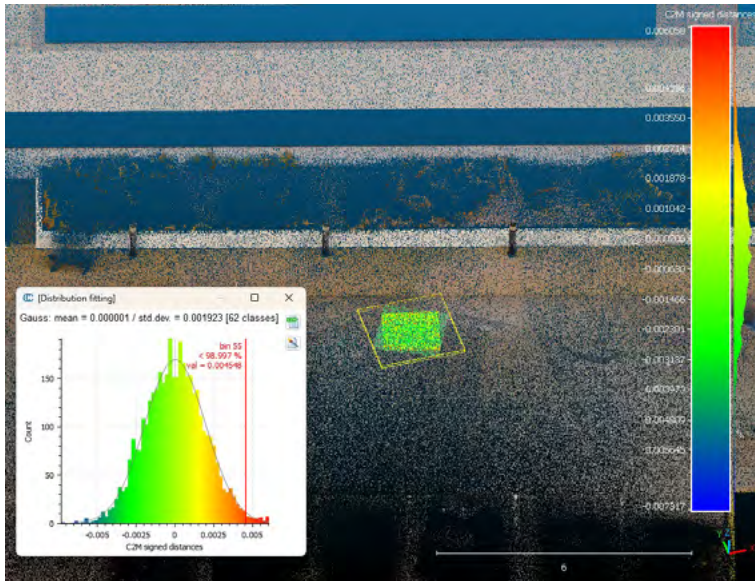


Figure 5 : Calcul des résidus entre un plan moyen et le nuage du NavVis VLX avec l'outil C2M de CloudCompare

5. Conclusion

Ce projet de fin d'études a permis de choisir la combinaison de matériel et de logiciel qui répond au mieux aux besoins du cabinet dans le but d'améliorer sa productivité. Le choix final de l'instrument et du logiciel a été réalisé à l'aide d'un tableau listant la totalité des critères retenus auxquels ont été appliqués une note et un coefficient de pondération selon l'importance donnée au critère. Les résultats retenus ont permis d'analyser l'impact de ces solutions sur l'organisation des charges de travail entre acquisition sur le terrain et traitement au bureau, des coûts indirects, notamment de l'adaptation du parc informatique au traitement de données 3D, et des réductions de dépenses en réduisant le nombre de licences de différents logiciels.

L'application de ces choix a permis de mettre en place des solutions pour d'autres applications que les PCRS et ainsi réduire les temps de traitement au bureau.

Ce travail pourrait par la suite être complété par la mise en place d'une chaîne de traitement optimisée des données avec une étude instrumentale afin d'améliorer la qualité de la donnée produite sur des travaux de grande envergure.

6. Références

Salgues, H., Macher, H. and Landes, T. (2020). *Evaluation of mobile mapping systems for indoor surveys*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIV-4/W1-2020, pp. 119–125. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W1-2020-119-2020>.

Analyse comparative des rendements des projets MMS vs DIMORPH, et caractérisation des projets PCRS au sein du Groupe ATGT

PFE présenté par : Thomas Peyrou
Société d'accueil : ATGT GE
Directeur de PFE : Bruno Bultez
Correcteur : Emmanuel Moisan
Encadrants : Bruno Bultez et Antoine Billault



Introduction :

Dans une optique de croissance technique et commerciale, le groupe ATGT a acquis un MMS (Mobile Mapping System) il y a quelques années. Ainsi, ATGT souhaite aujourd'hui accroître sa part du marché PCRS. Il s'agit d'une représentation topographique constituée de données structurées et normalisées comportant d'importantes zones à lever. Le MMS permet une acquisition de grands volumes en un temps restreint. Cependant il est limité dans l'exhaustivité de son acquisition en milieu urbain en raison de masques présents sur son parcours (stationnement de véhicules, mobilier urbain etc.)

Afin de s'affranchir des limites intrinsèques au MMS, ATGT s'est penché sur le développement d'une technologie photogrammétrique mobile : le DIMORPH (Dispositif MOBILE Rtk et PHotogrammétrique).

Dès lors, la mise en évidence des avantages et des faiblesses des chaînes d'acquisition et de traitement a permis d'établir une stratégie d'étude de mon PFE, d'identifier les améliorations et de les mettre en œuvre.

1) Procédé photogrammétrique terrestre : le DIMORPH

Le DIMORPH est un système photogrammétrique mobile. Le dispositif est composé de deux caméras, une orientée dans le sens de la marche et la deuxième dans le sens opposé. La position des caméras est déterminée par une puce GNSS. L'opérateur contrôle le dispositif à l'aide d'un moniteur.

Les caméras sont orientées à 45 degrés vers le sol. Une photographie est prise toutes les secondes. A chaque capture, la position est enregistrée par la puce GNSS en RTK (Real Time Kinematic).

Le processus se décompose en deux parties. La première est l'acquisition des données sur le terrain. Elle comporte l'acquisition avec le système photogrammétrique DIMORPH et un canevas polygonal afin d'obtenir des points d'appuis, il s'agit de l'étape la plus chronophage.

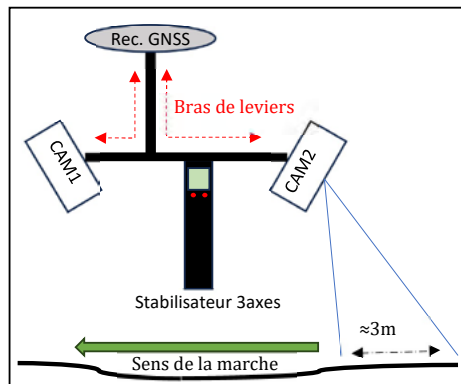


Fig. 1 : Schéma simplifié du DIMORPH

La deuxième partie est celle du traitement des données. Il est nécessaire, préalablement à tout traitement photogrammétrique d'organiser les données reçues du système.



Dans un premier temps, j'ai analysé les rendements du DIMORPH. Par la suite, l'objectif est de les améliorer afin d'optimiser et de connaître la capacité de production de l'entreprise dans ces chantiers, et ce, notamment dans le cadre du marché PCRS (Plan de Corps de Rue Simplifiée). Mon étude se concentre uniquement sur la partie analyse et traitement de la donnée du système. Ainsi je n'ai étudié dans mon PFE ni la partie hardware du DIMORPH ni la vectorisation. Dans un premier temps, il a fallu observer les rendements initiaux du système en se basant sur plusieurs projets de différentes ampleurs. Les résultats sont les suivants :

Linéaire (m)	Largeur voirie (m)	Temps Homme terrain (h)	%	Temps Homme bureau (h)	%	Temps Machine (h)	%
170m / 2 amorces 50m	05m / 2 amorces 10m	3	21.4%	2	16.7%	9	64.3%
250m par 90m	//	21	20.8%	8	8.6%	72	71.3%
1000m	10 m / 20 m	21.5	17.7%	8	7.0%	92	75.7%

Fig.2 : Rendements du DIMORPH sur différents projets

On observe dans le tableau précédent (figure 2) que le temps machine est prépondérant. Néanmoins, il est surtout nécessaire de réduire le temps humain. Sur le terrain, la durée d'acquisition du DIMORPH est négligeable devant le temps demandé pour réaliser le canevas de points de contrôle. Concernant le traitement de la donnée, l'organisation des données et la navigation dans l'interface graphique de Metashape peuvent être améliorées. L'étape la plus chronophage pour l'opérateur lors du traitement est l'attribution de la position des GCP à différentes projections d'images. Ainsi, deux axes d'amélioration se profilent : la possibilité de réduire le nombre de points d'appuis et l'automatisation des tâches sur Metashape.

Dans un premier temps, différents scripts Python ont été mis au point afin de structurer les données en sortie du dispositif et de les corréler (photographies avec leurs coordonnées) par synchronisation. Puis, un autre script permet de structurer l'import des images sur Metashape. Ce dernier permet d'une part, d'appliquer aux caméras un bras de levier prédéterminé entre les centres perspectifs des caméras et la puce GNSS (cf. figure 1). D'autre part il permet au logiciel de calculer un modèle de calibration propre à chaque capteur.

Dans un second temps, une étude a été menée afin de déterminer le nombre et l'emplacement des points d'appuis nécessaires au recalage du modèle. Il est important de préciser que ces points d'appuis sont utilisés après une première aérotriangulation effectuée en utilisant uniquement les Geotags (les coordonnées GNSS appliquées aux images dans le système RGF93v2b).

La première étude est basée sur la comparaison de nuages de points issues de différents paramétrages lors du traitement. Sur un projet comportant initialement 59 points connus en coordonnées, j'ai diminué le nombre de points d'appuis à plusieurs paliers (75%, 50%, 25% et 0%). Par la suite j'ai généré un nuage de points pour chacun de ces paliers. Puis via l'algorithme M3C2 de CloudCompare, on affiche une carte des écarts entre le nuage de référence, comportant la totalité des points d'appuis, avec les nuages des différents paliers. Différents seuils ont été testés, notamment à 5cm ou à 10cm, ce qui correspond aux exigences du CCTP concernant le marché du PCRS. Les résultats donnent une première idée du nombre de GCP requis pour un projet DIMORPH. Cependant, cette première étude ne prend pas en compte certains facteurs très importants : la position RTK des caméras, la qualité de l'aérotriangulation en fonction du signal GNSS reçu, mais aussi l'emplacement des GCP.

La deuxième étude a pour but d'étudier la trajectoire RTK avant et après aérotriangulation et de la corrélérer avec les erreurs (au niveau de l'antenne GNSS) au voisinage des points d'appuis. Pour ce faire, un script Python a été mis au point permettant d'afficher les positions des images avec leurs erreurs respectives (Erreur calculée = Position de la puce GNSS (source) - position estimée de la puce GNSS (après AET)) sur un fond de carte (cf. figure 3). Ces données sont à confronter avec la qualité du signal GNSS reçu lors de la capture de l'image (cf. figure 4).



Fig.3 : Carte des positions des images en fonction de leurs erreurs

Dans un premier temps, on observe une corrélation entre mauvais signal GNSS et erreur importante à l'issue de l'aérotriangulation. De plus, on remarque visuellement, une correction de la dérive de la trajectoire RTK. Ces éléments démontrent une aérotriangulation cohérente. Malgré le fait que les bras de levier soient bien appliqués, il est impossible de connaître les erreurs aux centres perspectifs des caméras.



Fig.4 : Carte des positions des images en fonction du signal GNSS

Ces erreurs sont données au niveau de l'antenne GNSS. On s'intéresse donc à leurs variations. On observe une réduction conséquente de l'erreur aux alentours d'un GCP lorsqu'il s'agit d'une image capturée avec un mauvais signal RTK (cf. figure 4). En revanche, au voisinage d'un point d'appui, lorsque le signal RTK est bon, cette valeur est plus stable. Il est donc nécessaire de placer plus de points d'appuis là où le signal GNSS est mauvais. Grâce à cette étude, il est donc possible d'instaurer des règles sur l'emplacement de GCP lors d'un projet DIMORPH.

Enfin, un dernier élément peut constituer une source d'erreur. Ce dernier est inhérent aux règles photogrammétriques. En effet, il est plus difficile pour l'algorithme de trouver des points de liaison (tie points) sur certaines surfaces homogènes (comme de l'herbe) que sur d'autres (pavé, goudron etc.). Il est donc préférable d'utiliser le DIMORPH sur ces surfaces.

2) Le MMS (Mobile Mapping System)

Au même titre que pour le DIMORPH, afin d'analyser et d'améliorer les rendements du MMS chez ATGT, il est nécessaire de se pencher sur la chaîne de traitement mise en place. Cette dernière se décompose en plusieurs parties.

2.1) Trajectographie

Cette première phase de calcul de la trajectoire est essentielle car elle sera ensuite utilisée dans toutes les étapes de post traitement. Le couplage des capteurs suivants : antenne GNSS, centrale inertielle et odomètre ; permet le calcul de la trajectoire. La détermination de cette dernière est réalisée grâce au logiciel POSpac MMS d'Applanix. En s'appuyant sur un fichier RINEX précis (station RGP (Réseau GNSS Permanent), VRS (Virtual Reference Station) etc.), après calcul différentiel, on détermine la trajectoire ainsi que son fichier de précision. Afin de déterminer la méthode de calcul à préconiser, il est nécessaire de réaliser une comparaison entre les méthodes de calculs qui sont proposées dans le logiciel (MultiSingleBase, SmartBase, PosGNSS).

2.2) Correction des erreurs de parallaxes des têtes LIDAR

Le MMS est un LYNX SG1, assemblé par la société Optech. Le logiciel propriétaire LMS (Lidar Mapping Suite) est utilisé dans la chaîne de traitement pour supprimer les erreurs systématiques entre les têtes LiDAR. Initialement, le constructeur donne des paramètres d'usine plus ou moins instables dans le temps. Il est nécessaire de les redéterminer. Il s'agit de la position des capteurs dans un référentiel tridimensionnel propre au MMS. Afin de caractériser des paramètres plus précis (roulis, tangage et

lacet), on va définir des écarts entre plans homologues dans le nuage de points. Cela est réalisé lors de plusieurs passages du système MMS, selon un pattern précis. Grâce à l'algorithme GENA (Generic Extensible Network Approach), utilisant le principe des moindres carrés, avec un paramétrage précis, on fait converger les écarts vers 0. Dès lors, les nuages sont prêts à être recalés en relatif (passage entre eux) et en absolu (référentiel connu).

2.3 Recalage relatif et absolu des données

Afin de réaliser ces recalages, il est nécessaire de définir des lignes de jonctions (tie lines). Ces dernières permettent de corriger les écarts en planimétrie et en altimétrie. Afin d'accélérer le processus de recherche automatique, le nuage a été préalablement segmenté. La *figure 5* nous montre les lignes de jonction en planimétrie qui seront cherchées sur des plans verticaux comme les murs. On détermine le modèle de correction, puis on l'applique sur les nuages, les trajectoires et les tie lines. Nous importons les points d'appuis, mis en place avant l'acquisition par canevas polygonal. De la même manière l'attribution de tie lines à ces derniers, permet un recalage absolu du nuage.

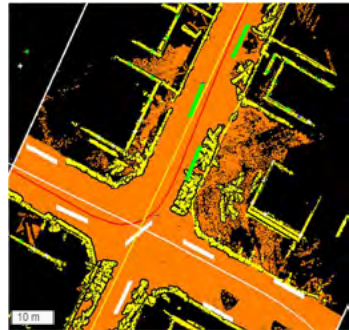


Fig.5 : Application des Tie Lines sur un nuage préclassifié via TerraSolid

2.4 Méthodes d'optimisation mises en œuvre

Le PCRS est une représentation topographique constituée de données structurées et normalisées, respectant une certaine exhaustivité. Il demande une précision moins importante qu'un plan de corps de rue classique (10cm). Dans ce cadre, plusieurs axes d'améliorations sont à envisager. Ces derniers doivent être confrontés quant à leurs résultats et leurs temps d'exécution. Ils sont composés de :

- Une méthode de recalage plus automatisée est proposée sur le logiciel LMS. Il s'agit d'analyser cette méthode de recalage en relatif et en absolu par des plans de liaisons (tie planes).
- Un autre procédé est celui décrit plus tôt sur la suite TerraSolid. Ce logiciel contient de nombreuses options à confronter. Ces dernières sont constituées d'une part de la détermination des tie lines de façon automatique ou manuelle (en relatif et en absolu). D'autre part, les écarts que représentent les tie lines sont représentés par une courbe de correction. Cette dernière est construite par interpolation linéaire entre deux corrections consécutives. Il existe trois manières de déterminer cette courbe, chacune aboutissant à un modèle de correction différent. Il est donc nécessaire de comparer les méthodes de « Free curve », « Smooth curve » et « Restricted curve ».
- Enfin, une dernière méthode est intéressante notamment dans le cas de données entachées de grandes erreurs. Il s'agit de l'utilisation de l'algorithme C2C (Cloud to Cloud) permettant de recalculer les nuages sur un nuage de référence déjà recalé de manière relative et absolue.

Conclusions et perspectives

En conclusion, l'analyse comparative des rendements des projets MMS et DIMORPH a révélé des différences significatives dans leurs performances. Le MMS présente des avantages en termes de rapidité tandis que le DIMORPH offre une meilleure exhaustivité de l'acquisition de données. Cependant, les deux systèmes nécessitent des améliorations pour optimiser leur efficacité. Pour le DIMORPH, il est essentiel d'automatiser certaines tâches et de réduire le temps humain en passant par la réduction du nombre de points d'appuis. Pour le MMS, le recalage des données et l'optimisation des méthodes de calcul doivent être étudiés.

Les dispositifs MMS et DIMORPH offrent des possibilités intéressantes pour le groupe ATGT dans le domaine du marché PCRS. Les améliorations apportées peuvent aussi souligner certains défauts inhérents aux dispositifs. Ces derniers pourraient être améliorés par une modification matérielle des systèmes. Ainsi, cela permettra de maximiser la productivité et la qualité des données acquises.

Individualisation d'objets dans un nuage de points issu d'une acquisition aérienne LIDAR : application aux relevés d'obstacles d'aérodromes

PFE présenté par : **Inès CHAMPETIER**
Société d'accueil : **OPSIA Aviation**
Directeur de PFE : **Nicolas BOUAD**
Correcteurs : **Tania LANDES et Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Nicolas TADJIAN**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le Service d'Information Aéronautique (SIA) est chargé de collecter et de fournir toutes les données relatives à l'aviation afin d'assurer la sécurité de tous. Pour répondre à ces exigences, le SIA a l'obligation de réaliser périodiquement des relevés d'obstacles.

On considère un élément comme obstacle lorsqu'il est estimé gênant à la navigation aérienne aux alentours d'un aérodrome, autrement dit lorsque son point haut dépasse une altitude réglementaire. Celui-ci peut être à la fois naturel ou artificiel ainsi que mobile ou fixe.

Depuis plus de 20 ans, OPSIA est amenée à réaliser en moyenne une vingtaine de relevés d'obstacles par an. Ces derniers se divisent en deux types de dossiers :

- Les Plans de Servitudes Aéronautiques (PSA) servant à assurer la sécurité de la circulation des aéronefs en grevant les propriétés d'une interdiction de créer ou une obligation de supprimer des obstacles à la navigation.
- Les relevés d'obstacles pour la conception de procédures de vol aux instruments ou en anglais *Performance Based Navigation* (PBN).

Ces deux dossiers nécessitent le même type d'exigence, de précision (métrique) et de rendu. Ainsi, OPSIA les traite à quelques exceptions près de la même manière. Par exemple, le PBN demande en plus de relever dans certaines zones, un nombre de points minimum pouvant gêner à la navigation même s'il n'est pas caractérisé comme obstacle. De plus, il ne requiert pas d'identifier tous les obstacles, mais seulement ceux respectant la condition de masquage. Un obstacle A masque un obstacle B si A est plus proche de la piste que B et si A a une altitude sommitale supérieure à celle de B. Ainsi, B est supprimé de la liste des obstacles (Fig. 1).

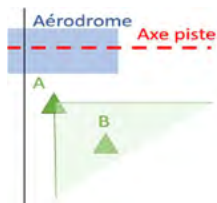


Fig. 1 : Illustration de la condition de masquage.

Le SIA fournit à l'entreprise les zones à lever avec leurs dimensions. En moyenne, ces deux types de dossiers couvrent une superficie de 400 km².

Chacun de ces obstacles est matérialisé par son point le plus haut. Parmi tous les obstacles identifiés sur un aérodrome, la végétation en représente plus de la moitié, tandis que les bâtiments en constituent un quart. Le reste est composé d'antennes, de pylônes, de routes, etc. Par conséquent, notre étude s'est focalisée sur ces deux types d'obstacles prédominants.

Pour mener à bien ces dossiers, OPSIA réalise une campagne de clichés aériens ainsi qu'une acquisition LiDAR de l'ensemble de la zone d'étude avec une densité de 1pt/m² pour le nuage de points et un pixel au sol de 25cm. Pour les abords immédiats de la piste, OPSIA effectue un vol plus bas pour atteindre une densité de 10pts et un pixel photo de 12cm. Ceci permettra une saisie plus fine dans les secteurs les plus sensibles.

Grâce à ces deux types d'acquisition, les obstacles sont saisis manuellement à partir de clichés aériens par stéréorestitution. Cependant, cette méthode peut être longue et fastidieuse pour les stéréorestituteurs. Ainsi, l'objectif de ce projet de fin d'études est de s'intéresser aux différentes possibilités de détections automatiques d'obstacles correspondant ici à de la végétation et aux bâtiments dans le nuage de points LiDAR. Le but est de proposer une chaîne de traitement semi-



automatisée, s'insérant dans la chaîne de production actuelle dont le résultat servira de base aux stéréorestituteurs afin qu'ils puissent optimiser leur temps de saisie.

2. Extraction sous forme ponctuelle de la végétation et des bâtiments

Notre étude bibliographique s'est tout d'abord orientée sur les méthodes de segmentation du nuage de points en trois classes différentes, le sol, les bâtiments et la végétation. Cette étape est primordiale dans l'identification et l'extraction des objets dans un nuage.

Ensuite, nous avons exploré les algorithmes proposant de modéliser chaque bâtiment selon son contour afin d'obtenir par la suite le point le plus haut. La modélisation des limites d'un bâtiment nécessite trois étapes majeures, dont la première sert à regrouper les points appartenant à un bâtiment à l'aide d'algorithmes basés sur la géométrie ou par ajustement de modèle. Puis, la seconde étape est la réalisation des contours en déterminant les points frontières, au moyen d'algorithmes de forme convexe (Sampath, et Shan, 2007), de filtre de détection de contour (Wang, et al., 2016), etc. Et enfin, une régularisation de ces derniers est nécessaire afin d'obtenir des bâtiments ayant des formes régulières à l'aide, par exemple, de l'algorithme Douglas Peucker (Douglas, et Peucker., 1973) ou par l'utilisation d'ajustement de modèle comme (Sampath, et Shan., 2007).

Puis, nous nous sommes tournés vers le domaine forestier pour la détection de la cime de chaque arbre. De nombreux chercheurs proposent d'utiliser un algorithme des maxima locaux (Hyypya, et al., 2001) afin de détecter les cimes d'arbres dans une forêt ou de trouver le maximum global correspondant à une cime puis segmenter les points appartenant à celle-ci afin de trouver le sommet suivant (Li, et al., 2012).

Enfin, nous avons réalisé un inventaire des logiciels existant pouvant répondre à notre problématique. Notre recherche s'est basée sur des critères tels que la polyvalence du logiciel, ou encore la possibilité de développer des extensions afin d'automatiser des traitements. Parmi les logiciels identifiés, nous avons ENVI LiDAR, TerraSolid, LasTools, LidR, Lidar 360 et ArcGIS Pro.

3. Tests et Evaluation des résultats obtenus par les logiciels

Afin d'expérimenter les outils proposés par les logiciels cités dans la partie 2, nous avons sélectionné une zone d'étude de 9km² se trouvant au Nord-Ouest de Marseille près de l'aéroport de Marignane. OPSIA possède deux jeux de données, avec une densité de 20pts/m² pour l'un et 1pt/m² pour l'autre. Ce dernier jeu de données nous a donc été très utile puisque nos nuages de points pour les relevés d'obstacles possèdent cette densité. En plus, de ces deux nuages de points, nous avons rajouté celui de l'Institut Nationale de l'information Géographique et forestière (IGN) avec une densité de 10 pts/m². Pour finir, une partie de la zone a été restituée et nous servira de référence pour évaluer nos différents tests sur les logiciels.

3.1. Emprises des bâtiments

Après avoir étudié les algorithmes des logiciels commerciaux, nous avons décidé de réaliser une évaluation quantitative sur une zone de 1km² afin de choisir le meilleur logiciel qui entrerait dans la chaîne de production.

Nous nous sommes appuyés sur la thèse de (Tarsha-Kurdi., 2008), afin de proposer une évaluation de nos différents contours obtenus pour les trois densités distinctes ainsi que pour chaque logiciel. De plus, nous avons rajouté à celle-ci la couche « bâtiment » proposée par la BD TOPO. A la suite de cette évaluation, nous avons constaté que la majorité des logiciels donne de meilleurs résultats lorsque la densité de points est plus élevée. De plus, en analysant plus profondément, la détection des contours, nous en avons déduit que celle-ci dépend fortement de l'algorithme de classification des objets en bâtiment ou non-bâtiment. Ainsi, notre choix s'est donc porté sur la couche bâtiment de la BD TOPO, car celle-ci obtenait les meilleurs résultats avec peu de faux bâtiments.

3.2. Détection de la cime des arbres

Comme pour la modélisation des bâtiments, nous avons réalisé une évaluation selon (Monnier et al., 2012) afin de sélectionner le meilleur logiciel. Les résultats que nous avons obtenus ne sont pas

satisfaisants, car nous constatons un nombre significatif de faux arbres correspondant à des bâtiments ou à des véhicules. Ceci est dû au fait que la majorité des logiciels sont développés pour la gestion forestière, où la présence d'éléments considérés comme non-arbre est faible. Ainsi, pour limiter la détection de faux positifs nous avons utilisé les orthophotos infrarouges de la BD ORTHO IRC, afin de séparer la végétation du reste à l'aide de l'indice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Suite à cette approche, nous avons réévalué les résultats, ce qui a permis d'éliminer la plupart des fausses détections d'arbres et d'obtenir des résultats plus satisfaisants. Parmi tous les logiciels testés, TerraSolid en combinaison avec la BD ORTHO IRC s'est avéré être le meilleur, et nous avons donc décidé de l'intégrer dans notre chaîne de traitement.

4. Mise en place de la chaîne de traitement afin d'extraire les obstacles

Après avoir choisi les logiciels à intégrer, nous nous sommes intéressés à l'obtention du point le plus haut pour chaque bâtiment, puis, à la classification des cimes en arbre isolé ou en zone boisée. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur l'identification d'un objet pouvant être ou non un obstacle et enfin, nous avons travaillé sur les contraintes spécifiques du PBN.

4.1. Détection du point le plus haut pour chaque bâtiment

L'emprise des bâtiments provenant de la BD TOPO permet de dire que tous les points se trouvant à l'intérieur du contour appartiennent à un unique groupe, chaque groupe correspond à un bâtiment. Avec cela, le point le plus haut de chaque bâtiment est extrait du nuage de points LiDAR.

4.2. Classification des arbres en isolé ou zone boisée

La détermination de zone boisée comme obstacle permet aux stéréorestituteurs de s'abstenir de lever toutes les cimes d'arbres, mais seulement les plus importantes, afin d'éviter la surinformation. Pour déterminer une zone boisée, nous utilisons un algorithme de forme concave afin de réaliser un contour sur nos cimes d'arbre et ainsi identifier si un arbre est isolé ou fait partie d'une forêt. Une fois cette classification effectuée, un programme en langage Python a été développé en interne afin d'effectuer un nettoyage des arbres dans les zones boisées, pour ne garder que les cimes les plus hautes.

4.3. Détermination d'un obstacle

Une fois que les bâtiments et la végétation sont représentés sous forme ponctuelle, il faut déterminer s'ils représentent un obstacle. Pour cela, une maille altimétrique couvrant l'ensemble de la zone est générée et il sera possible de déterminer si l'élément la dépasse ou non. Si oui, l'objet est alors considéré comme obstacle.

4.4. Développement pour les contraintes supplémentaires du PBN

Nous avons développé un programme en Python pour répondre aux conditions de masquage stipulées dans le cahier des charges du PBN. Ce programme permet d'éliminer les obstacles ne respectant pas ces conditions.

De plus, nous avons mis en place un algorithme, afin de garantir un nombre suffisant d'obstacles mesurés dans chaque zone, en particulier dans les zones éloignées de la piste où les mailles altimétriques sont significativement plus élevées que le terrain naturel. Celui-ci a été développé sous FME® en utilisant une suite d'outils précompilés et personnalisés. Ainsi, nous avons obtenu automatiquement le bon nombre d'obstacles dans chaque zone.



Fig. 2 : Chaîne de production.

5. Evaluation de la chaîne de production sur un cas d'étude

Nous avons réalisé une étude de cas sur l'aérodrome de Montpellier pour évaluer l'applicabilité de notre chaîne de traitement développée lors de ce projet. Le paysage varié et le relief hétérogène de cette zone étaient tout à fait propices à ce calcul.

Nos résultats ont montré que 78% des bâtiments détectés étaient corrects. Nous avons ainsi identifié plusieurs causes d'erreurs, dont l'absence de points dans le nuage sur le sommet des bâtiments, un manque de mise à jour de la BD TOPO et par une mauvaise classification du nuage de points.

En ce qui concerne la détection des arbres, nous avons obtenu un taux de bonne détection de 58%. Ceci est dû à la difficulté que rencontre l'algorithme afin de caractériser les zones boisées, ce qui entraîne la plupart du temps un nettoyage excessif des arbres. Nous avons ainsi développé une nouvelle méthode pour améliorer cette étude, mais elle n'a pas encore été testée ni évaluée sur un aérodrome.

En termes de temps, notre nouvelle méthode a nécessité 28 heures de travail humain et 4 heures de temps machine pour produire les résultats. En comparaison, une approche entièrement manuelle aurait pris 32 heures de travail humain. Ainsi, nous avons réussi à gagner une demi-journée de travail humain, permettant aux stéréorestitueurs de se consacrer à de nouveaux dossiers.

6. Conclusion et Perspectives

Dans ce projet, notre objectif était de développer une chaîne de traitement semi-automatisée (Fig. 2) pour extraire les obstacles à partir d'un nuage de points, afin d'accélérer le processus de stéréorestitution.

Pour cela, nous avons identifié et évalué plusieurs logiciels, en choisissant ceux offrant les meilleurs résultats. Ainsi, nous avons décidé d'utiliser la couche bâtiment de la BD TOPO pour obtenir le point le plus élevé de chaque bâtiment, tandis que TerraSolid associé à la BD ORTHO IRC a été intégré à notre chaîne de traitement pour détecter les cimes des arbres.

Nous avons ensuite complété notre chaîne de production pour obtenir le point le plus haut de chaque bâtiment, classer les arbres en isolé ou en zone boisée, identifier les obstacles, et nous avons ajouté des traitements supplémentaires pour respecter les conditions de masquage et le nombre minimum d'obstacles par zone, notamment pour les PBN.

L'évaluation de notre chaîne de production sur un dossier d'aérodrome a donné des résultats satisfaisants pour les bâtiments. Des tests supplémentaires ont été réalisés en fin de stage afin d'améliorer la détection des arbres et optimiser davantage le gain de temps.

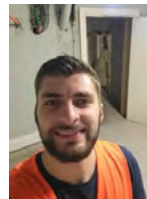
Des perspectives s'ouvrent à la suite de ce projet, notamment l'amélioration de notre chaîne de production en réduisant la dépendance vis-à-vis des données fournies par l'IGN, ainsi que la détection de nouveaux types d'obstacles tels que les routes, les lignes électriques, etc. à l'aide d'un nuage de points photogrammétrique.

7. Bibliographie

- Douglas, D.H., Peucker, T.K., (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica* 10, pp. 112–122. <https://doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727>
- Hyppya, J., Kelle, O., Lehtikoinen, M., Inkinen, M., (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, pp. 969–975. <https://doi.org/10.1109/36.921414>
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M.K., Kelly, M., (2012). A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *photogramm eng remote sensing* 78, pp. 75–84. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75>
- Monnier, F., Vallet, B., Soheilian, B., (2012). Trees detection from laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 1–3, pp. 245–250. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-1-3-245-2012>
- Sampath, A., Shan, J., (2007). Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne Lidar Point Clouds. *photogramm eng remote sensing* 73, pp. 805–812. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.7.805>
- Tarsha-Kurdi, F., (2008). Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LIDAR aéroportés. Thèse de l'école doctorale « Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur » (ED 269) de l'Université de Strasbourg.
- Wang, R., Hu, Y., Wu, H., Wang, J., (2016). Automatic extraction of building boundaries using aerial LIDAR data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(1), p. 016022-016022. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016022>



Levés et modélisation 3D du complexe souterrain exploité par la CTS sous la gare de Strasbourg



PFE présenté par : **Aymeric Mottier**
Société d'accueil : CTS
Directeur de PFE : Olivier Barrot
Correcteurs : Mathieu Koehl & Emmanuel Alby
Encadrant : Mathieu Koehl



1. Contexte et objectif de l'étude

Ce Projet de Fin d'Etudes a pour but de réaliser les levés ainsi que la modélisation 3D du complexe souterrain qui se situe sous la gare de Strasbourg. Cette structure est actuellement exploitée par la Compagnie des Transports Strasbourgeois qui est également le collaborateur de ce projet.

Le complexe souterrain qui fait l'objet de cette étude est une structure complexe qui s'étend sur quatre niveaux. Ces niveaux sont constitués de parties accessibles au public ainsi que de parties qui sont exploitées par différentes sociétés. Ces espaces sont des commerces, des bureaux, des locaux techniques ainsi que de grands espaces publics dont la station de tramway qui se trouvent au niveau le plus bas, une galerie commerciale et des escaliers qui permettent d'évoluer entre les différents niveaux. On pourra notamment retrouver des pièces et des couloirs avec des géométries simples telles que des pièces rectangulaires et des couloirs rectilignes. Cependant, on retrouve également des parties plus complexes telles que des murs-rideaux courbes et des plafonds à formes variables. La CTS souhaite obtenir un modèle 3D de cette structure ainsi que des plans thématiques par niveau.

Ce projet fait suite à deux projets réalisés par Mathis Bouquier ainsi que le Projet de Recherche Technologique (PRT) que j'ai réalisé en collaboration avec Louis Mouvaux. Ces projets avaient pour objectif de commencer les levés de terrain ainsi que de mettre en place une stratégie de modélisation et l'appliquer sur les premières parties ayant été levées.

L'objectif de ce projet est donc de fournir un modèle 3D fini géoréférencé de la structure en respectant un code couleur fourni par la CTS. La stratégie de modélisation mise en place par Mathis Bouquier sera utilisée et adaptée aux nouvelles parties non modélisées. Les procédures automatiques mises en place lors du Projet de Fin d'Etudes précédent ne seront pas réutilisées par manque de temps.

2. Réalisation des levés de terrain

Pour réaliser les levés de terrain, deux types d'appareil sont utilisés : la station totale Trimble M3 qui servira au géoréférencement du projet ainsi que deux scanners laser qui permettent d'acquérir les nuages de points qui serviront à la modélisation 3D de la structure. Ces deux scanners sont le FARO Focus X330 qui a été majoritairement utilisé ainsi que le FARO Focus Premium acquis récemment par le service de topographie de l'INSA Strasbourg et qui a servi pour les derniers relevés de ce projet. Afin de réaliser ces travaux de manière optimale, on met en place un organigramme décrivant le processus de réalisation de ces relevés :



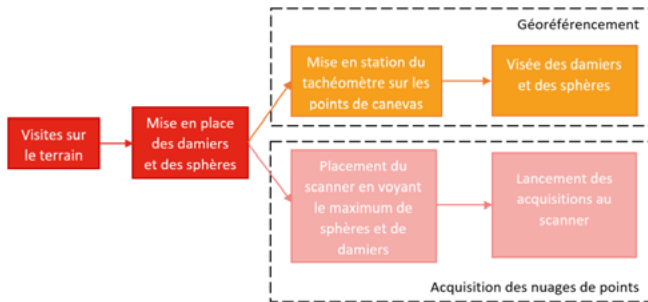


Fig. 1 : Processus de réalisation des levés de terrain

Les points de canevas sont des points qui ont été mis en place lors des projets précédents. De nouveaux points ont été mis en place en se basant sur le canevas existant afin de compléter les zones encore non acquises.

3. Choix des logiciels

Afin de réaliser un choix optimal des logiciels, il a été mis en place une chaîne de traitement qui sera décrite dans l'organigramme ci-dessous :



Fig. 2 : Processus de traitement des données brutes pour arriver au modèle 3D livrable

La chaîne de traitement décrite ci-dessus est relativement similaire à celle mise en place lors du Projet de Fin d'Etude précédent. La différence est le fait qu'il a été choisi d'utiliser 3DReshaper pour l'étape (c) par affinité et simplicité d'utilisation.

4. Quelques chiffres sur les travaux de terrain

Dans cette partie seront présentés quelques chiffres permettant de se représenter l'envergure du projet. Lors de ce projet, 92 points de canevas ont été mis en place pour réaliser le géoréférencement. Ces points ont été mis en place aux travers des trois projets précédents. Des points se situant dans le tunnel et ayant été mis en place lors du Projet de Fin d'Etudes sur la numérisation du tunnel ont également été utilisés pour réaliser une fermeture de la polygone.

La numérisation du bâtiment a nécessité 281 stations de scanner. Les nuages de points que l'on pourra retrouver à la figure 4 (une couleur correspond à une station de scanner laser) permettent d'estimer la surface au sol des volumes à modéliser par étage :

N° d'étage	N-1	N-2	N-3	N-4
Surface au sol approximative à modéliser	~3850m ²	~2935m ²	~535m ²	~945m ²

Fig. 3 : Répartition de la surface au sol approximative à modéliser par étage sur la base de la création des dalles

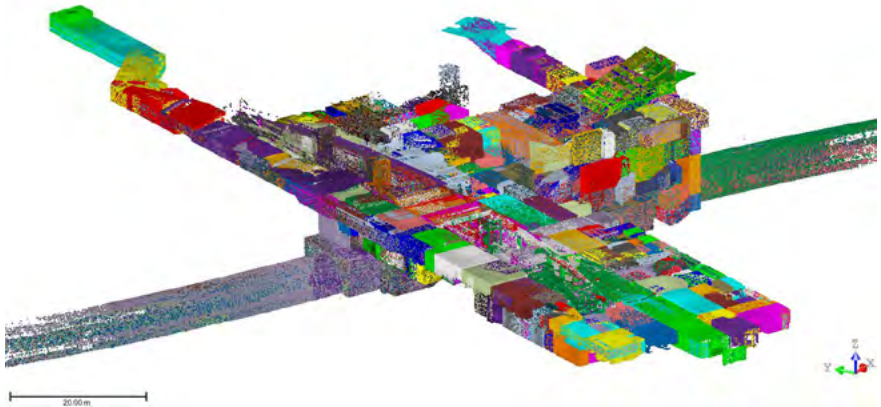


Fig. 4 : Nuage complet de toute la structure souterraine sur Trimble Realworks (X/Y/Z = Est/Nord/Altitude)

5. Modélisation de la structure

Dans cette partie, nous allons aborder la stratégie qui a été mise en place pour la modélisation une fois le nuage de points complet au format .rcp intégré dans Revit. Cette stratégie reprend celle mise en place lors des projets précédents mais elle a été adaptée pour que cette dernière soit applicable aux nouvelles zones à modéliser. Ces méthodes de modélisation sont majoritairement manuelles. On pourra retrouver la stratégie de modélisation ci-dessous :

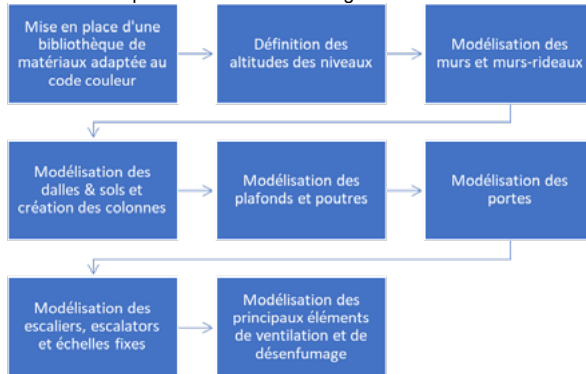


Fig. 5 : Processus de modélisation de la structure

Au cours de ces étapes, des familles d'objets ont également été mises en place notamment pour la modélisation des portes et des rouleaux à lames (entrées de locaux commerciaux). Ces familles ont soit été récupérées sur bimobject.com qui est une librairie libre d'objets, soit créées de toutes pièces. Il faut ensuite modifier ou créer certains paramètres afin d'obtenir un modèle qui puisse s'adapter à tous les objets similaires dans le modèle.

Pour s'aider lors de la modélisation et pour effectuer un premier contrôle de la modélisation, on se sert également des vues planaires du logiciel FARO SCENE sur lesquelles on peut également

contrôler les dimensions des éléments que l'on souhaite modéliser. Cela permet de relever les éventuelles erreurs et de les corriger avant de passer à l'élément suivant. Cela permet de remarquer les fautes sur les côtes de l'encadrement d'une porte par exemple. Lors de la modélisation, on se sert également d'une visionneuse IFC (BIMVision) sur laquelle on peut évoluer plus facilement dans une vue 3D et ainsi vérifier que ce qui a été modélisé semble proche de la réalité en comparant à une vue planaire de FARO SCENE. Ce deuxième moyen permet une deuxième vérification qualitative de la modélisation.

6. Résultats et évaluations

Après avoir réalisé les étapes citées précédemment, on arrive au modèle 3D final de la structure. On peut retrouver un aperçu d'une partie du modèle sur la figure ci-dessous :

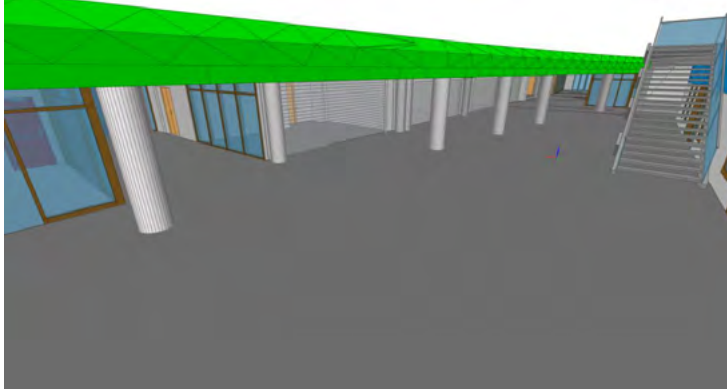


Fig. 6 : Aperçu du modèle 3D d'une partie de la zone publique

On peut également remarquer ici que le code couleur technique requis par la CTS est appliqué.

L'étape d'évaluation du modèle est déjà en partie réalisée lors de la phase de modélisation, notamment avec les vérifications effectuées en utilisant les outils de mesures de Revit et en comparant avec les mesures effectuées au sein des vues planaires de SCENE.

Il est également important de créer une procédure qui permet de définir si une zone modélisée est finalisée en cochant tous les items d'une liste de tâches à réaliser. Lorsque toutes ces tâches sont réalisées, on peut considérer que la zone modélisée est achevée et évaluée.

Afin de vérifier le modèle créé, une segmentation de certaines pièces est réalisée et ainsi, le nuage de point résultant est comparé au modèle de la pièce correspondante. Cela permettra de donner une idée de la précision de la modélisation.

7. Conclusion

Ce projet a permis de réaliser tous les travaux pour obtenir un modèle 3D fini d'un bâtiment complexe. La modélisation par primitives géométriques est un travail très chronophage, notamment dans le cas de la modélisation de structures à géométries complexes. Ce travail a également permis de mettre en évidence l'importance de mettre en place une stratégie de modélisation claire afin d'arriver au résultat de manière efficace et étant le plus précis possible.

Ce projet ne sera néanmoins pas tout à fait complet en raison des délais qui ne permettaient pas de finaliser la modélisation des autres réseaux dans la structure : on pense notamment aux gaines techniques, aux conduites hydrauliques, l'éclairage et les réseaux électriques. La modélisation de ces réseaux peut s'avérer être compliquée lorsque ceux-ci ne suivent pas des trajectoires simples. C'est pourquoi, un travail minutieux devrait être appliqué pour modéliser de manière précise ces réseaux.

Mise en place d'un processus de traitement visant à automatiser la classification et la vectorisation d'éléments sur des nuages de points.

PFE présenté par : **Louis Mouvaux**
Société d'accueil : **Servicad Ouest Ile de France**
Directeur de PFE : **Ludovic Breteaux**
Correcteur : **Emmanuel Alby**
Encadrants : **Ludovic Breteaux et Isis Niquet-Morillon**



1. Introduction des besoins et cadrage des objectifs

Le bureau d'études Servicad Ouest Ile-de-France (SOIDF) réalise des travaux topographiques par acquisition de nuages de points de grande ampleur. Cela implique une importante quantité d'informations à traiter pour organiser et présenter les livrables aux clients.

En effet, les méthodes d'acquisitions sur le terrain ont subi des avancées technologiques rapides qui permettent de réduire considérablement le temps passé sur le chantier. En parallèle, les méthodes de traitement de nuages de points n'ont pas été améliorées avec le même rythme, et de cela résulte un déséquilibre considérable sur le temps passé au bureau par rapport au terrain. C'est dans cette optique que j'interviens pour mon Projet de Fin d'Etudes (PFE) chez SOIDF

L'objectif principal du projet a donc été de trouver une ou plusieurs solutions logicielles qui vont permettre d'automatiser (ou de semi-automatiser) la vectorisation d'un maximum d'éléments sur des nuages de points. Par vectorisation, nous entendons tracer des polygones exploitables et modifiables sur un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) tel qu'AutoCad, ceci pour la mise en place de plans en deux ou trois dimensions.

Nous savons qu'aujourd'hui, un logiciel qui réalise entièrement ce type de tâche n'est pas encore une solution optimale et que de nombreuses améliorations peuvent encore être développées. Cependant, les semi-automatisations, qui sont des solutions faisant appel à l'utilisateur pour certaines réalisations, paraissent faire gagner un temps non négligeable. C'est ce que nous devons observer, tester et mettre en place pour l'équipe avant la fin du projet.

Ainsi, plusieurs objectifs ont été déclinés pour arriver à l'objectif essentiel qui est de trouver un logiciel de vectorisation respectant un maximum de critères fixés par l'entreprise d'accueil. C'est ce que nous proposons de résumer ici.

2. Définition des éléments à vectoriser et critères de choix

2a. Les éléments à vectoriser

Avant de commencer les recherches de solutions logicielles, il est nécessaire de définir quels doivent être les éléments que les collaborateurs souhaitent prioritairement vectoriser. Et c'est ici que nous comprenons qu'il est important voir même nécessaire de scinder les recherches en deux temps. En effet, certains collaborateurs travaillent davantage sur des projets linéaires alors que d'autres sont majoritairement concentrés sur des projets de bâtiments, d'intérieurs et de façades. Ainsi, deux listes d'éléments ressortent :

- Concernant les projets linéaires, nous avons les éléments de marquage routiers, (c'est-à-dire les lignes types T1 entre les voies lentes et rapides, ainsi que les lignes type T4 pour les Bandes d'Arrêts d'Urgence (BAU) et les lignes continues proches des Terres Pleins Centraux



- (TPC)), les Glissières en Béton Armé (GBA) et les Doubles Béton Armé pour les projets autoroutiers, et les rails et les caténaires pour les projets ferroviaires, comme illustrés Fig. 1.
- Concernant les projets dits de bâtiments, les détections indispensables étaient les ouvertures (comme les portes ou les fenêtres pour les plans de façades), les gouttières, et les murs pour les plans d'intérieurs.

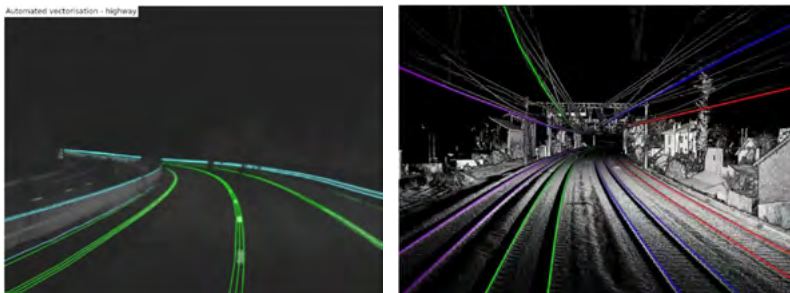


Fig. 1 : Détection automatique sur des projets linéaires ferroviaires
Source : TheCrossProduct | Traitement automatisé de nuages de points LiDAR

2b. Les critères de choix d'une solution logicielle

Une fois que nous connaissons ces éléments, nous centrons nos recherches sur ceux-ci sans s'en écarter. Nous savions qu'actuellement, les logiciels ne sont pas capables de faire cela de manière complète et satisfaisante mais nous souhaitons trouver la meilleure solution actuelle. Il faut donc définir ce que nous appelons la « meilleure solution » dans notre cas. Ainsi, nous mettions par écrit les critères qui nous semblaient indispensables, et nous les avons classés par ordre d'importance pour la société. Nous aboutissions alors aux critères suivants (par ordre d'importance) :

Les performances : elles décrivent avant tout les capacités du logiciel en comparaison au travail manuel qui a précédé les tests.

L'accessibilité : elle est davantage centrée sur la communication qui serait possible avec les développeurs. En effet, il est important pour la société de pouvoir donner des idées de développement aux éditeurs de logiciels pour que ces derniers proposent des solutions centrées sur nos besoins.

La compatibilité : est importante également, puisque la société emploie différents outils d'acquisition, qui ne sont pas tous de même marque. Ainsi, les formats de nuages acceptés par les logiciels doivent contenir les formats qui nous intéressent au maximum.

La flexibilité : elle doit mettre en avant les différentes mises à jour qui arrivent. Ce critère va de pair avec l'accessibilité, c'en est, en quelques sortes, la suite logique.

Le prix de la solution est aussi un critère qui se doit d'être respecté en fonction de l'entreprise.

3. Solutions testées pour les projets linéaires

3a. VisionLidar

VisionLidar nous a directement surpris par son ancienneté dans le domaine de la détection d'objets dans un nuage de points et donc son expérience acquise. La relation avec les développeurs était aisée et nous avons même échangé des données pour que nous puissions avoir des démonstrations des capacités de la solution logicielle. Cette solution possède des modules d'apprentissage profond, ce qui peut rendre des détections d'objets de toutes sortes. Au niveau des résultats de performances, nous avons en revanche rapidement été déçus, certains marquages au sol n'étant clairement pas détectés correctement et des GBA et DBA détectées à 30 cm près, ce qui n'est pas satisfaisant. Malgré des modules supplémentaires, nous avons décidé de passer aux solutions suivantes.

3b. TCP (TheCrossProduct)

Disposant d'une accessibilité remarquable (cette solution logicielle étant française) nous avons pu directement envoyer nos données pour un retour rapide. Cette start up possède un seuil d'exigence appréciable au niveau des retours que nous obtenions. En effet, en plus du retour de différents rapports de résultats, nous avons pu comparer nos données réalisées à la main avec celles



Fig. 2 : Détection automatique des rails par TCP sur des projets linéaires ferroviaires

fournies par les développeurs (en Fig. 2 par exemple). Nous obtenons donc des écarts de moins d'un centimètre en altimétrie et en planimétrie pour les projets ferroviaires. Concernant les projets autoroutiers, les algorithmes sont en cours de développement et devraient arriver pour la fin de l'année.

Nous avons donc retenu que, dans l'éventualité où la détection d'objet pour les projets autoroutiers atteint un même niveau d'exigence que pour les projets ferroviaires, TCP serait une solution largement viable pour l'entreprise.

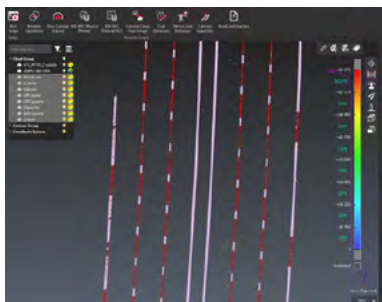


Fig. 3 : Détection automatique de marquages au sol par Cyclone 3DR

3c. Cyclone3DR

Cette solution logicielle, déjà en possession de l'entreprise pour des nettoyages de nuages de points par exemple, dispose également d'un module de détection de marquages routiers semi-automatique. En effet, après un nettoyage et en utilisant l'intensité du signal retour (en Fig. 3) des points composant une bande réfléchissante, il est possible d'isoler les marquages au sol et donc de tracer des polygones représentant ce marquage avec précisions et exactitude. Ainsi, Cyclone3DR s'avère être une solution avantageuse permettant un gain de temps pour des longs projets, n'engageant aucun frais supplémentaires pour l'entreprise et dont le relationnel n'est plus à prouver.

3d. Suite AEC

Cette suite fait partie intégrante d'Autodesk et est donc également en possession de l'entreprise. Un module a vu le jour pendant la durée du projet et a retenu notre attention pour son efficacité pour tous les éléments possédant un profil 3D bien distingué (Fig. 4). Ainsi, nous retenons les excellentes performances de la détection de GBA, DBA, glissières de sécurité et rails de cette solution logicielle. Elle s'avère être semi-automatique car un niveau de confiance est fixé au départ, ainsi qu'un profil type. Nous retenons donc cette solution pour tous ces éléments détectables de manière satisfaisante.



Fig. 4 : Détection d'une DBA par la suite AEC

4. Solutions testées pour les projets dits de bâtiments

4a. Cyclone3DR

Cyclone3DR réalise également des plans d'intérieurs semi-automatique avec son applicatif Scan-to-plan. Il revient avantageux de l'utiliser pour les mêmes raisons de disponibilité des développeurs et du



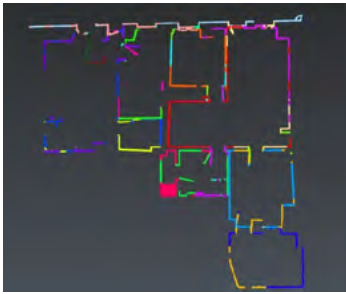


Fig. 5 : Détection automatique des murs pour un plan d'intérieur par Cyclone3DR

fait de la possession d'une licence par l'entreprise. Concernant les résultats de performances, nous les constaterons à la fin du stage et nous en présenterons les résultats lors de l'oral et du mémoire. Retenons qu'en un seul « clic » nous pouvons automatiser le dessin de plusieurs polygones (Fig. 5), départ du plan en 2 dimensions. Cependant, nous gardons en tête le fait de la rapide prise en main et du gain de temps considérable de cette solution logicielle.



Fig. 6 : Détection automatique des murs pour un plan d'intérieur par PointCab

4b. PointCab Origin

Ce logiciel ne dispose pas de classification au préalable et s'appuie sur des réflectivités durant la génération d'ortho-photos issues du nuage de points (Fig. 6). Son avantage par rapport à Cyclone3DR est sa prise en main rapide et ses temps de traitements pratiquement instantanés. De plus, contrairement à Cyclone3DR, cette solution logicielle fournit en sortie l'ortho-photo sur laquelle il s'est appuyé pour dessiner ses polygones. Ainsi, il est plus facile d'apporter des modifications aux polygones dessinées pour conclure sur les dernières retouches du plan final en deux dimensions. Aussi, l'accessibilité aux développeurs est plutôt facile. Les performances sont encore à l'étude et seront exposées à l'oral et pendant le mémoire.

4c. Pythagoras

Ce logiciel est, à l'heure qu'il est, encore à l'étude. C'est un logiciel similaire à Autocad, qui en plus des automatisations que nous recherchons, permet de faire des livrables aux clients pour des plans, de l'exploitations de nuages de points, et autres calculs topographiques. Concernant les automatisations disponibles, ce logiciel se rapproche de Cyclone3DR dans son approche : il s'appuie sur une coupe horizontale ou verticale du nuage pour vectoriser celui-ci. Les performances seront également présentées lors de l'oral et du mémoire.

5. Conclusions, suite et fin du PFE

Le projet nous a permis de bien avancer sur l'étude d'une solution logicielle pour l'entreprise. En effet, au vu de l'attente qu'il y avait concernant ce besoins, nous avons pu déjà largement avancer sur la question de l'automatisation de certaines tâches, même si d'autres sont encore à l'étude ou en amélioration.

Nous retenons, pour l'instant, que la solution des projets linéaires, au vu des analyses de performances et des autres critères fixés, sera une utilisation simultanée des logiciels Cyclone3DR et de la suite AEC pour les marquages et les objets à profils types.

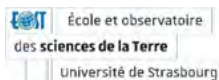
Concernant les solutions logicielles pour les projets dits de bâtiments, cela nous occupera pour le reste de la durée du projet et nous exposerons les critiques et analyses des résultats pour l'oral de Septembre ainsi que dans le mémoire.

Projets linéaires	Projets dits de bâtiments
VisionLidar	Cyclone3DR
TCP	PointCab Origin
Cyclone3DR	Pythagoras
Suite AEC	

Fig. 7 : Tableaux des logiciels étudiés jusqu'à maintenant

SURVEILLANCE GÉODÉSIQUE DE GLISSEMENT DE TERRAIN PAR INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITAIRE ET TERRESTRE : Cas du glissement de terrain du Pas de l'Ours (Hautes-Alpes)

PFE présenté par : Mathéo Metzger
Société d'accueil : École et observatoire des sciences de la Terre
Directeur de PFE : Jean-Philippe Malet
Correcteur : Gilbert Ferhat
Encadrante : Floriane Provost



1. Problématique et objectifs

L'*InSAR* (*Interferometric Synthetic-Aperture Radar*) est une technique permettant la cartographie des déformations au sein d'une zone d'intérêt. Celles-ci ne sont pas calculées directement en trois dimensions, contrairement à des méthodes plus conventionnelles, comme l'utilisation du *GNSS*. Les mesures *InSAR* sont réalisées selon les lignes de visée de l'appareil (*LOS*, pour « *Line Of Sight* »). De ce fait, nous ne disposons que d'une information, pour trois composantes de déformation de l'objet d'étude.

L'objectif principal de ce projet est de mettre en place un procédé permettant la fusion de données *InSAR* multiples, afin de calculer les déformations en trois dimensions, du glissement de terrain du Pas de l'Ours dans le département des Hautes-Alpes. Pour cela, l'utilisation de trois points de vue (illustration sur la figure 1) est nécessaire (au minimum) lorsque nous ne réalisons aucune supposition préalable. Dans le cadre de ce projet, le premier point de vue provient d'acquisitions *GB-InSAR* (*Ground-Based*). Les deux derniers résulteront de mesures satellitaires de Sentinel-1, une *LOS* provenant d'une orbite ascendante et une autre de l'orbite descendante.

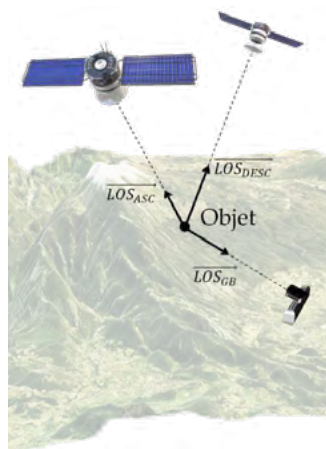


Figure 1. Illustration de trois vecteurs LOS.

2. Lieu d'étude

Le glissement de terrain du Pas de l'Ours (figure 2), situé à Aiguilles dans les Hautes-Alpes, affecte un versant situé entre 1500 mètres et 2000 mètres d'altitude, sur une surface d'environ 18 hectares (Parc naturel régional du Queyras, 2018). Le glissement semble être amplifié par des conditions climatiques anormales, telles que les fontes rapides de neige et les pluies fortes. Il s'est réactivé en 2014, détruisant quelques années après (2018), la RD947 passant en contre bas (figure 3).

3. Données et traitements

Ce projet considérera l'utilisation de trois jeux de données :

- Environ 23000 acquisitions *GB-InSAR* sur la période de début mai à fin octobre 2019.





Figure 2. Glissement de terrain du Pas de l'Ours.



Figure 3. Destruction de la RD947 par le glissement.

- Les images SAR de Sentinel-1 A/B, acquises avec le capteur C-SAR ($\lambda \approx 5.6 \text{ cm}$), en mode interférométrique, disposant de fauchées de 250 km et de résolutions spatiales 5m x 20m.
- Des séries temporelles (déformations en fonction du temps) *SqueeSAR* (Ferreti, 2011) réalisées par la société *TRE ALTAMIRA* sur la période de juillet 2018 à novembre 2019. Ces traitements emploient la technique **PS-InSAR** (**Persistent Scatterer**). Pour cette méthode, une analyse pixellaire, voir sub-pixellaire des interférogrammes est réalisée. Ces pixels sont choisis sur la base de critères comme les coefficients de corrélation, les indices de dispersion d'amplitude, etc.

De ce fait, deux jeux de données sont à traiter durant ce projet :

- Les acquisitions *GB-InSAR*, à l'aide du logiciel *IDS Georadar Guardian*, logiciel commercial spécialement dédié aux traitements des données acquises par l'appareil *IBIS-FM*. Le format des données est binaire, et sa structure est inconnue de l'utilisateur.
- Les images SAR acquises par Sentinel-1 A et Sentinel-1 B permettront, à l'aide du logiciel *GAMMA* et du module *MintPy* (Yunjun et al., 2019), le calcul de séries temporelles de la zone d'étude. Le logiciel *GAMMA* sera utilisé par le biais du site *Alaska Satellite Facility* (<https://asf.alaska.edu/>), proposant un service de téléchargement d'interférogrammes (créés à partir de deux images de phase SAR. Un exemple est visualisable en représentation colorée sur la figure 4). La méthode employée ici se nomme **SBAS-InSAR** (**Small Baseline SubSet**), employant des couples d'images SAR dont les longueurs des bases perpendiculaires et temporelles entre acquisitions sont faibles (inférieures à 300 mètres et à 60 jours respectivement). Ceci permet de réduire les erreurs dues aux décorrélations géométriques et temporelles.

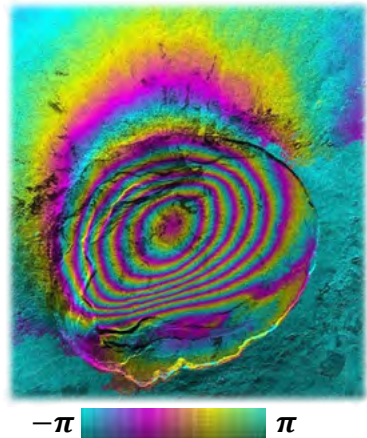


Figure 4. Exemple d'un interférogramme enroulé. © NASA

Les traitements effectués sur les résultats seront par la suite réalisés à l'aide du logiciel QGIS (notamment le module *Smart-Map*, permettant d'employer l'interpolation du krigeage ordinaire), ainsi qu'à l'aide du langage de programmation Python, simple et fortement source.

4. Calcul des déformations en 3D

- **Calcul des déformations en 3D**

Le calcul des déformations 3D passe par l'utilisation d'acquisitions selon trois points de vue, ou plus (en exploitant les moindres carrés). Des traitements employant une seule (Bardi et al., 2016) ou deux LOS (Hu et al., 2014 ; Furhmann et Garthwaite, 2019) sont envisageables, mais passent par des suppositions nécessitant des calculs de vecteurs de pente et de gradients à l'aide d'un modèle numérique de terrain. Finalement, bien que ces méthodes puissent être intéressantes à utiliser dans certains cas, l'utilisation de trois LOS reste à privilégier. L'expression mathématique d'une mesure selon une LOS (Hanssen, 2001, page 163) peut s'écrire comme suit (équation 1) :

$$\pm \|\overrightarrow{d_{LOS}}\| = \sin \theta_{LOS} * \sin G_{LOS} * d_E + \sin \theta_{LOS} * \cos G_{LOS} * d_N + \cos \theta_{LOS} * d_V \quad (1)$$

Avec :

- θ_{LOS} et G_{LOS} : respectivement l'angle d'incidence et le gisement du vecteur LOS (en considérant un système de coordonnées en projection cartographique).
- $\pm \|\overrightarrow{d_{LOS}}\|$: la mesure selon la ligne de visée, exprimée négativement si nous considérons des mesures négatives lorsque l'objet s'approche de l'appareil.
- d_E, d_N, d_V les déformations mesurées dans le système de coordonnées considéré.

De ce fait, trois équations identiques à l'équation 1, permettront l'inversion du système, d'où le besoin de trois points de vue au minimum.

- **Interpolation spatiale et temporelle**

Pour pouvoir réaliser l'inversion du système, les trois mesures selon les LOS doivent d'abord être disponibles pour de mêmes positions, et sur un intervalle de temps distinct. De ce fait, les interpolations spatiales et temporelles sont à considérer. Concernant l'interpolation spatiale, le krigeage, qui est un interpolateur géostatistique est considéré, notamment lors de l'utilisation de données éparées (typiquement les données *SqueeSAR*). Les interpolations temporelles se feront simplement par interpolation linéaire.

- **Configuration géométrique des LOS**

Une notion importante à évaluer est la configuration géométrique des trois LOS. Prenons le cas extrême (mathématiquement parlant) où les trois vecteurs LOS se trouvent dans le même plan (un des vecteurs peut s'exprimer comme combinaison linéaire des deux autres). De ce fait, le système d'équations n'est plus résoluble, une ligne de la matrice étant combinaison linéaire des deux autres. Bien que cette configuration soit anecdotique, se rapprocher de celle-ci ne l'est pas, et engendre des erreurs significatives (voire extrêmes) sur le calcul des déformations. Une étude de l'impact de la configuration géométrique sur les résultats est considérée dans ce projet, visant à évaluer le lien entre le produit scalaire entre la LOS terrestre et la normale du plan satellitaire (plan passant par l'objet considéré et défini par les vecteurs $\overrightarrow{LOS_{ASC}}$ et $\overrightarrow{LOS_{DESC}}$) (illustration sur notre zone d'étude figure 5). Si cette valeur se rapproche

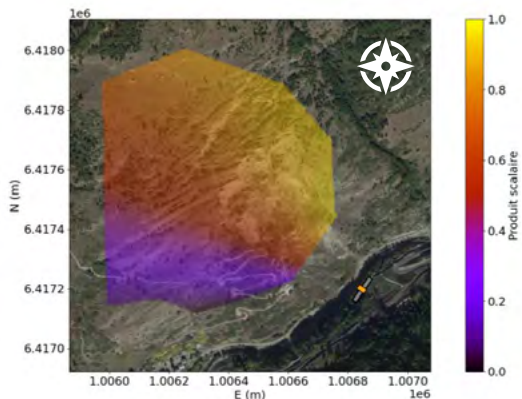


Figure 5. Produits scalaires entre la normale du plan satellitaire et les LOS terrestres pour notre lieu d'étude.



de 1, la configuration permettra une inversion des plus correctes. Une valeur de 0 traduit un vecteur LOS terrestre appartenant au plan satellitaire.

5. Conclusion et perspectives

Pour conclure, ce projet aura permis de réaliser des recherches sur des méthodes permettant de calculer les déformations 3D avec une, deux ou trois LOS, issues de jeux de données *InSAR*. De plus, nous avons pu traiter les acquisitions de Sentinel-1 par le biais du logiciel *GAMMA* accessible par *ASF*, ainsi qu'avec le module *MintPy* disponible sous Python. Ensuite, nous avons pu manipuler le logiciel *IDS Georadar Guardian*, afin de disposer des déformations du point de vue du *GB-InSAR*. Le calcul de déformations totales, du glissement de terrain du Pas de l'Ours à Aiguilles, a été accompli pour la période de début mai à fin octobre 2019. Je vous renvoie à mon mémoire pour plus de détails quant aux résultats obtenus. Nous avons pu visualiser, par le biais de ces traitements, les complications rencontrées lors de leur application. Enfin, de mon point de vue d'étudiant, ce projet m'a permis d'apprendre la méthode de l'*InSAR* (en très fine partie), que nous n'avons pas eu l'occasion d'employer à l'INSA.

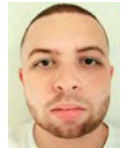
Concernant les perspectives, nous pouvons citer :

- La réalisation d'interpolations spatiales et temporelles différentes pour faire coïncider les jeux de données.
- Le calcul des déformations avec deux points de vue terrestres (considération des gradients issus d'un modèle numérique de terrain).
- L'application des moindres carrés sur un jeu de données avec plus de quatre points de vue. Une matrice des poids considérant la nature des données en entrée (précisions respectives des mesures issues de l'*InSAR* terrestre et de l'*InSAR* satellitaire) pourrait être considérée. L'emploi d'un estimateur robuste pourrait aussi être envisagé.
- Une comparaison de l'application de cette méthode, avec un jeu de données de référence, permettrait d'évaluer son efficacité.

6. Bibliographie

- Bardi, F., Raspini, F., Ciampalini, A., Kristensen, L., Rouyet, L., Lauknes, T.R., Frauenfelder, R. et Casagli, N. (2016). Space-Borne and Ground-Based InSAR Data Integration: The Åknes Test Site. *Remote Sensing*, vol.8. doi: 10.3390/rs8030237.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. et Rucci, A. (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.49, no.9, pp.3460--3470. doi: 10.1109/TGRS.2011.2124465.
- Fuhrmann, T., Garthwaite, M.C. (2019). Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. *Remote Sensing*, vol.11(3), no.241. doi: 10.3390/rs11030241.
- Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands. ISBN 90-73235-43-X. doi: 10.1007/0-306-47633-9.
- Hu, J., Li, Z.W., Ding, X.L., Zhu, J.J., Zhang, L. et Sun, Q. (2014). Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, vol.133, pp.1--17. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005.
- Parc naturel régional du Queyras (2018). *Le glissement du Pas de l'Ours* [internet]. Disponible sur <https://www.pnr-queyras.fr/le-pas-de-lours/>. Consulté le 4 juillet 2023.
- Yunjun, Z., Fattahi, H., et Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, vol.133. doi: 10.1016/j.cageo.2019.104331.

Suivi de l'évolution de la Rivière des Galets (La Réunion) depuis 1950 par analyse photogrammétrique



PFE présenté par : **Laurent Grondin**
Société d'accueil : **BRGM**
Directrice de PFE : **Claire Rault**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**
Encadrante : **Claire Rault**



1. Contexte et objectifs

Ce projet vise à étudier les changements morphologiques de la Rivière des Galets sur l'île de la Réunion, une île tropicale régulièrement impactée par des cyclones. En effet, en raison de son relief accidenté et de son climat tropical la Réunion est confrontée à de nombreux risques naturels, ce qui souligne l'importance de la caractérisation et de la prévention de ces phénomènes sur l'île. Les falaises verticales de plus de 500 mètres de haut et l'augmentation rapide de l'altitude, qui atteint plus de 3000 mètres en moins de 30 km, combinées à des cumuls pluviométriques importants, accentuent considérablement les risques naturels sur l'île. Les cyclones entraînent le plus souvent des précipitations intenses, provoquant une érosion rapide et des transformations significatives dans la morphologie des rivières. Ces phénomènes naturels peuvent engendrer des glissements de terrain, la formation de ravines et des modifications dans le tracé des cours d'eau. Les conséquences de ces changements morphologiques sont importantes, affectant non seulement les écosystèmes locaux, mais aussi les communautés humaines vivant à proximité des rivières. Afin de mieux comprendre ces phénomènes et de faciliter une gestion durable des terres ainsi que la prévention des risques naturels aux abords des rivières Réunionnaises, il est essentiel d'approfondir les connaissances sur la dynamique des cours d'eau et leurs réponses aux événements cycloniques majeurs.

Dans cette perspective, la comparaison de modèles topographiques 3D, 2.5D ou 2D de deux dates différentes permet de mettre en évidence et de quantifier les changements survenus durant la période séparant les deux dates (Feurer et Vinatier, 2018 ; Rault et al., 2020 ; Gomez et al., 2015 ; Gonçalves, 2016 ; Ishiguro et al., 2016 ; Bakker and Lane 2017). Plus les modèles sont rapprochés dans le temps plus ils permettent d'encadrer précisément l'effet d'un événement.

Dans le cadre de ce projet, les modèles topographiques sont obtenus par photogrammétrie, qui est une méthode qui permet à partir de photographies (aériennes ou terrestres) de créer des modèles 2.5D et 3D d'un objet ou d'un paysage. A partir des photographies aériennes historiques en libre accès sur le portail web de l'IGN "Remonter le temps"¹ on peut créer, grâce à la photogrammétrie, des nuages de points 3D géoréférencés. Au total on comptabilise 8 campagnes de photographies qui couvrent l'ensemble du territoire réunionnais entre 1950 et 2011. Ces campagnes encadrent 13 événements cycloniques ayant impacté la Réunion.

Les nuages de points créés sont utilisés pour générer des modèles numériques de surface (MNS) et des orthophotographies, offrant ainsi une documentation à l'échelle du territoire étudié des événements survenus depuis 1950.

En combinant les données photogrammétriques obtenues à partir de différentes époques, il est possible d'analyser les changements morphologiques de la Rivière des Galets au fil du temps. Cela permettra de mieux appréhender les processus d'érosion, de glissements de terrain et de changements de tracé qui ont façonné la morphologie actuelle de la rivière. Cependant, l'utilisation de photographies aériennes à la Réunion présente des défis particuliers en raison de la topographie et du climat de l'île.

¹ <https://remonterletemps.ign.fr/>



Tout d'abord, toutes les photographies aériennes prises depuis un avion présentent le même angle de vue. De plus, le climat tropical et les variations de relief importantes nécessite plusieurs campagnes de prises de vues pour une même période. En effet, les changements météorologiques peuvent entraîner la présence de nuages ou d'ombres importantes durant lesquelles des changements peuvent avoir eu lieu. Cependant, la réalisation de plusieurs campagnes pour une même période présente également des avantages, car certaines zones sont photographiées à plusieurs reprises, permettant ainsi d'obtenir une meilleure superposition des images. La prise en compte de ces facteurs est essentielle pour garantir des résultats fiables et précis dans la modélisation et l'évaluation des risques naturels sur l'île.

En résumé, les objectifs de ce projet visent à étudier l'évolution de la rivière des Galets depuis 1950 en **construisant des MNS et des orthophotographies**, de quantifier la résolution et précision des modèles créés, d'identifier les limites et points forts pour caractériser les phénomènes en jeu à partir des modèles créés et de documenter les changements majeurs, liés à l'impact des cyclones sur une longue période, que l'on peut observer. En comparant les modèles, nous serons possiblement en mesure **d'évaluer le bilan sédimentaire entre les différentes époques, en identifiant les zones où des changements significatifs se sont opérés (dépôt ou érosion des sédiments recouvrant le lit de la rivière)**. De plus, ces comparaisons nous permettront **d'obtenir une estimation du débit solide**, c'est-à-dire la quantité de matériau solide transporté par la rivière pendant un événement météorologique. En analysant la capacité de transport de la rivière, nous pourrons mieux **comprendre les processus de transport sédimentaire et les impacts des événements météorologiques intenses sur le paysage fluvial**. En plus de ces différents objectifs les MNS et orthophotos créés seront utiles au BRGM pour d'autres projets, par exemple la localisation et la caractérisation quantifiée des glissements de terrains qui peuvent entrer dans notre zone d'étude.

2. Création des MNS et orthophotos

Les photographies historiques ont été scannées à hautes résolution et mises en ligne par l'IGN. Les photographies utilisées dans cette étude sont des photographies argentiques. On retrouve donc sur certaines photos de la poussière ou des rayures dues à la mauvaise conservation des photos et à la numérisation. Concernant le contenu de ces photos, on retrouve aussi sur chaque photo une bande noire qui comprend les informations de vol ainsi que des repères de fond de chambre. Les paramètres de caméra nécessaires à la reconstitution 3D de ces campagnes ne sont néanmoins pas fournies. On constate également que ces photographies n'ont pas été scannées dans un même repère. Or pour faire de la construire des modèles photogrammétriques avec plusieurs de ces images et estimer les paramètres de caméra est nécessaire que ces fichiers soient strictement comparables. Préalablement à la création des différents modèles photogrammétriques sous le logiciel Agisoft Metashape, il faut donc tout d'abord télécharger toutes les photos au sein de la zone d'étude, et préparer les photographies pour qu'elles soient comparables. Ces traitements sont effectués à l'aide d'un code Python développé par le BRGM.

2.0. Mesure et sélection des points de contrôles

Les points de contrôle sont essentiels pour une orientation précise des photographies aériennes. Les points sont repérés sur QGIS à l'aide d'orthophotographies de 2017 et 1950. En effet, dans le meilleur des cas les points de contrôles repérés sont des points visibles en 1950 et encore aujourd'hui, dans le but de pouvoir utiliser ces points pour tous les modèles. A la suite du repérage sur QGIS, ces points sont mesurés sur le terrain à l'aide d'un GNSS avec une précision de 1 à 3 cm. Dans le cadre de ce projet certains points sont inaccessibles en voiture, il faudrait une journée de marche pour y accéder, on a donc opté pour une solution alternative pour certains points qui est d'extraire les coordonnées du point à partir d'un MNT raster de 2016 ayant une résolution de 1 mètre.

2.1 Traitement des données sur Agisoft Metashape

Le traitement des données se fait selon plusieurs étapes et tous ces traitements sont effectués sur Agisoft Metashape. Lors de la création du projet on fait attention à sélectionner le système de coordonnées correspondant local aux données géodésiques (qui se retrouve sur Metashape avec

EPSG : 2975), puis importer toutes les photos et les « markers » qui correspondent aux points d'appuis et de contrôle. Le but de ce projet est non seulement de calculer des MNS mais aussi de caractériser les changements que l'on peut observer entre époques différentes. C'est pourquoi dans chaque projet Metashape créé on aura des photographies aériennes de 3 époques différentes. On applique cette méthode car lors de la comparaison des MNS dans la suite du projet, si l'on compare deux MNS issus d'un alignement de photos différent alors cela peut engendrer des erreurs supplémentaires. On peut éviter cela en effectuant un co-alignement (Feurer et Vinatier, 2018).

La première étape de traitement de ces photos consiste à créer des masques. Un masque est utilisé dans Metashape pour spécifier les zones des photos qui peuvent conduire à des résultats de reconstruction incorrects et donc restreindre l'influence de ces parties de l'image. Travaillant sur une rivière jusqu'à son embouchure, on a de nombreuses photos qui couvrent le littoral de la Réunion, ainsi on se retrouve avec une importante partie de certaines photos qui couvrent la mer. Et comme évoqué dans le paragraphe précédent sur certaines campagnes photos il y a des photos sur lesquels les nuages sont présents. Pour que le logiciel de calcul puisse par la suite calculer des « Tie Points » et faire une correspondance entre ces points entre deux photos il faut pouvoir enlever ces parties de mer et de nuage sur les photos. C'est donc pour cela que l'on crée des masques sur Metashape, cette étape peut s'avérer assez longue puisqu'il faut être minutieux dans la création des masques pour perdre le moins d'information possible.

On peut donc passer à l'une des étapes les plus importantes du traitement, et à laquelle il faut être particulièrement rigoureux, qui est le positionnement des GCP (Ground Control Points) et CP (Check Points). On s'est fixé un seuil à respecter pour l'erreur de pointage de points sur Metashape, sur chaque point il faut que l'erreur en pixel soit subpixelaire (erreur en dessous de 1 pixel) et une erreur en mètre idéalement en dessous de 1 mètre. Concernant la sélection des GCP parmi l'ensemble des points disponibles, cela se fait en tenant compte de leur répartition spatiale, avec une attention particulière portée à la Rivière des Galets, qui constitue l'objet principal de notre étude. Une fois tous les points positionnés sur les photos, on peut utiliser la fonction « Align Photos » de Metashape qui permet d'aligner et d'orienter les photos. Selon le résultat obtenu sur les erreurs des points notamment l'erreur en mètre on peut être amené à déplacer certains points sur les photos ou même supprimer la projection d'un point sur une photo si l'on se rend compte que celui-ci amène beaucoup trop d'erreurs.

Après le co-alignement, plusieurs "Chunk" sont créés en dupliquant le modèle existant. Dans chaque nouveau "Chunk", les photos de deux époques sont désactivées, il y a donc uniquement les photos d'une époque par Chunk qui sont utilisées par la suite. Ensuite, le calcul du nuage de points dense est effectué avec l'outil "Build Dense Cloud" de Metashape, puis la génération du MNS (Modèle Numérique de Surface) correspondant avec "Build DEM". En utilisant ce MNS, la création de l'orthomosaïque se fait avec "Build Ortho".

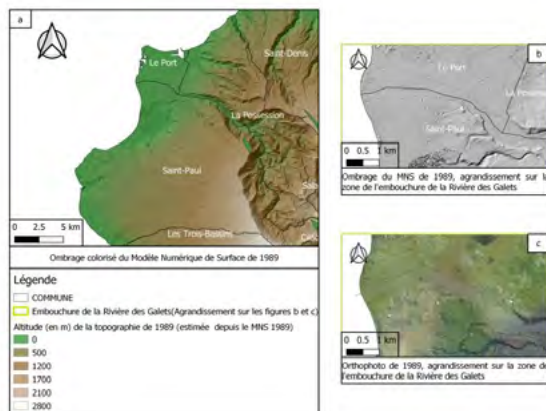


Fig. 1 : MNS et orthophotographie créés à partir de photographies aériennes historiques de 1989 (campagne : 92PHQ6002). a. MNS du bassin versant de la Rivière des Galets, Agrandissement du MNS (b.) et de l'orthophotographie (c.) au niveau de l'embouchure de la rivière.

3. Résolution et qualité des données produites

Avant de pouvoir utiliser les données produites pour faire des analyses approfondies sur la morphologie de la Rivière des Galets, on va tout d'abord caractériser la précision de ces données. L'idée du co-alignement des photographies effectués lors du traitement n'a pas pour but d'avoir un modèle d'une année très précis mais plutôt d'avoir une meilleure précision relative entre deux MNS successifs. Pour caractériser cette précision relative entre deux MNS, on utilise QGIS dans un premier temps et des codes Python par la suite. L'utilisation de QGIS va être utile pour fusionner les dalles MNS extraites de Metashape et rééchantillonner les MNS à la même résolution (soit 1 mètre). Par la suite, deux codes Python sont utilisés, l'un pour calculer un DOD (Différence de MNS) et le deuxième pour calculer un histogramme qui comprend la médiane, le 1^{er} quartile et le 3^{ème} quartile. Pour calculer ces statistiques on compare le DOD calculé précédemment à un raster qui correspond à des surfaces planes. Nous identifions ces zones planes et relativement stables depuis 1997 pour comparer les MNS avant de passer à l'analyse géomorphologique. Les zones concernées sont des toitures de maisons planes, des terrains de sport et des parking, réparties sur toute la zone d'étude. La valeur de la différence de ces deux rasters doit normalement être proche de 0.

Cernant la résolution des données produites, pour les années 1989 et 1984, les résolutions des MNS créé et extrait de Agisoft Metashape sont de 57.4 cm/pixel et 72.5 cm/pixel.

Précédemment, des modèles ont pu être créés pour les années de 1997 et 2003 avec une précision relative entre deux MNS de 50cm. Cette précision correspond à l'ordre de grandeur souhaité pour analyser les époques étudiées dans le cadre de ce projet.

4. Analyse des changements morphologiques de la Rivière des Galets

Les analyses effectuées ont pour objectif de caractériser les changements morphologiques survenus entre deux périodes successives, en se basant sur une approche cartographique. Tout d'abord, des analyses spatiales sont réalisées sur des sections transversales de la rivière des Galets en utilisant les Modèles Numériques de Surface générés. Ces analyses permettent de cartographier les zones d'érosion et de dépôts au sein de la Rivière des Galets entre les deux périodes étudiées. De plus, elles fournissent également des estimations des volumes de sédiments déplacés entre les deux époques.

En parallèle, une autre analyse spatiale est réalisée le long d'un profil longitudinal de la rivière. Cette analyse vise à caractériser les variations morphologiques le long de cette trajectoire spécifique, en mettant en évidence les éventuels changements de limites de berges, les zones de lit mineur ou majeur, les chenaux principaux et d'autres paramètres pertinents.

5. Conclusion et perspective

Ce projet de fin d'étude a permis d'exploiter des photographies aériennes historiques pour la création de Modèles Numériques de Surface (MNS) et d'orthophotographies, couvrant différentes périodes à partir de 1984. Les modèles obtenus présentent une précision infra-métrique, offrant ainsi la possibilité de quantifier les changements significatifs survenus dans la rivière des Galets entre 1997 et 1984. Plus précisément, le modèle de 1997 a atteint une précision de 50 cm.

Cette étude a permis de suivre l'évolution de la rivière des Galets sur la période allant de 1997 à 1984, et d'établir des liens entre cette évolution et les différents événements majeurs, tels que les cyclones Hollanda en 1994, Colina en 1993, Firinga en 1989, Clotilda en 1987 et Célestina en 1985. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour mieux comprendre les dynamiques de la rivière des Galets et les impacts des événements climatiques majeurs sur sa morphologie.



Acquisition photogrammétrique par smartphone et production automatisée d'orthophotos dans le cadre d'inspection détaillée d'ouvrage

PFE présenté par : Charline POTVIN
Société d'accueil : SITES
Directeur de PFE : Matthieu HANSEN
Tutrice de PFE : Mai-Linh RUIZ
Correcteur : Pierre GRUSSENMEYER



1. Contexte et objectif de l'étude

SITES est un partenaire global et indépendant au service de la durabilité des actifs structurels exceptionnels. Les objectifs de la société sont les suivants :

- Évaluer la performance structurelle de l'ouvrage d'infrastructure et de ses avoisinants naturels ou construits,
- Suivre et analyser son évolution face aux sollicitations du temps, de son exploitation, des modifications de son environnement et du changement climatique,
- Détecter au plus tôt les signaux faibles de son altération qui remettraient en cause ses fonctions,
- Proposer, préconiser, instiguer les actions à entreprendre pour rétablir sa performance à court et long terme,
- S'assurer de la bonne mise en œuvre des actions de réparation ou de maintenance et de la validité de leur effet sur la durabilité.

Les inspections visuelles et diagnostics des ouvrages nécessitent des fonds de plan qui ne sont pas toujours disponibles. Les temps d'intervention in situ se trouvent alors rallongés avec les conséquences que cela implique (fermeture de route, balisage, moyens d'accès spécifiques, ...).

Le but du projet est d'élaborer un protocole d'acquisition photogrammétrique et de traiter les images obtenues de manière semi-automatique pour créer un fond de plan à l'échelle depuis une orthophoto. Il se base plus particulièrement sur les besoins de l'agence qui a récemment renouvelé un contrat avec une collectivité et qui consiste à recenser et à inspecter les ponts et murs de soutènement dont elle a la charge. Il est question ici de plus de 10 000 ouvrages.



Fig. 1 : Exemple d'ouvrage à inspecter (source : Google Maps)

Plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour ce projet :

- **Facteur technique** : prises de vue parfois difficiles qui peuvent compromettre le bon traitement des données,
- **Facteur humain** : ne pas alourdir la mission terrain avec un protocole long et compliqué à mettre en œuvre, il faut qu'il soit accessible et compréhensible.

Utiliser le smartphone comme moyen de mesure répond au mieux à ces deux facteurs car il est simple à transporter, accessible dans son utilisation et possède des focales fixes. De plus, les



photos possèdent une résolution de 12 à 24 Mégapixels ce qui le rend intéressant pour de la photogrammétrie.

Il faut rappeler que ce projet cherche à optimiser les méthodes de lever déjà existantes en y apportant un point de vue topographique. Il n'est pour l'instant pas question de haute précision mais plutôt de mettre en place une méthode qui fiabilise les données et simplifie leur traitement dans le but de pouvoir dessiner un fond de plan de l'ouvrage avec ses équipements (barbacanes, dispositif de retenue, ...) et ses dimensions (Hauteur, ouverture, épaisseur, ...).

2. L'inspection détaillée d'ouvrage

Ce projet est lié aux activités du groupe Inspection et Diagnostics d'Ouvrages (IDO) et à ses méthodes de mesures.

Plus globalement, il est question de définir ce qu'est la surveillance d'un ouvrage d'art :

« Ensemble des contrôles et des examens permettant de suivre son état afin de réaliser en temps utile les opérations d'entretien et, le cas échéant, de déclencher les mesures de sécurité nécessaires », (ITESOA, 2010)

Actuellement, une inspection se déroule selon les étapes suivantes :

1. Relevé des données caractéristiques de l'ouvrage :
 - Prise de vue pour les ponts : Photo du dessus sur route circulée dans le sens des Points de Repère (PR), de l'élévation amont, de l'élévation aval et de l'élargissement si existant.
 - Prise de vue des murs : Photo du dessus sur route circulée dans le sens des Points de Repère (PR) et de l'élévation.
2. Relevés dimensionnels : Relevés des informations des fiches, une seule élévation par ouvrage.
3. Relevé des désordres : Inspection visuelle dite « main sur l'ouvrage » afin de repérer les principaux désordres sur parements visibles. Prises de vue des désordres.
4. Réalisation des plans sous format DAO : Vue en plan, élévation, coupe transversale. Pour les murs les mesures sont complétées par : longueur, épaisseur, hauteur maximale et élévation tous les 4 mètres.

Les mesures sont réalisées en cotes cumulées depuis l'origine du mur à la roue de mesure arrondie au décimètre. La hauteur est mesurée par rapport au sol au distancemètre arrondie au centimètre. Enfin, le plan est dessiné à partir des croquis qui ont été faits sur le terrain et imprimés à une échelle de 1/100 voire 1/200 pour les grands ouvrages. A terme, ce sont ces croquis que nous voulons remplacer par des orthophotos dont l'acquisition des photos aura été faite lors de la visite de l'ouvrage.

3. Matériel d'acquisition

Comme dit précédemment, nous cherchons à optimiser l'inspection des ouvrages c'est-à-dire : fiabiliser les données, faciliter et réduire leur temps de traitement.

Le smartphone est le moyen d'acquisition le plus intéressant au vu de tous ces critères. Il est donc possible d'alléger le travail des techniciens IDO à la fois sur le terrain (avec du matériel simple à utiliser) et au bureau (il n'y a plus besoin d'analyser les croquis de terrain).

Nous disposons d'un **Samsung Galaxy A31** qui est composé de quatre capteurs : un capteur principal, un capteur grand angle, un capteur macro et un capteur de profondeur. Ce sont les deux premiers capteurs qui sont utilisés.

Le grand angle permettrait d'acquérir moins de données sur le terrain, d'offrir un plus grand recouvrement et de réduire le temps de traitement mais présente aussi plus de distorsions.

Afin de déterminer l'objectif qui est le plus approprié à ce projet, la comparaison est faite avec l'appareil actuel qu'utilise SITES Provence : le CANON EOS 500D.



Fig. 2 : Canon EOS 500D (Source : lesnumeriques@2023)

Appareil d'acquisition	Samsung Galaxy A31 5G		CANON EOS 500D
Capteur utilisé	Capteur principal	Capteur grand angle	Capteur principal
Focale réelle (mm)	4.6	1.42	18 (pour le projet)
Ouverture	f/2.0	f/2.2	f/3.5-f/5.6
Taille capteur (mm)	6.4mm x 4.8 mm	3.2 mm x 2.4 mm	22.3 mm x 14.9 mm
Type	CMOS	CMOS	CMOS
Résolution maximale	4000 x 3000 pixels (majoritairement utilisé)	2448 x 3264 pixels	4752 x 3168 pixels
	12 MP à 48 MP	8 MP	15.1 MP

Tableau 1 : Caractéristiques des appareils d'acquisition

4. Acquisition des données photogrammétriques par smartphone

Les mesures tests sont réalisées sur un mur qui correspond au mieux aux conditions réelles du terrain : peu de recul, hauteur importante de l'ouvrage, peu de détails, exposition différente sur tout l'ouvrage...

	Capteur principal	Capteur grand angle	CANON EOS 500D
Taille de photosite (mm)	0.0016	0.0011	0.0047
GSD (mm)	0.90	1.90	0.70
Horizontal FOV (m)	3.76	6.08	3.35
Vertical FOV (m)	2.82	4.56	2.24
Nombre de photos total	81	34	180

Tableau 2 : Paramètres à respecter pour la prise de vue pour une distance objet de 2.70 mètres et un ouvrage de 30 mètres de longueur et 4 mètres de hauteur.

Le nombre minimal de photos nécessaire pour une acquisition avec le capteur grand angle est le moins élevé. C'est ce capteur qui nous intéresse pour le futur protocole à condition que la déformation des dimensions de l'orthophoto ne soit pas trop importante. De plus, afin d'optimiser la calibration des caméras et éviter la courbure des bandes, il faut réaliser des photos obliques en supplément des photos déjà prévues dans les calculs théoriques.

Avant toute acquisition numérique, la calibration des trois appareils est réalisée. Elle est d'autant plus nécessaire que les deux objectifs du Samsung Galaxy A31 et plus particulièrement le grand angle créent de fortes déformations aux bords des images. Des cibles automatisées sont posées sur l'ouvrage et mesurées au tachéomètre pour être connues en coordonnées locales.

Enfin, des barres de mise à l'échelle de 1 mètre sont fixées horizontalement et verticalement sur le mur. Elles vont permettre à la fois de définir l'échelle mais aussi de créer un plan de projection orienté lors de la création de l'orthophoto depuis le modèle 3D généré.



Figure 3 : Barres de mise à l'échelle utilisées



5. Traitement et semi-automatisation

Les nombreuses cibles utilisées lors des tests n'ont pour but que de contrôler les mesures. À terme, seulement les barres de mise à l'échelle seront à placer sur l'ouvrage.

Pour le moment, il n'est question que de semi-automatisation car il faut encore pouvoir contrôler un élément du traitement : Le pointage manuel des cibles non détectées automatiquement par le logiciel (seulement quatre cibles).

Quel que soit le type de capteur utilisé, les étapes de traitement et donc du script sont :

1. Chargement des photos et alignement,
2. Détection des cibles et pointage manuel si détection incomplète puis alignement,
3. Détermination des échelles,
4. Génération du nuage de points dense et du modèle 3D à partir des cartes de profondeur,
5. Génération de l'orthophoto selon les axes des barres de mise à l'échelle.



Fig. 4 : Orthophoto obtenue à partir de l'acquisition de l'objectif grand angle du Samsung Galaxy A31 (sans échelle)



Fig. 5 : Orthophoto obtenue à partir de l'objectif principal du Samsung Galaxy A31 (sans échelle)

6. Évaluation de la méthode

Rappelons que le but de ce projet est de dessiner le plan de l'ouvrage à partir de l'orthophoto, il est encore une fois nécessaire de choisir la méthode la plus adaptée à la situation et qui permet d'obtenir le résultat souhaité.

Il est déjà possible de dire que l'objectif grand angle est intéressant au vu du résultat que l'on obtient : il permet de générer une orthophoto non déformée, avec les détails du mur visibles, faciles à représenter et sans utiliser un croquis.

Il est important de souligner que certains ouvrages ne peuvent pas être mesurés, il faudra donc quantifier le nombre exact qu'il est possible de mesurer et décrire au mieux les conditions optimales qui permettront de mettre en application le nouveau protocole ou de garder l'ancienne méthode.

7. Conclusion et perspectives

Pour conclure, utiliser le smartphone pour créer une orthophoto dans le but de dessiner un fond de plan est intéressant. La qualité des photos que propose le Samsung Galaxy A31 est tout à fait acceptable dans le cadre de ce projet et de cette recherche de rapidité et optimisation de la méthode actuelle. Même avec ces critères, nous voulons également pouvoir dessiner les détails de l'ouvrage tels que les drainages, les joints entre les plaques ou encore les différences de revêtement...

Un protocole à suivre par les opérateurs IDO sera établi. Il leur permettra de dessiner, à partir de l'orthophoto générée, un fond de plan où les désordres seront reportés.

Il reste à déterminer la précision que permet d'atteindre cette méthode et d'en définir ses limites afin d'optimiser la qualité du plan de l'ouvrage.

Amélioration de la précision des mesures à partir d'un scanner cinématique SLAM sac-à-dos

PFE présenté par : Hugo Veverka
Société d'accueil : KADRAN Ingénierie
Directeur de PFE : Marc Daeffler
Correctrice : Hélène Macher
Encadrant : Maël Moreau



1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de fin d'études se concentre sur le BMS3DHD5+ de l'entreprise Viametris, un système MMS en back pack récemment acquis par KADRAN Ingénierie notamment pour produire des Plan de Corps de Rue Simplifié. Ce scanner mobile n'est pour l'instant utilisé que pour lever les endroits piétons non accessibles par les autres systèmes de cartographie mobile montés sur un véhicule comme le ROBIN Precision ou le Street Mapper V. Cependant, si le système ROBIN est maîtrisé et connu par l'entreprise, ce n'est pas le cas du système BMS3D. En effet, sa précision n'est pas encore fiable et les résultats ne sont pas satisfaisants dans certaines situations. Il y a en particulier 3 types de zones qui entraînent des incertitudes et complications :

- Zone dense : hypercentre, végétation abondante
- Problème de couverture GNSS
- Zone dégagée sans éléments identifiables : champs, plage, parking
- Problème d'initialisation SLAM
- Secteur à éléments réguliers/répétitifs : tunnel lisse, parking souterrain vide
- Problème de calcul SLAM

L'entreprise Viametris a développé une approche hybride pour ses scanners dynamiques associant IMU (Inertial Measurement System), GNSS et SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Le système back pack est donc censé répondre à toute situation en faisant travailler ensemble ces technologies. Il est composé de :

- Un récepteur GNSS Septentrio
- Une centrale inertielle SBG-SYSTEMS Ellipse-D
- Deux scanners-laser Velodyne HDL32 et VLP16
- Une caméra panoramique Ladybug 5+

La centrale inertielle permet de calculer la trajectoire précise mais avec une dérive au fil du temps corrigée par le positionnement par satellite apporté par le GNSS, moins précise mais avec une cohérence constante. Les scanners permettent à la fois de mesurer le nuage de points mais également de permettre le calcul SLAM, qui est complètement autonome et nécessite seulement des points d'accroches et amers présents dans l'environnement levé pour pouvoir déterminer la trajectoire et cartographier la zone levée en simultané. Le SLAM subit également une dérive en fonction de la distance parcourue. C'est principalement sur cette technologie, essentielle dans le fonctionnement du système, que le projet de fin d'étude va se concentrer afin de pouvoir répondre aux demandes de l'entreprise.

L'objectif est donc de comprendre comment gérer les différentes situations d'acquisition avec cet appareil en prenant en compte tous les paramètres qui pourraient détériorer le résultat des mesures et améliorer la précision des données obtenues.



Figure 1 : Le BMS3D HD5+ de Viametris

2. Analyse des méthodes d'acquisition et traitement

Avant de pouvoir commencer les analyses, il était important de se familiariser avec le système « back pack » et ses logiciels de traitement. Pour ce faire, des sessions de mesures ont été réalisées à Luçon et Lyon puis traitées avec l'aide des procédures d'acquisition de traitement et en explorant les différents paramètres des logiciels. On a donc PPIMMS, qui sert à traiter les données trajectorielles et les nuages de points et Qinertia, qui sert à traiter les données de navigation GNSS et inertielles. Sur PPIMMS, il était pertinent d'observer les différences entre les algorithmes SLAM et d'étudier l'impact des calculs de contraintes de navigation, de détection de boucles, importation de points externes et autres outils d'analyse comme les coupes, mesures de distances... Sur Qinertia, la plupart des modifications à apporter se font au niveau du choix de la station de référence, il est possible de prendre en compte des bases permanentes du réseau RGP plus ou moins proches, modifier leurs coordonnées, calculer un Virtual Reference System... Après avoir bien pris en main l'appareil ainsi que ses logiciels de traitement, la mise en place des différentes études pouvait commencer.

L'un des problèmes de la technologie SLAM est le phénomène de dérive. Cette dérive est due à son approche incrémentale. Les capteurs ont un certain niveau de bruit et les erreurs s'accumulent au fil du temps. Afin de mieux la compenser, il a d'abord fallu quantifier cette dérive et comprendre son comportement, ainsi que, si nécessaire, établir une distance ou durée limite d'acquisition.

Pour ces tests, il était judicieux de choisir une zone dégagée pour assurer une bonne couverture satellite dans un lotissement avec beaucoup de mobiliers urbains et d'amers pour le bon fonctionnement du

calcul SLAM, dans laquelle il est possible de faire plusieurs tours afin de pouvoir comparer chaque passage entre eux. Après avoir levé des points de contrôle en RTK, deux sessions de deux acquisitions ont été mesurées avec comme parcours dans chacune d'elles trois tours de quartiers à comparer pour observer le comportement régulier ou non de la dérive. Les tours sont parcourus en 20 minutes à pied, ce qui nous donne des acquisitions d'une heure, amplement suffisant pour atteindre une durée trop longue, le constructeur conseillant de ne pas dépasser 30 minutes d'acquisition. Les contraintes de navigation ont été calculées sur Qinertia et seules celles des premiers mètres sont conservées dans le nuage afin de géoréférencer et pouvoir mesurer les écarts. Pour chaque acquisition, 2 algorithmes de calcul SLAM différents ont été utilisés : le SLAM F conseillé par le constructeur et le calcul en triple résolution, plus robuste.

Les courbes obtenues montrent un comportement régulier de la dérive entre les différents tours de levés, les différentes acquisitions et même sessions, ce qui est un résultat rassurant car elle peut être quantifiée et mieux compenser. Les mesures m'ont permis d'observer que les écarts en Z sont croissants et homogènes, mais les écarts en XY augmentent au fil du temps. Ce qui expliquerait la limite de 30min fixée par le constructeur.

En prenant en compte pour les variables XY les lignes droites de l'acquisition et pour le Z l'endroit du levé le plus défavorable, on obtient une dérive pour le 1^{er} algorithme de 20 pour 1000 en Z (2cm par m) et 15 pour 1000 en XY (1,5cm par m) et pour le 2^{ème} algorithme de 20 pour 100 en Z (2cm par m) et 30 pour 1000 en XY (3cm par m). Ce résultat est assez important mais les données de positionnement absolu et les calculs de détection de boucles ne sont pas inclus dans les mesures. De plus, le SLAM

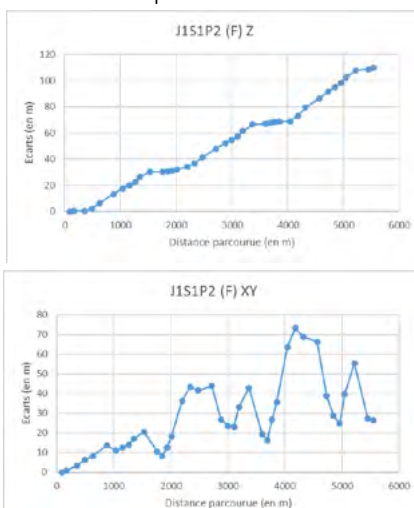


Figure 2 et 3 : Écarts entre le nuage et les points de contrôle selon la distance parcourue en Z et en XY

étant de base une technologie faite pour des levés intérieurs, il est normal que la dérive de la trajectoire brute sans correction aucune soit plus importante en extérieur.

Pour compenser cette dérive sans données de navigation, une solution possible est le calcul de contrainte de boucles, grâce à un algorithme de détection de points homologues dans le logiciel.

Pour pouvoir bien observer l'impact des boucles sur la dérive du SLAM, des acquisitions sur la même zone que la 1^{ère} étude ont été réalisées afin de pouvoir mesurer l'évolution des écarts pour chaque point de contrôle.

En effet, il suffit d'un seul passage commun sur la zone d'acquisition pour que le logiciel détecte les points homologues entre les 2 boucles de lever et réduise drastiquement le phénomène de dérive du nuage de point :

On observe que la dérive est minimisée et que les écarts sont réduits. Les deux pics correspondant au 2 points les plus éloignés du passage commun.

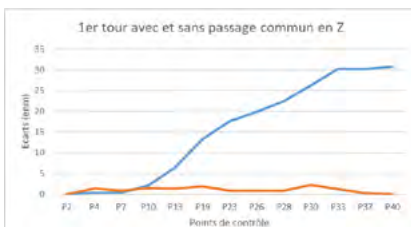


Figure 4 : Comparaison des écarts entre une acquisition avec et sans boucle

3. Amélioration de la précision des données

Après avoir observé les comportements des calculs du BMS3D selon les différentes possibilités d'acquisition et de traitement, l'objectif est d'apporter des solutions concrètes pour obtenir une meilleure qualité à partir des mesures du système. La distance maximale de boucles à mettre en place dans une acquisition ou le nombre minimal de points d'appui à mesurer selon les différentes situations de levé sont des résultats importants pour permettre à l'entreprise d'atteindre les attentes du client et les siennes en termes de précision. Pour la suite du PFE, le logiciel TerraScan sera plus approprié que PPIIMMS, car il permet de manipuler le nuage avec plus de possibilités et surtout permet une meilleure précision de pointage, ce qui est très important pour la qualité des mesures.

Maintenant que la dérive de l'appareil est quantifiée et qu'on connaît son comportement selon la durée d'acquisition, on peut commencer à s'intéresser à la précision du nuage de points. Dans un premier temps, on va s'intéresser à la qualité de la trajectoire brute des acquisitions sans contraintes de navigation GNSS. La première étude s'est portée sur la mise en place de boucles. Pour ce faire, une

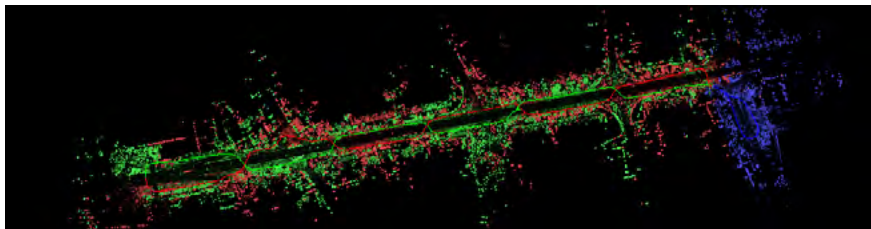


Figure 5 : Vue du dessus du nuage de points de l'acquisition avec boucles de 75m sur TerraScan

zone de levé assez large entre 2 voies de tramway a été choisie pour permettre une session de mesures « en boucles » et des cibles carrées de 40/40cm ont été découpées puis bombées à la peinture blanche afin de pouvoir les visualiser sur le logiciel grâce à la réflectance des points. Les points de contrôle ont été matérialisés (comme ci-contre) tous les 50m de chaque côté de la rue sur 500m. Les écarts ont d'abord été mesurés pour 3 acquisitions d'une seule boucle de 150m, 300m et 500m et après export des nuages de PPIIMMS et mesure sur TerraScan, on observe que la dérive est très amoindrie par la fermeture de boucle. Comme vu précédemment, le phénomène s'amplifie avec la distance mais reste dans un rapport de 1 à 3 pour 1000 au lieu de

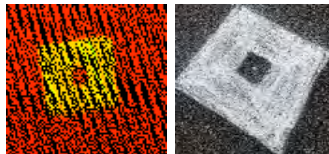


Figure 6 et 7 : Matérialisation et visualisation de la cible



15 pour 1000. Ensuite, trois autres acquisitions sur une distance de 500m ont été levées mais en changeant de côté de la rue tous les 25m, 75m et 125m afin de créer plusieurs boucles de longueurs

Point	Écart 3D (en m)
C11	0,021
C10	0,145
C9	0,386
C8	0,476
C7	0,277
C6	0,269
C5	0,848
C4	1,588
C3	2,181

Figure 8 : Extrait du tableau des écarts de l'acquisition avec boucles de 25m

différentes le long de l'acquisition. Les écarts sont amoindris de manière similaire pour les trois acquisitions avec une dérive d'environ 5 pour 1000, cependant on observe que la dérive SLAM est complètement corrigée les premiers mètres (300m pour des boucles de 25m comme vu ci-contre, 200m pour des boucles de 75m et 150m pour des boucles de 125m). La mise en place de boucles a donc un impact marqué sur la dérive sur des longues distances et permet une correction complète de la dérive sur une distance plus courte. On peut donc supposer que, dans une zone sans couverture GNSS et avec possibilité de boucles, il serait préférable de faire des acquisitions courtes.

Toujours sans intégrer les données de navigation dans les calculs, une étude similaire est faite au cours du stage pour déterminer le nombre de points de calage nécessaire pour obtenir la précision demandée par le client. A la fin du projet, l'objectif est de pouvoir obtenir la meilleure précision de points possible dans une zone de levé sans couverture GNSS.

Dans un second temps, l'étude s'est portée sur l'amélioration de la précision des mesures dans des situations avec une couverture GNSS. L'objectif est d'obtenir une précision absolue en dessous de 5cm. Pour le moment, l'étude se concentre sur la minimisation des écarts entre le nuage et les points de contrôle après chaque étape de calcul :

- Contraintes de navigation GNSS seules
- Contraintes de navigation + contraintes de boucles
- Contraintes de navigation + contraintes de boucles + importation des données de l'attitude
- Contraintes de navigation + boucles + importation des données de l'attitude + importation de points de calage

Dans une zone de levé optimale (mobiliers urbains pour le calcul SLAM, assez dégagée pour la qualité des données GNSS et avec un trafic moindre pour la mise en place de boucles régulières), après calcul de contraintes de navigation et de boucles, les écarts sont compris entre 1 et 7cm (avec une précision absolue de 1,5cm pour les points de contrôle). Ils seront amoindris avec la mise en place de points de calage et correction de l'attitude inertielle.

Dans la suite du projet, nous allons procéder une nouvelle fois aux mesures de ces écarts mais avec cette fois une station GNSS en base, qui remplacera les bases du réseau RGP dans le logiciel de traitement QInertia. Cette base, étant bien plus proche que les stations permanentes, devrait pouvoir améliorer encore davantage la précision absolue de la position du système.

4. Conclusions et perspectives

Le système BMS3D peut donc répondre aux exigences de l'entreprise et atteindre la précision demandée mais avec certaines conditions. En effet, pour respecter les tolérances souhaitées, il faudra mettre en place au mieux les contraintes mise en avant par l'étude, notamment en ce qui concerne le nombre de points de calage, les longueurs de boucles et les distances à ne pas dépasser selon les conditions du levé. Ces contraintes demandent du temps, des moyens humains (si une base GNSS en pivot est envisagée) et donc représentent un certain coût. Aussi, l'appareil reste encore très dépendant de son environnement et ne pourra pas satisfaire tous les besoins de l'équipe MMS. Il reste encore la problématique de répétition d'amers réguliers ou bien celle de l'absence de mobiliers urbains, essentiels pour le calcul SLAM. Cependant, maintenant que les limites de l'appareil sont plus connues, la procédure d'acquisition peut être adaptée en fonction de la demande du client et selon le type d'environnement à lever avant même la campagne de mesures, afin de répondre au mieux aux exigences de l'entreprise et ses collaborateurs.

De nombreuses pistes pertinentes n'ont pas pu être explorées dans le PFE comme l'utilisation plus poussée des données inertielles du système en mettant de côté le SLAM, notamment en trottinette, ou encore la mise en place d'objets 3D irréguliers pour créer assez d'amers pour le calcul qui permettraient une maîtrise du système BMS3D encore meilleure.

Optimisation de la réalisation de plans de façades utilisés pour l'isolation par l'extérieur des bâtiments, à l'aide de panneaux préfabriqués

PFE présenté par : **Iona HAZARD**
Société d'accueil : **CAMPENON BERNARD TOPOGRAPHIE**
Directeur de PFE : **Thomas NALLET**
Corretrice : **Tania LANDES**
Encadrant : **Cédric PETITJEAN**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, l'État français a mis en place le Plan de Renovation Énergétique des Bâtiments (PREB), qui découle du déploiement du Plan Climat, ayant pour but d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. La mise en place du PREB a pour principales finalités la réduction de la consommation énergétique et la limitation des émissions de CO₂, ainsi que la lutte contre la précarité énergétique (Izi by EDF@2023).

Pour atteindre cet objectif, il est primordial d'agir sur le parc immobilier français. Environ 5 millions de logements sont considérés comme « passoires thermiques » en France. Cela signifie que la consommation d'énergie est supérieure au réel besoin. Les habitants sont ainsi confrontés à un inconfort et des difficultés de financement. Le secteur du bâtiment est responsable de 45% des consommations d'énergie, c'est alors un levier majeur sur lequel il est nécessaire d'agir.

Pour que ces rénovations soient acceptées, il est indispensable de réduire le coût des travaux en industrialisant et en massifiant le processus. Une des techniques retenues est **l'isolation par l'extérieur des bâtiments à l'aide de panneaux préfabriqués** (cf. Fig. 1).

Pour répondre à la demande croissante des travaux de rénovation énergétique des bâtiments, nous avons commencé par segmenter les objectifs à traiter dans le cadre de ce Projet de Fin d'Études (PFE). Le but principal est d'optimiser l'ensemble des opérations topographiques permettant d'aboutir aux livrables demandés par les clients.



Fig. 1 : Pose de panneaux préfabriqués à l'ENVT (Le Moniteur@2023)

On se concentrera ici principalement sur la mise en place d'un processus répondant au cahier des charges (cf. **2.b. Cahier des charges**). Les problématiques à traiter seront les suivantes :

- Comment remédier au manque de données dû aux effets de bord lors des acquisitions par Scanner Laser Terrestre (SLT) depuis le sol ?
- Comment éviter d'avoir à accéder chez les habitants pour effectuer les relevés des niveaux de dalles ?
- Peut-on semi-automatiser ou automatiser certaines étapes de traitement et/ou modélisation ?
- Peut-on respecter les exigences du cahier des charges des constructeurs ? Comment le prouver ?



2. Le cahier des charges et la méthodologie actuelle

a. Méthodologie actuelle

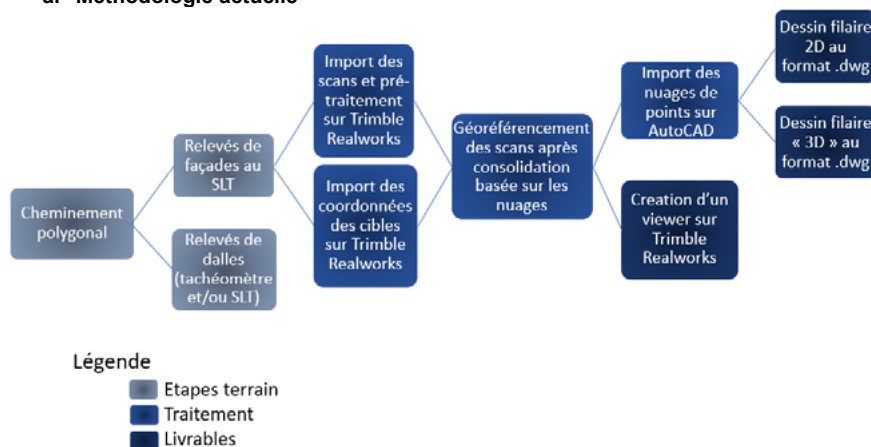


Fig. 2 : Méthodologie actuelle, à revoir pour établir les plans de façades

b. Cahier des charges

Les panneaux préfabriqués en usine seront dimensionnés pour leur conception par les ingénieurs travaux à partir des plans de façades qui sont réalisés au sein de CAMPENON BERNARD TOPOGRAPHIE. Ces derniers reposent sur des ancrages ponctuels qui doivent être positionnés dans le nœud structurel du bâtiment (intersection entre les dalles et les murs de refend) ou au moins dans les dalles, afin que la stabilité soit assurée et que les habitations ne soient pas impactées.

Les livrables demandés par les clients sont des dessins filaires 2D et 3D des façades sur lesquels figurent le niveau des dalles et leur épaisseur afin de connaître leur position. Il est également demandé de fournir une représentation du relief des façades par rapport à leur plan moyen. Cette partie du livrable permettra de prendre connaissance de la non-verticalité des bâtiments et d'adapter les panneaux en conséquence.

La tolérance de pose des fixations des panneaux est de l'ordre du centimètre en raison du dimensionnement des panneaux préfabriqués en usine. Une fois que les panneaux sont sur le chantier, prêts à être posés, il n'est pas possible de corriger leur dimension. C'est pour quoi ce critère nous est également imposé dans les livrables et c'est ce qui rend la tâche complexe.

3. Mise en place de différentes expérimentations

Pour établir un protocole permettant de remédier aux problématiques que nous rencontrons actuellement lors des relevés de façades destinés au personnel chargé de la conception des panneaux préfabriqués, il est primordial d'effectuer une série de tests.

À partir de ces expérimentations (cf. **Tableau 1**), il sera possible de juger quelles sont les méthodes à éliminer, les méthodes exploitables qui nécessitent des améliorations ou les méthodes à conserver telles quelles.

Tests	But recherché
Production d'un nuage de points à partir de données LiDAR acquises par drone Appareil : Leica BLK2FLY	Production de données complémentaires pour compléter les données issues des acquisitions par SLT depuis le sol. → Visualisation des données manquantes en raison des effets de bords résultants de la hauteur des bâtiments.
Production de nuages de points en utilisant la photogrammétrie par drone Appareil : Camera Hasselblad CMOS 1 aéroportée sur le drone DJI Mavic 2 Pro	
Acquisitions complémentaires au SLT depuis le toit Appareil : Z+F Imager 5016	
Etude de l'apport de l'imagerie thermique par drone Appareil : Capteur thermique FLIR aéroportée sur le drone DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	Identification des ponts thermiques pour repérer la position et l'épaisseur des dalles depuis l'extérieur.

Tableau 1. Liste des expérimentations effectuées et objectifs recherchés

4. Evaluation des résultats

Pour déterminer si les méthodes que nous avons expérimentées sont fiables, des évaluations qualitative et quantitative (Boulaassal, 2010) des données seront effectuées. L'évaluation qualitative est un jugement « à vue d'œil ». Elle permet de constater les fautes aberrantes, de qualifier l'aspect global d'une acquisition (image floue, double peau sur un nuage de points, effets de bord). L'évaluation quantitative, quant à elle, est plus poussée. Comme son nom l'indique, on quantifiera ici les écarts observés entre un jeu de données que l'on considère « de référence » et le jeu de données que l'on souhaitera évaluer.

Vous trouverez ci-après (cf. Fig. 3 à Fig. 6) un extrait des tests mentionnés précédemment. Ces coupes permettent d'effectuer une évaluation qualitative des méthodes, l'évaluation quantitative sera traitée dans le mémoire final.

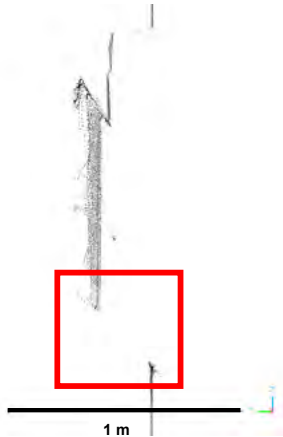


Fig. 3 : Acquisition au SLT depuis le sol
Fenêtre du 9ème étage
Vue de profil



Manque de données à combler

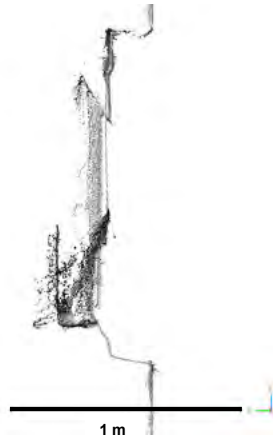


Fig. 4 : Fusion des nuages de points issus des acquisitions par SLT depuis le sol et de la photogrammétrie par drone
Fenêtre du 9ème étage
Vue de profil





Fig. 5 : Fusion des nuages de points issus des acquisitions par SLT depuis le sol et par le BLK2FLY Fenêtre du 9ème étage
Vue de profil

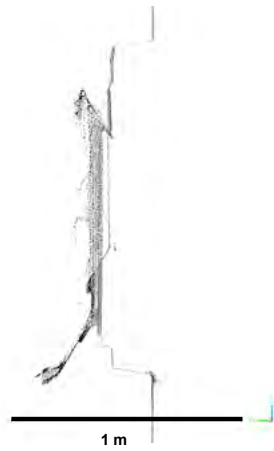


Fig. 6 : Fusion des nuages de points issus des acquisitions par SLT depuis le sol et depuis le toit Fenêtre du 9ème étage
Vue de profil

5. Conclusion et perspectives

Ce PFE aura permis de tester différentes techniques dans le but de valider ou d'améliorer notre méthodologie actuelle. Nous avons en partie répondu aux objectifs car il reste à présent la partie massification de ce processus. Le caractère urgent de la réhabilitation des bâtiments a été souligné dans la partie 1. **Contexte et objectifs de l'étude.** La priorité est actuellement de rénover les habitations les plus énergivores d'ici 2025. Cette échéance est la raison pour laquelle un protocole optimal sera proposé dans le mémoire final pour réaliser les plans de façades qui sont demandés à l'entreprise CAMPENON BERNARD TOPOGRAPHIE. La complexité de cette étude résidera dans le respect du cahier des charges pointilleux des clients et dans la prise en compte de tous les éléments constituant un projet, tels que les délais à respecter, la partie financière, les moyens matériels et le personnel.

6. Références bibliographiques

Izi By EDF [Internet]. Disponible sur : <https://www.izi-by-edf-renov.fr>. [Consulté en avril 2023]

Boulaassal, H. (2010). Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres (Thèse). Université de Strasbourg. 214 pages.

Comparaison d'Unreal Engine et Unity menant au développement, sur le moteur retenu, d'une application de visualisation de données géospatiales au format 3D Tiles

PFE présenté par :

M. Maximilien DEIBER-PAUQUET

Société d'accueil :

virtualcitysystems GmbH

Directeur de PFE :

M. Lutz ROSS, CEO

Correcteur :

M. Mathieu KOEHL



virtual city
systems

digital views. real perspectives.

1. Contexte et objectifs de l'étude

VirtualCitySystems (VCS) est une entreprise implantée à Berlin (Allemagne) commercialisant des solutions logicielles destinées au stockage, à la gestion, la diffusion et l'utilisation de modèles 3D de villes, depuis 2005. Ces solutions s'adressent principalement à une clientèle publique ; majoritairement des collectivités territoriales, à l'instar des villes de Berlin, Helsinki (Finlande) ou Rotterdam (Pays-Bas) parmi d'autres. Le présent Projet de Fin d'Études (PFE) s'inscrit dans la continuité de celui de M^{me} Emma Richard qui a étudié, en 2022, l'intégration d'éclairages et de mobiliers urbains dans un moteur de jeu (Unreal Engine) dans le cadre du réaménagement d'une place publique.

Ce premier PFE a créé de nouvelles opportunités commerciales pour VCS, étant donné la nouveauté que représente l'utilisation d'un moteur de jeu pour la visualisation de données géospatiales et l'immersion que cela permet. Ainsi, le présent projet se propose de comparer les deux moteurs de jeu leaders du marché : Unreal Engine et Unity, de manière à orienter les recherches et investissements de VCS par la suite. Sur ces moteurs, l'objectif est de créer une application permettant la visualisation de données géospatiales 3D à l'échelle d'une ville, au format 3D Tiles, lequel est utilisé au sein des solutions logicielles de l'entreprise d'accueil. Ces données sont intégrées à l'aide des *plug-ins* Cesium for Unreal et Cesium for Unity.

Les objectifs de ce projet sont multiples. En premier lieu, il s'agit de comparer les deux moteurs de jeu, selon différents critères définis avec l'entreprise d'accueil. Cette comparaison doit permettre de définir quel est le moteur de jeu le plus adapté à la visualisation de données géospatiales. Dans un second temps, et suite au choix de l'un des moteurs de jeu, il s'agit d'étudier la création d'une application permettant ladite visualisation, à laquelle d'autres outils doivent être intégrés : gestion des données, outils divers (dessins, mesures, récupération des métadonnées des modèles...). Finalement, l'application ainsi créée doit servir de *proof-of-concept* pour la visualisation de données géospatiales, en lien direct avec les outils existants de l'entreprise d'accueil.

2. Comparaison des moteurs de jeu

a. Prix et licences d'utilisation :

Le premier critère pris en compte pour la comparaison des moteurs de jeu est celui du prix. Les modèles économiques des deux moteurs sont très différents : du côté d'Unreal Engine (UE), différentes licences sont proposées mais la principale est la licence Standard. Celle-ci propose une utilisation gratuite d'UE et une exonération de redevance en-deçà d'1M\$ généré avec l'application. Au-delà, les revenus donnent lieu à une redevance de 5%. Du côté de Unity, de nombreuses licences sont disponibles. Les deux premières, les licences Personnel et Plus sont respectivement gratuite et facturée 369€/an mais ne sont disponibles que sous conditions de revenus : l'entreprise ne doit ainsi générer que 100k\$ annuellement (200k\$ pour la licence Plus) pour être éligible. Nous considérons ainsi la licence Pro, laquelle n'est pas conditionnée aux revenus et dont le tarif est de 1 877€/an. Ces



différences de tarification sont difficilement comparables, mais notons qu'il faudrait, par exemple, générer 1,37M\$ (le premier million \$ généré reste exonéré) sous UE pour que son coût dépasse celui d'un an de Unity. Ainsi, un léger avantage est attribué à UE pour ce premier critère de comparaison.

b. Compatibilité et interopérabilité :

Ce second critère concerne les formats de données intégrables, l'interopérabilité avec les solutions existantes de VCS et les plateformes supportées. Concernant les formats de données intégrables, cette étude se concentre sur les 3DTiles, lesquelles sont déjà largement utilisées au sein de l'entreprise d'accueil. Ainsi, aucune distinction ne peut être réalisée. On note toutefois que bien d'autres formats de données sont intégrables au sein des deux moteurs de jeux, à l'instar de modèles IFC pour lesquels existent des *plug-ins* au sein des moteurs. Concernant l'interopérabilité, les principaux formats utilisés au sein de l'entreprise d'accueil étant les 3D Tiles et des fichiers de configuration JSON (fichiers de configuration des VCS, solution de *webmapping* commercialisée par VCS), ces deux formats sont parfaitement intégrés dans chacun des moteurs. Enfin, les plateformes supportées par les deux moteurs de jeux sont très similaires. Unity en supporte quelques-unes de plus, mais les principales sont supportées par les deux moteurs. Aucun des moteurs de jeux ne se démarque donc sur ces aspects.

c. Accessibilité et ressources :

La prise en main des moteurs de jeux est très différente. Ce critère est nécessairement subjectif, mais il m'a semblé que Unity est bien plus accessible, le fonctionnement global et les erreurs à éviter se comprennent très aisément. À l'inverse, UE a une courbe d'apprentissage bien plus plate. Les ressources des deux moteurs sont très similaires : la documentation est claire et complète, nombre de forums et de tutoriels existent et permettent de solutionner la majorité des problèmes. Enfin, la facilité de développement et les langages nécessaires sont des points très importants pour le développement d'une application. Dans Unity, le langage utilisé est le C#, à partir duquel on crée des scripts que l'on attache à des objets. Cela nécessite d'apprendre ce langage, mais l'avantage est la clarté au cours du développement. Dans UE, les Blueprints (un langage de programmation visuel) et le C++ sont utilisables. Ne connaissant pas le C++, j'ai développé à l'aide des Blueprints. Cela paraît simple au début, mais devient très rapidement compliqué quand des centaines, voire des milliers de boîtes sont reliées dans un même script. À l'utilisation, l'avantage sur ce critère va très largement à Unity.

d. Performance :

Le critère de la performance est primordial afin de permettre l'immersion de l'utilisateur. Du point de vue de la qualité graphique, les données intégrées ont un rendu similaire dans chacun des deux moteurs de jeux. En revanche, l'UI (*User Interface*) semble bien plus claire dans l'application créée à l'aide de Unity. Concernant la fréquence de rafraîchissement des images, Unity a une énorme longueur d'avance : sur les différents tests menés, avec des paramètres équivalents, l'application développée à l'aide d'UE plafonne à 10 FPS. En revanche, sous celle développée avec Unity, l'écrasante majorité du temps la fréquence de rafraîchissement est limitée par le moniteur à 60 FPS. Ainsi, concernant les performances, l'avantage est très largement en faveur de Unity.

e. Récapitulatif et conclusion :

Le tableau ci-dessous récapitule les différents avantages de chacun des moteurs selon les critères précédemment cités :

Tableau 1 : récapitulatif des critères de comparaison des moteurs

Moteur de jeux	Prix et licence	Compatibilité et interopérabilité	Accessibilité et ressources	Performance
Unreal Engine	+	=	--	---
Unity	-	=	++	+++

Cette première partie de l'étude met en lumière l'avantage de Unity sur son concurrent UE dans le cadre de la visualisation de données géospatiales. À la suite de cela, il a été décidé de concentrer le développement du *proof-of-concept* sur Unity. Les éléments de comparaison détaillés ayant mené à ce choix seront explicités dans le mémoire de PFE ainsi qu'au cours de la soutenance. La partie suivante présente la démarche suivie afin d'aboutir à une application pleinement fonctionnelle pour la visualisation de données géospatiales.



d. Application résultante :

Les deux captures d'écran ci-dessous présentent l'application créée.



Fig. 2 (ci-contre) : interface de visualisation des données (données présentées issues de la VCMaP de Rotterdam, accessible sous : 3DRotterdam.nl.)



Fig. 3 (ci-contre) : fenêtre de gestion des données au sein de l'application

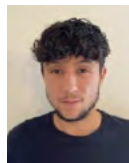
Sur la Fig. 2, l'interface de visualisation des données présentée contient 3 jeux de données : un terrain drapé d'un *overlay* chargé depuis un serveur WMS, les bâtiments en LOD2 ainsi que les modèles 3D des ponts. Sur la Fig. 3, la fenêtre de gestion des données présente différentes options à l'utilisateur. La principale étant la gestion des jeux de données intégrés : on peut en ajouter, en supprimer, ou encore modifier les paramètres de ceux existants. L'accès aux positions enregistrées se fait également au travers de cette interface : un clic sur une des positions enregistrées au préalable permet de s'y rendre. Autrement, il est également possible d'entrer les coordonnées auxquelles l'on souhaite se rendre. Enfin, sont également accessibles les coordonnées actuelles : on peut les copier dans le presse-papier, ouvrir une VCMaP à ces coordonnées ou encore les définir comme coordonnées de l'objet *Georeference* (et donc comme point de départ au lancement de l'application).

4. Conclusion et perspectives

L'ensemble du travail réalisé jusqu'à alors a permis la création d'une application pleinement fonctionnelle, permettant l'intégration et la gestion des jeux de données en cours d'exécution, entre autres fonctionnalités. L'objectif est ainsi d'ores et déjà atteint, voire dépassé : l'interopérabilité avec les solutions existantes de VCS a été travaillée. En effet, l'application actuelle permet à un client de VCS d'entrer l'URL de sa *webmap*, à partir de laquelle toute sa configuration est chargée pour qu'il retrouve un environnement similaire dans l'application à celui qu'il a configuré pour sa *webmap*, permettant d'une part une configuration extrêmement simple, et d'autre part une expérience utilisateur fluide.

Malgré cette grande avancée, les perspectives d'améliorations de l'application sont encore très vastes : il pourrait ainsi être intéressant de pouvoir modifier l'heure de la journée de manière à étudier les ombres ou encore permettre une utilisation en VR. Différentes présentations à différents clients de VCS ont permis d'imaginer des cas d'usage, des fonctions nécessaires ou des pistes d'améliorations. L'application a ainsi de grandes chances d'être différente d'ici la fin du Projet de Fin d'Études.

Évolution du bornage et de la reconnaissance de limite vers une procédure 100 % numérique et dématérialisée : de la numérisation de l'existant à la réunion contradictoire



PFE présenté par : **Alexis Gesserand**
Société d'accueil : **TT Géomètres-Experts**
Directeur de PFE : **Édouard Noël**
Correcteur : **Vincent Frey**



1. Introduction et contexte de l'étude

Comme nous le savons, aujourd'hui encore, de nombreuses personnes s'interrogent sur la position de leurs limites de propriété. En effet, en France, nous sommes très attachés à la notion de propriété et de possession ce qui a pour conséquence de voir naître de nombreux litiges de voisinages. Cette image est le témoin même de l'intérêt de définir clairement une limite avec une réelle valeur juridique, c'est ainsi que nous pouvons percevoir tout l'intérêt du bornage.



Fig. 1 : Illustration de la matérialisation physique d'une limite de propriété

Mais qu'est-ce que le bornage à proprement parler ? Juridiquement, il existe une référence à cette opération depuis le 10 février 1804 par Napoléon Bonaparte dans le Code civil avec l'article 646 : « *Tout propriétaire peut obliger son voisin au bornage de leurs propriétés contiguës. Le bornage se fait à frais communs.* ». Cet article 646 du Code civil précise que tout propriétaire peut « obliger » son voisin au bornage de leurs propriétés contiguës. Certains ont même vu dans cette « obligation », la raison de classer le bornage dans le titre du Code civil relatif aux servitudes. Toutefois, il est important de noter qu'il n'existe aucune obligation de borner son terrain, le bornage est en réalité une garantie pour les parties de la limite séparative entre leurs propriétés. C'est une garantie juridique. La seule exception, concerne le lotisseur qui, lui, a l'obligation de borner les lots avant la vente. C'est ce que nous précise la Cour de Cassation par un arrêt de la 3^{ème} chambre civile en date du 8 février 1983 : « *L'obligation de délivrance à la charge du lotisseur ne se limite pas à la simple remise du titre de propriété et du plan de lotissement mais implique l'obligation de fixer nettement sur le terrain, les limites des lots vendus.* ». De plus, depuis la redéfinition du lotissement en 2007, la réglementation le régissant est encore plus stricte. Auparavant, le bornage concernait seulement les Zones d'Aménagement Concerté (ZAC) et les Associations Foncières Urbaines (AFU), alors qu'à présent, le bornage préalable à la vente est devenu obligatoire dès le premier lot à bâtir détaché d'une propriété d'origine.

Après avoir eu un aperçu juridique sur le bornage, il est intéressant de définir précisément cette opération. D'après l'Ordre des Géomètres-Experts et leur recueil des normes ordinales sur l'acte foncier, du 10 octobre 2017, le bornage peut être défini de la façon suivante : « *le bornage est l'opération qui a pour effet de définir juridiquement et matérialiser sur le terrain les limites des propriétés privées, appartenant ou destinées à appartenir à des propriétaires différents. En Alsace-Moselle, la*



matérialisation des nouvelles limites est obligatoire dans le plan cadastral refait selon les principes de la loi du 31 mars 1884. Il a les mêmes effets qu'un bornage juridique, sous réserve des dispositions relatives à la prescription acquisitive. »

Le géomètre-expert est d'ailleurs depuis la loi du 7 mai 1946, le seul autorisé à mener une procédure de bornage amiable par délégation de service public. Mais, la profession de géomètre ne cesse d'évoluer, cela est d'autant plus remarquable depuis quelques années avec le numérique qui gagne de plus en plus de terrain. La pandémie liée à la COVID19 nous a donné un premier aperçu de la force du numérique et du futur qui nous attend. Comment aurions-nous pu exercer sans le numérique ? Ne serait-il pas le moment de l'utiliser pour obtenir une évolution du bornage ?

2. Objectifs du projet de fin d'étude

Ce projet de fin d'étude a pour but de mettre en place une nouvelle méthodologie de lever dans le domaine foncier, avec une procédure de bornage dématérialisée dans des cas de bornage amiable. Cependant, de nombreuses interrogations se posent sur le sujet. Nous pouvons notamment mentionner des questions se répartissant selon deux aspects : l'aspect technique et l'aspect juridique. Concernant, l'aspect technique, les problématiques sur ce projet sont entre autres : la recherche d'une solution optimale pour une modélisation du terrain simple, novatrice et économique, la création d'une visite guidée facile et intuitive pour tous, le passage à une réunion contradictoire en visioconférence ou encore les intégrations possibles de mon projet dans Géofoncier, le portail de l'information foncière en ligne. Juridiquement parlant, les questions sont également abondantes avec : la valeur juridique de la signature électronique, la sécurisation de la signature électronique, la possibilité de mixer les signatures électroniques et manuscrites sur un procès-verbal unique.

Ainsi, par le biais de ces multiples interrogations, nous pouvons établir les objectifs de ce projet. Premièrement, il est important de noter que le but n'est pas de parvenir à un bornage virtuel car nous sommes très attachés à cette matérialisation physique sur le terrain et cela ferait perdre tout sens à la définition du mot bornage à proprement parler. L'intention est véritablement de faciliter toute la procédure de la prise de mesure initiale à la réunion contradictoire en n'oubliant pas la signature du procès-verbal.

De manière plus détaillée, ce projet est articulé autour de trois grands objectifs. Le premier de ces objectifs est d'adapter la méthode de lever foncier en utilisant des technologies qui deviennent incontournables dans notre profession. Il s'agit de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie.

Le deuxième objectif, est d'être en mesure de faire évoluer la réunion contradictoire de bornage par une vision qui peut, en effet paraître légèrement futuriste pour certains et totalement dans l'ère du temps pour d'autres. Il s'agit de passer d'une réunion contradictoire qui se réalise systématiquement sur le terrain à une réunion contradictoire en visioconférence de manière à faciliter le rendez-vous pour tous et cela peu importe le lieu l'on se trouve.

Enfin, le dernier objectif va concerner l'étape finale de la procédure qui est la signature du procès-verbal de bornage, même si cela existe déjà aujourd'hui, mon but va être de faire adopter cette démarche pour un procès-verbal de bornage en démontrant sa valeur juridique, la sécurisation de ce processus et le temps précieux que nous pouvons gagner grâce à cette pratique. Mais aussi, montrer que nous pouvons adopter deux modes de signatures tout en conservant l'unicité du procès-verbal de bornage. Innovation et optimisation seront donc les deux fils conducteurs de ce projet de fin d'étude.

3. Un bornage dans l'ère du temps

a. Un lever foncier novateur

Actuellement, en France, tous les levés fonciers sont réalisés de la même manière avec un GNSS et une station totale. Sur ce type de lever, la tolérance acceptable sur les points est de l'ordre de 2 à 3 cm. Nous savons que le foncier requiert des points spécifiques lors d'un lever mais aujourd'hui nous pourrions obtenir un très grand nombre de points en un temps record dont les points spécifiques en utilisant de nouvelles technologies tel que le scanner laser. Cette technologie permet de capturer des milliers voire des millions de points. Pour ce projet, nous utiliserons le scanner laser terrestre RTC



360 de chez Leica. En moins de deux minutes, nous pouvons obtenir une numérisation complète et une image sphérique HDR pour une résolution de 6 mm à 10 m. Nous aurons donc des points connus en 3D avec une précision inférieure à 2 cm pour une portée allant jusqu'à 30 m. De plus, afin d'avoir un lever très complet et d'être en mesure de déterminer les limites de propriétés, nous associerons un lever photogrammétrique aérien et terrestre. Dans les deux cas, un géoréférencement sera indispensable afin d'acquérir une précision restant toujours inférieure à la tolérance. Derrière ce type d'innovation se cache un double intérêt : obtenir un grand nombre de points et donc des points plus réguliers sur les limites et, pouvoir produire une visite guidée du terrain.



Fig. 2: Scanner Laser Terrestre Leica RTC 360



Fig.3: Drone DJI Phantom 4 Pro

b. Une numérisation de l'existant passerelle vers le tout numérique pour le bornage

Derrière cette notion de numérisation se cache en réalité la création d'une visite guidée. C'est justement cette dernière que nous allons montrer à notre client et aux riverains, dans le but de réaliser notre réunion contradictoire de bornage en visioconférence. Tout cela est réalisable grâce aux données acquises par scanner et drone, qui vont nous permettre d'obtenir un nuage dense de points géoréférencé. Sur ce nuage, nous apposerons les limites que nous souhaitons proposer par le biais de plans remarquables ainsi que les points caractéristiques des limites. De plus, sur ces zones importantes, nous allons réaliser un maillage fin dans le but d'avoir un rendu plus réaliste pour le client et les riverains. De cette manière, ils pourront se rendre compte des délimitations comme si nous étions sur le terrain.

Nous aurons également une visite du terrain grâce aux différentes photos 360° aériennes et prises au sol. Ainsi, notre rendu sera divisé en deux fenêtres avec à gauche le nuage et à droite les panoramas ou photos 360° liés entre eux. Pour continuer, il faut savoir qu'il sera possible pour les clients de se déplacer sur cette représentation de droite de manière analogue à Google Maps.

Enfin, dans le but de rendre cela intuitif pour tous, nous allons disposer deux petites cartes sur la vue de droite représentant l'orthophotographie de notre terrain. Sur la première, nous y trouverons la position des sommets divisaires avec leurs dénominations utilisées dans le procès-verbal de bornage afin que toute personne ayant du mal à se situer puisse se repérer et, nous y rencontrerons également les liens vers les photos 360° aériennes. Sur la seconde nous aurons la position des sommets divisaires avec cette fois-ci les liens vers les photos 360° terrestres. Bien évidemment les deux vues (droite et gauche) seront synchronisées ainsi, chaque avancée sur la visite nous montre notre position dans le nuage et vice-et versa.



Fig.4 : Résultat obtenu avec TT360 sur un test à la suite d'un lever avec scanner et drone



Tout cela est réalisable via la plateforme TT360, sur laquelle nous travaillons en collaboration avec le pôle innovation de l'agence TT Géomètres-Experts de Paris. Il s'agit d'une plateforme de navigation web intuitive et précise capable de concaténer et de stocker tous types de données et de formats (nuages de points, objets 3D, photographies, ...) pour une restitution de haute qualité.

c. La signature électronique et sa valeur juridique

La validité juridique d'une signature électronique est bien plus complexe qu'on ne le pense. En effet, la signature électronique est régie par le règlement européen n°910/2014 sur l'identification électronique et les services de confiance pour les transactions électroniques au sein du marché intérieur, dit règlement « eIDAS ». Son objectif est de mettre en place un cadre juridique propre à susciter une confiance accrue dans les transactions électroniques au sein du marché intérieur. On y trouve aujourd'hui quatre niveaux ayant chacun des effets juridiques différents. Ces quatre niveaux de signatures électroniques sont répertoriés et décrits dans le tableau suivant :

	Simple	Avancée	Avancée reposant sur un certificat qualifié	Qualifiée
Identité du signataire	Non requise	Contrôle effectué mais non garanti (sms et mail prouvant seulement le consentement + envoi d'une copie de la carte d'identité)	Garantit l'identité du signataire par un certificat qualifié de signature électronique	Garantit l'identité du signataire par un certificat qualifié de signature électronique (identification obligatoire en utilisant la vérification en face à face ou équivalent)
Authenticité	Ne garantit pas que la signature soit liée au destinataire	Garantit que la signature est liée au signataire	Garantit que la signature est liée au signataire	Garantit que la signature est liée au signataire
Authentification	Incapable de prouver la modification des documents	Preuve cryptographique des modifications apportées aux documents	Preuve cryptographique des modifications apportées aux documents	Preuve cryptographique des modifications apportées aux documents
Niveau de sécurité du dispositif	Très faible	Faible	Moyen	Fort

Fig.5 : Tableau récapitulatif des quatre niveaux de signatures électroniques

Dans notre cas, nous savons que le géomètre-expert dispose d'un niveau 3 c'est-à-dire une signature électronique avancée reposant sur un certificat qualifié délivré par le Conseil Régional en présentiel après une procédure d'une quinzaine de minutes. En ce qui concerne les parties pour un bornage, nous assurons leurs identités lors de la visioconférence pour la réunion contradictoire et nous les faisons signer en simultané s'il y a accord sur les limites proposées.

4. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'étude aura donc permis de mettre en avant les nouvelles technologies au service d'un domaine phare de la topographie : « Le foncier ». Le foncier et ses méthodes traditionnelles ne disparaîtront pas mais ce projet révèle qu'il est possible de tendre vers une évolution dans l'ère du temps. De plus, le passage à la réunion contradictoire en visioconférence propose une nouvelle ouverture au bornage permettant de réunir toutes les parties peu importe le lieu où elles se trouvent et à des horaires pouvant sortir des horaires où la majorité des personnes sont au travail. Sans oublier que la dématérialisation de la procédure avec signature électronique présente gain de temps, sécurité, traçabilité et économie. Pour finir, il est important de noter que ce projet entre complètement dans une démarche environnementale qui est une des préoccupations majeures du monde de demain, puisqu'il prévoit la réduction des déplacements et des envois postaux.

5. Références bibliographiques

- *Ordre des Géomètres-Experts. (2017). Recueil des normes ordinales sur l'acte foncier, Paris, 226 pages*
- *Mazuyer, F. & Rigaud, P. (2013). Le bornage entre résolution et prévention des conflits, Publi-Topex SASU, Paris, 127 pages.*
- *L'ANSSI@ (14 avril 2023), Guide de sélection du niveau des signatures et des cachets électroniques - l'ANSSI. URL: <https://www.ssi.gouv.fr/entreprise/reglementation/confiance-numerique/le-reglement-eidas/guide-de-selection-du-niveau-des-signatures-et-des-cachets-electroniques>.*



Mise en place d'un SIG interne dans le cadre d'une transition logicielle au sein d'un bureau de géomètre



PFE présenté par : **Iléana BIGNON**
Société d'accueil : **SARL BEST-TOPO**
Directeur de PFE : **Dimitri ROUSSEL**
Encadrant : **Philippe GOSSET**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**

BEST-TOPO
BUREAU DE GEOMETRES

1. Introduction

a. Contexte de l'étude

Dans un bureau de Géomètres, les données acquises au fil des années constituent une ressource essentielle à tout nouveau projet. En effet, l'entreprise se doit de conserver, stocker et consulter les données géoréférencées des différents chantiers (points de référence, plans topographiques, etc), les futurs levés s'appuyant sur celles-ci. C'est donc dans cette optique de pérennisation du stockage des données, dans le cadre d'une transition logicielle, que l'entreprise Best-Topo a souhaité orienter ce sujet de PFE.

Best-Topo est un bureau de Géomètres luxembourgeois, appartenant au Groupe BEST (groupe d'expertise et de conseil dans le domaine de la construction). Les secteurs d'activités de l'entreprise sont variés : levés haute densité, nivellement, photogrammétrie, topographie ou encore implantation.

Après le départ à la retraite de l'ancien dirigeant de l'entreprise, la transition logicielle, envisagée depuis quelques temps déjà, semblait devenir nécessaire. En effet, l'entreprise Best-Topo utilise, depuis quelques dizaines d'années, le logiciel WinSTAR Carto (développé par Star-Apic). Ce logiciel devient cependant peu à peu obsolète puisqu'il n'est plus commercialisé depuis quelques années maintenant, plus aucune mise à jour n'est proposée. L'entreprise souhaite donc utiliser un nouveau logiciel DAO, qui sera à définir. Enfin, afin de garantir la pérennité du stockage des données, l'entreprise souhaite pouvoir conserver ses données sous une autre forme, une solution SIG (Système d'Information Géographique) a donc été envisagée.

b. Objectifs

Ce PFE regroupe donc trois objectifs majeurs qui s'articulent autour des problématiques relevées précédemment. Les objectifs de ce PFE sont les suivants :

- Création d'un SIG qui permettra de visualiser et conserver de façon pérenne les données actuellement stockées sur le serveur WinSTAR.
- Migration des données du logiciel WinSTAR vers le SIG.
- Choix du nouveau logiciel DAO et création d'une géocodification basée sur l'existante.

2. Mise en place d'un SIG

Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnels capables de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées (De Blomac et al., 1994).



a. Choix des logiciels

La mise en place d'un SIG exige une étude préalable portant sur les composantes matérielles, les composantes logicielles, les moyens humains ainsi que les données et procédures. Afin de déterminer la solution la plus adaptée aux besoins de l'entreprise, une comparaison logicielle a donc été effectuée.

Ce comparatif s'est donc appuyé sur plusieurs contraintes telles que des contraintes financières ou des contraintes de formation ainsi que sur les différentes fonctions proposées par les logiciels (outils de traitement, formats pris en compte, etc.).

Le logiciel SIG Qgis a été retenu puisqu'il répondait aux divers critères fixés. Ce logiciel libre et open-source offre une variété intéressante d'outils et d'extensions. Il est également possible de créer ses propres extensions à l'aide d'une console de programmation en langage python.

Enfin, le système de base de données PostgreSQL a été choisi puisque ce système open-source est l'un des plus fiables actuellement. Il est compatible avec de nombreux logiciels et respecte l'intégrité des données. L'extension PostGIS associée permet également la gestion des données spatiales.

b. Etapes clés de la mise en place d'un SIG

Une fois l'inventaire de ces divers composants effectué, nous avons alors pu définir les étapes clés de la mise en place d'une telle solution. Ceci permet d'avoir un regard sur la faisabilité du projet et d'organiser correctement le déroulement des opérations.

Ces étapes peuvent être regroupées en cinq familles : l'acquisition (actuellement, les données à intégrer au SIG sont d'ores et déjà acquises), la gestion (concernant la structuration des données et les mises à jour), la manipulation (concernant les transformations, restructurations et extractions des données, entre autres), le traitement (concernant les calculs et requêtes effectuées) ainsi que la restitution (grâce à des tables, des images, des cartes, etc.). Pour cette création de SIG, les étapes clés sont retranscrites dans le graphique ci-dessous.

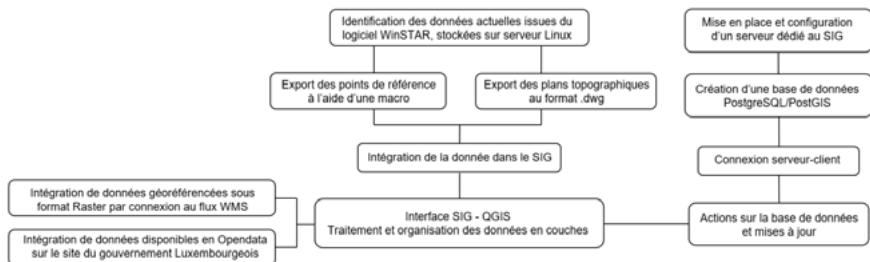


Figure 1 - Etapes clés de la mise en place du SIG au sein de l'entreprise Best-topo

c. Installation logicielle

La première étape effective de cette mise en place a été l'installation des divers composants et de leurs configurations. L'installation s'est donc faite suivant le modèle serveur-client. Le poste choisi en tant que serveur, stocke les données localement. Un poste client peut ensuite avoir accès à ces données grâce à une connexion directe à la base de données (connexion par adresse IP et port du serveur). Le client peut également avoir accès aux services web géospatiaux qui procurent de la donnée sous format raster. Des fonds de plans peuvent donc être intégrés au SIG. Le gouvernement luxembourgeois propose notamment un accès à certaines cartes sur son portail en Opendata.

L'architecture logicielle mise en place est celle décrite dans le graphique suivant.

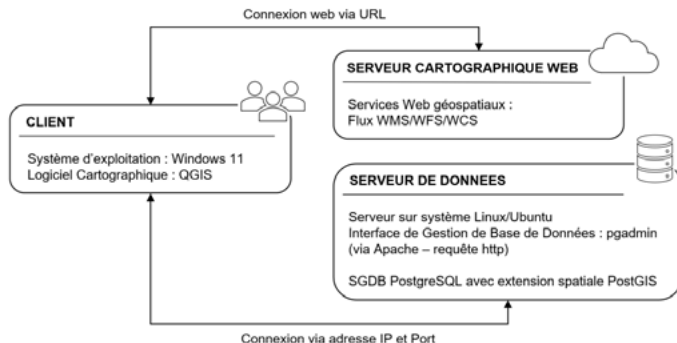


Figure 2 - Architecture logicielle mise en place pour ce SIG

d. Visualisation des données et suivi SIG

Le stockage des données est effectué dans la base de données sous forme de couches. Ces données, couvrant l'ensemble du territoire luxembourgeois, sont consultables sur n'importe quel poste interne, doté du logiciel Qgis. Pour ce qui est de l'exploitation de celles-ci, il est possible de consulter et extraire les informations souhaitées facilement. L'extension *Geoportal LU* peut être installée pour localiser une adresse spécifique, ce qui permet un gain de temps.

Enfin, il est nécessaire d'effectuer un suivi régulier de ce SIG. Les acteurs de cette maintenance doivent être formés sur les manipulations et la gestion des données.

3. Migration des données

a. Le logiciel WinSTAR

Le logiciel WinSTAR Carto est un logiciel développé dans les années 90 en Belgique. Il est basé sur le concept de base de données graphiques et de cartographie continue, il permet notamment d'afficher dans une même vue tous les levés topographiques du pays. L'entreprise utilise ce logiciel depuis quelques dizaines d'années pour l'édition de ses plans topographiques.

Actuellement, le logiciel Winstar tourne sur un serveur Linux spécifique. Les plans topographiques, et tout ce qui concerne la gestion utilisateur, sont également stockés sur ce serveur. Ce logiciel n'étant plus commercialisé, il devient peu à peu désuet. L'un de ses principaux désavantages est qu'il n'y a pas d'espace présentation. Actuellement, les plans topo sont exportés au format .dwg puis ouvert sur AutocadLite pour y ajouter la présentation (légende et cartouche). De plus, le logiciel de calculs associé n'est plus utilisé car cela nécessite un temps de calculs beaucoup trop conséquent. Le logiciel Trimble Business Center est donc utilisé à la place.

b. Transfert des données

Les données à transférer depuis WinSTAR Carto vers le SIG sont des données métiers géoréférencées (de l'ensemble du territoire Luxembourgeois) issues des relevés terrain. Parmi ces données, on distinguera les points de référence des plans topographiques. Ces données sont définies dans le système planimétrique LUREF et dans le système altimétrique NG95.

Pour ce qui est du transfert depuis le logiciel WinSTAR, il est possible d'exporter les données sous format .dwg ou bien en tant que fichier texte. Une macro (script shell linux), développée directement via le terminal de commandes du logiciel, permet d'associer aux points de référence leurs attributs avant tout export. Les données sont ensuite importées et organisées dans Qgis, par commune, avant d'être stockées dans la base de données.

4. Transition logicielle

a. Choix du logiciel DAO

Une étude comparative a permis de déterminer le logiciel DAO le plus adapté aux besoins de l'entreprise. Après discussion, c'est le logiciel Autocad, associé au logiciel de calculs Covadis, qui a été retenu. Ce choix se porte sur le fait que la formation du personnel sera moindre puisque plusieurs employés ont pu l'utiliser dans le passé. De plus, ce logiciel DAO est l'un des plus utilisés par les entreprises de topographie et BTP, l'échange des données sera donc facilité.

b. Nouvelle codification

En parallèle de cette transition logicielle, une nouvelle géocodification a dû être créée, les fichiers de codification WinSTAR n'étant pas exploitables par Covadis. Cette géocodification se base donc sur celle utilisée jusqu'à présent. La philosophie de lever a été conservée, les codes sont donc toujours en format numérique uniquement, et sous la forme : nom_élément . numéro_ligne . nature_ligne. Les techniciens devront cependant veiller à non plus fermer la ligne, mais l'ouvrir (cette particularité n'ayant pas pu être modifiée). Une fois la codification finalisée, celle-ci a pu être corrigée grâce à plusieurs tests de génération de dessin. Une fiche récapitulative des codes a également été rédigée.






				
6 Poteau Elec	10 Armoire Elec (1 point devant)	103 Armoire Elec (3 points)	62 Plaque Elec	64 Plaque Elec double

Figure 3 - Extrait de la fiche récapitulative des codes (symboles réseau électrique)

5. Conclusion et perspectives

Ce sujet émerge d'un réel besoin de l'entreprise concernant la pérennisation du stockage de ses données. La solution SIG permet donc de répondre à cette problématique en conservant les données géoréférencées dans une base de données accessible depuis tous les postes de l'entreprise. La migration des données a pu se faire grâce au développement et la mise en place de quelques outils (macro et extension Qgis notamment). Les particularités de mise en place d'une telle solution et les résultats obtenus au cours de ce projet sont disponibles dans mon mémoire de fin d'études.

Ensuite, la transition logicielle du logiciel WinSTAR vers le logiciel Autocad/Covadis était une étape à la fois attendue et redoutée par les employés. La création d'une géocodification basée sur l'existante a permis de conserver les habitudes de lever propres à l'entreprise et ainsi faciliter la transition.

Concernant les perspectives de ce projet, il est nécessaire de continuer et d'encourager le développement de ce SIG par la suite. On peut envisager également la visualisation des données directement sur terrain, par exemple, grâce à des solutions mobiles liées au SIG.

6. Références bibliographiques

DE BLOMAC, F., GAL, R., HUBERT, M., RICHARD, D., TOURET, C. (1994). Arc/Info : Concepts et applications en géomatique. Hermès, Paris. pp.1-248.

Investigation des méthodes semi-automatiques de traitement de nuage de points et des possibilités de modélisations 3D de bâtiments en vue d'une rénovation.



PFE présenté par : **Dylan Longrais**
Société d'accueil : **Géoconseils SA**
Directeur de PFE : **Nicolas Delley**
Correcteur : **Emmanuel Alby**
Encadrants : **Nicolas Delley et Martin Jeanneret**

geoconseils
bureau d'ingénieurs

1. Présentation et objectifs

Ce Projet de Fin d'Études est réalisé au sein de l'entreprise Géoconseils SA. C'est une entreprise qui travaille en collaboration avec des architectes qui la mandatent pour réaliser des levés de bâtiments existants dans le but de livrer des plans d'étages, des coupes verticales ou encore des plans de façades.

La modélisation numérique tridimensionnelle joue aujourd'hui un rôle primordial dans la conception et la réalisation de projets de construction et de rénovation. La notion de Building Information Modeling concerne tous les corps de métiers qui touchent de près ou de loin au domaine du bâtiment, et c'est pour cela qu'il est important d'en prendre conscience et d'adapter ses activités professionnelles en fonction des avancées technologiques.

Ce sont Revit et ArchiCAD, deux logiciels dont la réputation n'est plus à faire, qui ont fait l'objet de plusieurs semaines d'essais. Les différents tests ont montré que même si les deux logiciels nous permettent d'obtenir chacun une modélisation qui convient parfaitement, c'est ArchiCAD qui se démarque par une utilisation plus intuitive, et une réalisation d'éléments non-standards plus simple. La création de ces éléments est d'une grande importance dans les levés de bâtiments existants, tant il existe de structures et de bâtiments qui ont parfois plusieurs dizaines d'années. De plus, les architectes en Suisse travaillent pour la plupart sur ce logiciel, et ainsi l'échange des données et de conseils entre professionnels qui s'en retrouve facilité de ce fait.

L'objectif principal est d'investiguer les méthodes et les logiciels qui pourraient permettre de semi-automatiser le traitement du nuage de points ainsi que la modélisation numérique en trois dimensions concernant des bâtiments en cours de rénovation.

Comme les logiciels qui ont été retenus pour approfondir l'étude sont tous compatibles à la fois avec ArchiCAD mais également avec Revit, ce projet de recherche s'articulera donc tout de même autour de ces deux logiciels.

2. Classification

Sur la base de nuages de points géoréférencés, une étude ayant pour but d'investiguer sur les différentes possibilités de rééchantillonnages a été réalisée. L'idée ici est de ne garder que les points qui sont utiles à la modélisation et cela dans trois buts précis. Le premier est de réduire la taille considérable que peut faire un fichier contenant un nuage de points quel qu'il soit. Le second est d'améliorer la fluidité lors de la navigation dans celui-ci, afin de rendre le travail moins fastidieux pour l'ordinateur et l'opérateur qui peut parfois passer plusieurs heures sur un nuage de points. Le dernier est de faciliter la modélisation en trois dimensions sur ces logiciels dédiés, afin de ne pas se perdre dans des éléments qui ne doivent pas être modélisés.

Ensuite, de nombreux tests se sont enchaînés concernant les possibilités et les optimisations de simplification de nuage de points. C'est notamment sur le logiciel Cyclone 3DR que les résultats se sont montrés les plus pertinents. En effet, celui-ci propose de la classification de nuage de points qui permet de réduire considérablement la taille des fichiers (Fig.1). Comme l'entreprise le possède déjà



et que les résultats sont concluants, il n'est pas exclu que ce soit celui-ci qui ressorte lors des conclusions qui seront apportées plus tard.



Fig. 1 : Classification "Outdoor" appliquée sur un nuage de points dans le logiciel Leica Cyclone 3DR

3. Logiciels de digitalisation semi-automatique

a. Niveau de détails

Avant de commencer ce projet, il est important d'étudier les différents niveaux de détails qui existent concernant la modélisation de bâtiment en trois dimensions, que l'on appelle « LOD » dans le domaine du Building Information Modeling (BIM). Il a été décidé en collaboration avec l'entreprise, après plusieurs recherches sur la manière dont les architectes suisses travaillent, de s'adapter aux besoins des projets de rénovations, ce qui correspond au LOD 300. Celui-ci reprend une conception détaillée qui correspond à une modélisation précise et dessins d'atelier où les éléments sont définis avec des assemblages spécifiques, une quantité précise, une taille, une forme, un emplacement et une orientation. Nous pouvons joindre des informations non géométriques aux éléments du modèle. De cette manière, les objectifs et la précision sont toujours les mêmes, ce qui facilitera par la suite l'apprentissage des logiciels et de la modélisation tridimensionnelle pour les différents collaborateurs de l'entreprise.

b. Vectorisation pour les plans en 2 dimensions

L'objectif ici est de réaliser une étude des méthodes de digitalisation semi-automatique. Nombreux sont les logiciels qui prétendent pouvoir aider à la modélisation en trois dimensions en utilisant le plus souvent des plug-ins qui viennent s'intégrer directement dans les logiciels de modélisations. Certains en revanche développent leur propre environnement. D'autres décident de lier les deux.

Dans un premier temps, la recherche est consacrée aux logiciels permettant de réaliser des vectorisations à partir de points. Ces recherches sont importantes, car dans certains projets, pour le moment, les architectes ne demandent que des plans d'étages et des coupes. Il est donc important pour l'entreprise d'optimiser également la réalisation de plans en deux dimensions, qui peuvent être utiles pour réaliser des modélisations en trois dimensions.

C'est de nouveau sur le logiciel Leica Cyclone 3DR que les tests ont été réalisés. En effet, celui-ci propose une extension, qui porte le nom de AEC, et qui permet l'accès à l'outil « scan to plan » (Fig.2), offrant la possibilité de réaliser des vectorisations, sur des coupes de nuage de points.



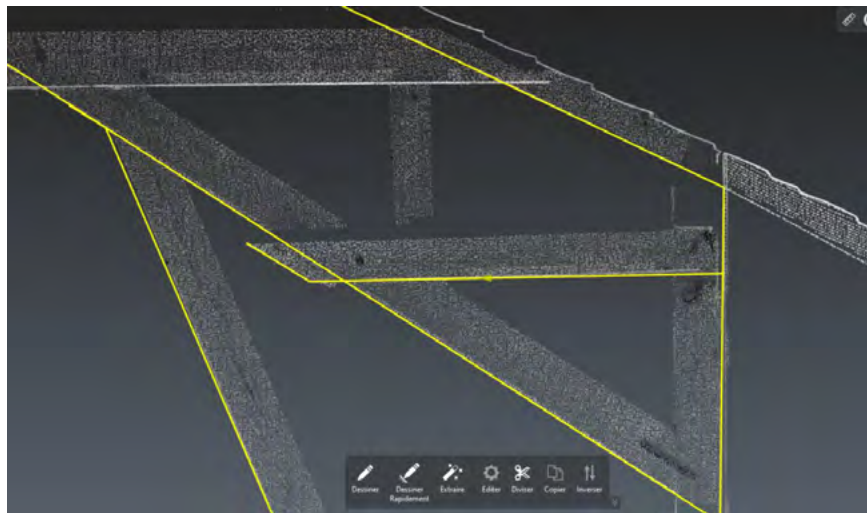


Fig.2 : Vectorisation semi-automatique réalisée en coupe sur le logiciel Leica Cyclone 3DR

c. Le logiciel PointCAB

Le logiciel PointCAB permet de vectoriser des nuages de points, afin d'obtenir des plans d'étage ou des plans en coupe par exemple. Cependant, tout comme sur le logiciel Leica Cyclone 3DR, il est indispensable d'éditer les vecteurs créés sous forme de polygones. Il est possible sur celui-ci de créer des lignes, d'insérer des points, de connecter des lignes, d'insérer des lignes, de créer des courbes et de créer des cercles.

Le logiciel PointCAB se distingue par la possibilité de créer un lien direct avec les logiciels Revit et ArchiCAD en installant un Plug-In dédié sur ceux-ci.

Il devient alors possible de travailler simultanément sur chacun des deux logiciels, afin de pouvoir créer de manière plus simple des éléments comme des niveaux, des murs, des ouvertures, des marqueurs ou encore des poutres et des charpentes.

Cette méthode de modélisation rend l'utilisation de Revit et d'ArchiCAD beaucoup plus simple, la réalisation de chaque élément étant facilitée. Il suffit d'utiliser PointCAB pour cliquer les points demandés, comme deux points d'un mur, et celui-ci se dessinera directement sur le logiciel de modélisation, après définition des niveaux et autres paramètres selon les spécificités de chacun.

d. Le logiciel BIMMTOOL

Le logiciel BIMMTOOL est une extension qui s'intègre uniquement dans le logiciel ArchiCAD. Cela signifie qu'un nouvel onglet se rajoute à la liste présente sur la version classique du logiciel, et de nouvelles fonctionnalités sont ainsi proposées.

Ce sont ainsi deux fenêtres distinctes qui nous permettent d'utiliser ce logiciel, et de réaliser les éléments en trois dimensions selon les méthodes qui sont expliquées dans le manuel d'utilisation fourni avec l'extension. Il est ainsi possible avec cette extension de réaliser tous les éléments qui constituent un bâtiment, c'est-à-dire des murs, des sols, des charpentes, des ouvertures...

L'extension BIMMTOOL propose également la possibilité de réaliser un maillage de terrain, ce qui est très intéressant car de nombreux architectes demandent des coordonnées et des altitudes de points de seuils ou de points caractéristiques du terrain présents autour du bâtiment.

4. Suite des investigations

a. Analyse de précision

La vectorisation sur le module AEC du logiciel Leica Cyclone 3DR montre des écarts compris entre 5 et 12 millimètres en comparant avec les plans rendus par l'entreprise qui ont été réalisés avec le logiciel AutoCAD. Ces résultats sont tolérables puisque les plus grands écarts ont été constatés sur des éléments comme d'anciennes poutres dont l'emplacement peut facilement varier selon le positionnement de la coupe réalisée dans le nuage de points.

Concernant les projets de modélisations en trois dimensions, ce ne sont pas moins de cinq modélisations qui ont été réalisées avec chacune des méthodes et des logiciels différents afin de pouvoir envisager une analyse de précision et des comparaisons les plus pertinentes possibles. Ces analyses de précision prennent en références les modélisations réalisées sans outil d'automatisation, grâce au logiciel CloudCompare, qui permet d'obtenir des courbes d'écarts très pertinentes et donc l'exploitation des résultats est facilitée.

b. Conclusions

L'ensemble des conclusions sera disponible lorsque les analyses de précisions seront rendues et que les discussions avec la direction de Géoconseils auront donné lieu à des choix. Car si la précisions des résultats est primordiale, il en n'est pas moins des méthodes d'exécution et des méthodes d'utilisation des logiciels, qui représentent également une grande partie de l'analyse. Toutes ces conclusions seront ainsi disponibles dans le rapport de Projet de Fin d'Études final.

Classification	Vectorisation pour plan en 2D	Modélisation en 3D	Analyse de précision	Visualisation
Leica Cyclone 3DR	Leica Cyclone 3DR (extension AEC)	Revit (plug-in PointCAB)	CloudCompare	Maya4D
		ArchiCAD (plug-in PointCAB et extension BIMMTOOL)		Blender
		Plan2BIM		

Fig.3 : Tableau récapitulatif des logiciels utilisés (possibilité d'évolution)

Cependant, il est déjà possible de souligner que le logiciel Cyclone 3DR permet un gain de temps considérable concernant l'élaboration de plans en deux dimensions, grâce à la vectorisation semi-automatique. Il faut cependant éditer de nombreuses polygones qui sont fausses ou dont le positionnement doit être affiné.

Concernant le logiciel PointCAB, grâce à certains paramètres qui lui sont propres, il est assez simple de l'appréhender et permet de rendre l'utilisation de logiciel comme Revit plus facile. Il vient également compléter de manière intelligente le logiciel ArchiCAD. Dans les deux cas, il revoit entièrement la manière de modéliser mais ne la rend pas plus complexe pour autant.

L'utilisation de BIMMTOOL et ses fonctionnalités sont proches de celles utilisées par le logiciel PointCAB. En revanche, étant développé exclusivement pour ArchiCAD, il est ainsi plus ergonomique et plus fluide dans son utilisation.

Il reste également à essayer le logiciel Plan2BIM, qui permet de passer d'un plan au format PDF à une modélisation en trois dimensions grâce à une vectorisation semi-automatique et à une production d'éléments solides suivant plusieurs paramètres configurés au préalable.

Pour finir, nous étudierons Maya4D et Blender, deux logiciels de visualisations qui peuvent s'adapter aux bâtiments, et qui se distinguent dans cette catégorie. Il est en effet important d'avoir la possibilité de mettre en avant une modélisation en trois dimensions grâce à ce type de logiciels, qui permettent de présenter un projet de rénovation que ce soit pour des clients ou pour des professionnels et collaborateurs. Cela permet de mettre en avant les points forts d'un tel travail ainsi que ses perspectives.

Intégration des outils de photogrammétrie dans le cadre de relevés de tranchées. Mise en place des procédures de mesures et de calculs avec analyse des limites et déploiement de la solution

PFE présenté par : **Adrien Dufour**
Société d'accueil : **Datageo**
Directeur de PFE : **Clément Anet**
Correcteurs : **Emmanuel Moisan et Pierre Grussenmeyer**



1. Introduction

Datageo est une entreprise spécialisée dans l'ingénierie des réseaux, contexte dans lequel s'est déroulé ce PFE. La réforme DT-DICT mise en place en 2012 a pour objectif de prévenir les risques d'endommagement des réseaux enterrés, aériens ou subaquatiques en les classant en classes de précision A, B ou C. La classe A, a une précision de 40 cm pour les réseaux rigides et de 50 cm pour les réseaux dits souples. L'une des exigences de la norme NF S70-003 est que les prestataires intervenant à proximité des réseaux dont la certification est délivrée par un document d'autorisation de travaux à proximité des réseaux (AIPR) doivent respecter une précision de 10 cm en planimétrie et en altimétrie pour la classe A. L'évolution constante des nouvelles technologies a simplifié le travail de géoréférencement et de détection des réseaux. Cependant, les inconvénients des méthodes traditionnelles actuellement utilisées entraînent un certain nombre de complications :

- Le temps de transport excessif par rapport au temps passé sur le terrain.
- Les attentes sur le chantier parfois longues.
- Refermer la tranchée au plus vite.
- Garantir la classe de précision A.

Pour pallier ces problèmes, l'entreprise a cherché ces dernières années à développer ses connaissances dans le domaine du géoréférencement des réseaux enterrés en tranchée ouverte par photogrammétrie via smartphone. L'objectif de ce PFE est de simplifier l'acquisition, le traitement pour offrir une solution photogramétrique fiable, durable et précise. L'entreprise a choisi un modèle de boîtier permettant l'acquisition d'images géotaggées avec une position GNSS en mode RTK intégrée à celui-ci. A ce jour, il existe différentes technologies de ce type sur le marché, mais elles fonctionnent toutes sur un principe similaire : l'acquisition photogramétrique ou vidéographique s'appuie sur une distribution de points d'appui répartis le long de la fouille pour assurer le bon géoréférencement de l'acquisition. Les GCP interviennent seulement lors de l'étape de l'orientation absolue du modèle.

Dans le cadre d'une démarche plus respectueuse de l'environnement, nous avons choisi de confier l'acquisition des données aux entreprises de travaux, notre rôle étant de réceptionner, traiter, vérifier les données et de produire le plan de récolement. L'objectif de l'entreprise est de simplifier le levé, s'affranchir des points d'appui (GCP) et de simplifier la transmission des données, tout en utilisant un système de notification automatique, pour garantir la validité ou non de l'acquisition à l'exécutant des travaux dans un délai relativement court.

Dans un premier temps, nous analyserons le système choisi et les avantages de cette solution, la qualité du rendu photogramétrique, sa précision et sa stabilité dans le temps. Nous examinerons ensuite les différentes options de traitement qui s'offrent à nous. Nous validerons le système et analyserons les résultats obtenus.



2. Le système d'acquisition et la procédure de traitement

La validation ou non du système acquis a porté sur son ergonomie, les différents capteurs qui le composent et leur qualité, le poids des données, la fidélité terrain des résultats et la vitesse de transmission des données. Les smartphones les plus récents offrent une résolution d'image de très bonne qualité pour des relevés photogrammétriques de ce type, notamment les derniers iPhones d'Apple avec une résolution proposée de 12 mégapixels. Pour cette étude, nous nous sommes principalement concentrés sur l'iPhone 12 Pro équipé du capteur LiDAR disponible depuis octobre 2020. D'une portée de 5 m le LiDAR fonctionne sur le principe d'une impulsion laser émise depuis une diode semi-conductrice à cavité verticale émettant par la surface appelée VCSEL. La qualité du capteur d'image CMOS dans cette gamme permet d'obtenir une taille de pixel objet de 2,6mm à 5 m, ce qui est largement satisfaisant pour visualiser des éléments fins (type fil de terre). Le LiDAR du module photo de l'iPhone peut être utilisé pour déterminer les profondeurs ; il fait partie intégrante du module photo et ne peut pas être désactivé. Ce capteur est également utilisé en réalité augmentée via les algorithmes ARKit développés par Apple, et permet également d'améliorer la vitesse de mise au point.

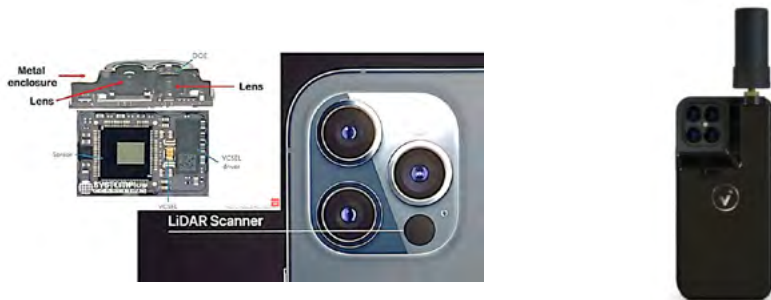


Fig. 1 : système LiDAR de l'iPhone 12 Pro (Apple@2023) avec le module VCSEL (Electronics360@2023) à gauche. Système viDoc RTK à droite (vigram@2023)

Pour le boîtier, l'entreprise a choisi le dispositif viDoc RTK développé par vigram, compatible avec la gamme iPhone/Ipad (à partir de l'iPhone XR /iPad Pro 11) et certains appareils Android équipés du capteur ToF (Time of Flight). L'étude réalisée consiste à valider ou non ce système par rapport aux attentes de géoréférencement des réseaux en tranchées ouvertes.

3. Méthodologie d'acquisition et traitement

L'utilisation du viDoc n'est disponible qu'avec deux applications, l'application Vizione et PIX4Dcatch. Cette dernière a été retenue car beaucoup plus de critères répondaient à nos besoins et correspondaient à nos attentes. Nous nous sommes attardés sur différents paramètres tels que le recouvrement minimal entre chaque photo, le pas de déclenchement des images selon le déplacement spatial et les mouvements angulaires, la résolution des images, les indicateurs de fiabilité en temps réel, l'ergonomie, la facilité d'acquisition et notamment un retour positif sur la simplicité d'utilisation de la solution. Le format d'export des données est composé des images, des cartes de profondeur des données LiDAR ainsi que les fichiers de positionnement par RTK.

Pour l'acquisition nous avons établi un protocole grâce aux tests menés qui ont permis d'identifier les limites du système dans le cas où la qualité de positionnement par RTK serait mauvaise. Dans ce cas l'utilisation de GCP reste obligatoire, et nous avons pu déterminer le nombre de GCP minimale dans le cadre d'une acquisition non valide sans GCP. En effet, il se peut du fait de la configuration du lieu que des masques obstruent la réception des signaux et empêchent le bon positionnement. L'objectif final est d'envoyer une notification sur le téléphone ayant effectué l'acquisition sur la réussite ou

l'échec de l'acquisition sans GCP, de manière automatique dans un délai de 30 min à 1h pour les plus gros projets (> 1500 images).



Fig. 2 : Résultat du nuage de point via PIX4Dcloud d'un réseau gaz. Tranchée de 1.5m de profondeur

Nous nous sommes ensuite penchés sur le logiciel de traitement photogrammétrique. Nous avons proposé 3 types de solutions : recréer l'infrastructure propre à l'entreprise à partir de logiciels open source, la solution PIX4Dcloud ou l'API/SDK de PIX4Dengine. Notre choix s'est finalement porté sur PIX4Dcloud car plusieurs critères sont entrés en ligne de compte : la mise en œuvre, le contrôle des traitements, l'analyse et le suivi, les moyens logistiques et humains, les moyens financiers et la pérennité de la solution. À noter que les logiciels doivent avoir la capacité de traiter les images de profondeurs du capteur LiDAR afin de fusionner le nuage de points LiDAR et le nuage de points photogrammétrique issu des images.

4. Étude comparative et analyse

Tout d'abord, tout au long de ce projet, la stabilité des mesures GNSS du boîtier a été vérifiée en mesurant un point fixe connu en coordonnées, et en tenant compte de l'activité ionosphérique indiquée par l'index I95. Les écarts observés sont de l'ordre de 1 à 3 cm en planimétrie et de 2 à 4 cm en altimétrie lorsque l'index I95 est inférieur à 6. Il est généralement déconseillé de travailler lorsque l'index est supérieur à 8 indiquant une forte activité. Pour notre part nous avons observé les premiers écarts significatifs supérieurs à 5cm en altimétrie pour un index I95 égal à 6, atteignant 7 cm pour un index I95 égal à 8.

Afin de valider la solution et de vérifier la fiabilité, nous avons effectué des tests comparatifs avec des outils traditionnels tels qu'une antenne GNSS conventionnelle et un scanner laser terrestre statique FARO, considérés comme des levés de référence fidèles et plus précis.

La comparaison du maillage TLS et du nuage de points viDoc (sans utilisation de GCP) sur CloudCompare avec l'outil C2M a montré un écart moyen de -0,022 m avec un écart-type de 0,012 m, c'est-à-dire que 68% des valeurs sont comprises entre -0,034 m et -0,010 m, et 99,6% entre -0,059 et 0,015, ce qui est acceptable et conforme aux exigences de la réforme. Pour valider le système, nous avons également effectué des mesures sur des nuages de points, comparées à des mesures GPS, afin d'analyser les résultats obtenus par photogrammétrie et les techniques actuelles déployées au sein de l'entreprise. Les tests ont été effectués sur trois projets différents à des dates différentes et les écarts observés sont de l'ordre de grandeur du positionnement GNSS en mode RTK, soit 2 à 4 cm en planimétrie et en altimétrie :

	Écarts vrais [m]		
	ΔX	ΔY	ΔZ
σ	0.024	0.018	0.030
Moyenne	-0.004	-0.020	-0.039
Max	0.037	0.016	0.039
Min	-0.040	-0.041	-0.068
99.6% des écarts	-0.076 < e < 0.068	-0.074 < e < 0.034	-0.129 < e < 0.051

Fig. 3 : Comparaison mesure sur nuage de points issu du viDoc et mesure GNSS classique, sur 18 points précis répartis sur 3 projets de tranchées ouvertes.

Les différents tests effectués dans le cadre de cette étude ont permis de valider le système d'acquisition qui a répondu aux exigences de précision de 10 cm, un écart moyen inférieur à 11,25 cm en planimétrie et 15 cm en altimétrie, et aucune valeur ne dépassant les seuils selon le gabarit de la classe de précision A.

Il est à noter que les seuls effets de dérive géométrique ou de l'effet dit "banane" ont été observés lorsqu'il y avait une perte importante de la précision du positionnement sur l'ensemble de l'itinéraire. Une attention particulière est accordée aux erreurs de géolocalisation absolues et relatives. Pour pallier cet effet, un système de contrôle de qualité est utilisé pour notifier à l'exécutant de placer des GCP le long de la tranchée, à des distances de prédéfinies, afin d'assurer la reconstruction du modèle. Ce processus de contrôle et d'analyse permet d'éviter l'envoi d'un géomètre pour géoréférencer le projet.

5. Conclusion et perspectives

L'étude réalisée sur le système de photogrammétrie a permis de mettre en place un processus adapté aux besoins de l'entreprise, notamment d'un point de vue économique et temporel, en réduisant les déplacements, et en particulier de mettre en place une méthode alternative aux méthodes conventionnelles par tachéométrie et GNSS.

Le système viDoc, équipé d'une antenne GNSS centimétrique, répond aux critères et aux objectifs décrits ci-dessus. Le capteur LiDAR, l'unité de mesure inertielle (IMU) et l'antenne GNSS permettent le suivi de la trajectoire et l'orientation de l'image. Dans le cas où la visibilité des satellites serait dégradée, la diminution de la précision RTK est compensée avec le module de réalité augmentée qui permet d'interpoler les positions relatives. Il est donc possible de poursuivre l'acquisition même si un masque gêne la réception du signal. Il est à noter que l'acquisition peut être réalisée sans le viDoc, avec un haut degré de recouvrement (90% minimum), et être géoréférencée avec des points d'appui pris préalablement par tachéométrie ou GPS.

Les rendus et livrables via cette solution peuvent être divers, des nuages de points aux orthophotos en passant par la production de plans géoréférencés des ouvrages construits (PGOC). Le groupe dispose des compétences et des ressources pour gérer les données 3D, et ne nécessite finalement que peu de ressources supplémentaires pour mettre en œuvre la solution. D'un point de vue commercial, la société se positionne sur un service d'assistance technique aux exécutants de travaux autour des solutions photogrammétriques existantes en y ajoutant son expertise et une brique de contrôle indépendante afin de guider les entreprises dans la qualité de leurs acquisitions et ainsi garantir la qualité du résultat. Datageo intervient par la suite sur les données 3D afin de fournir le plan de récolement, comme c'est le cas actuellement depuis des acquisitions par topographie traditionnelle ou détection.

Les perspectives de Datageo pour ce système sont de le déployer dans d'autres domaines que celui des tranchées ouvertes, en complément des levés topographiques, en raison de sa rapidité d'acquisition et de son faible coût par rapport aux outils traditionnels. Cependant, ces technologies étant en constante évolution, des améliorations sont possibles et d'autres pistes peuvent être explorées.

6. Références

Apple Newsroom@2023 (2020). Apple présente l'iPhone 12 Pro et l'iPhone 12 Pro Max avec la 5G. URL : <https://www.apple.com/fr/newsroom/2020/10/apple-introduces-iphone-12-pro-and-iphone-12-pro-max-with-5g/>
Electronics 360@2023, (2021). Teardown: Apple iPhone 12 Pro Max 5G.
URL: <https://electronics360.globalspec.com/article/16765/teardown-apple-iphone-12-pro-max-5g>
Apple@2023 (2023). Augmented reality AR Kit
URL: <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/>
vigram@2023 (2023). viDoc Multi Measurement with RTK
URL: <https://vigram.com/en/vidoc/>

Apport des nouvelles technologies (Réalité Augmentée et Jumeaux numériques) dans le cadre des chantiers soumis à la réglementation anti-endommagement.

PFE présenté par : **Rose BOUCHAREAU**
Société d'accueil : **Enedis**
Directeur de PFE : **M. Brice BOUANCHEAU**
Correcteur : **M. Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte et objectifs du projet

➤ Contexte

Etant le principal gestionnaire du réseau de distribution d'électricité, Enedis a comme priorité le respect de la législation régissant l'exécution de travaux, et tout particulièrement la réglementation anti-endommagement, dite « DT-DICT » (Déclaration de Travaux- Déclaration d'Intention de Commencement), entrée en vigueur en juillet 2012. Elle impose aux entreprises gestionnaires de réseau un recensement de l'ensemble des réseaux présents sur chaque chantier ainsi que le respect des classes de précision pour le géoréférencement. Il reste aux entreprises travaux la charge de déclarer leur chantier et reporter sur le terrain la cartographie des réseaux via le marquage piquetage.

Tout cela a pour but une limitation des endommagements des réseaux lors des phases de travaux, une amélioration de la gestion des risques concernant la sécurité des biens et des personnes, la protection accrue de l'environnement et la continuité de fonctionnement des ouvrages.

Ainsi, la réglementation impose une prise d'information sur le terrain de l'ordre de 10cm des ouvrages enterrés (génératrice supérieure) en x, y, z ainsi que l'indication des classes de précision pour chaque réseau, réparties comme ci-dessous :

- La classe A assure une incertitude de 50 cm pour les ouvrages flexibles et 40 cm pour les ouvrages rigides
- La classe B garantit une précision de 1,5m
- La classe C n'assure aucune précision

Dans le cadre de la réglementation anti-endommagement, Enedis réalise des investigations complémentaires avant travaux, l'objectif étant de faire évoluer en classe A tous les éléments identifiés en classe B et C. Pour la détection de nouveaux réseaux, elle fait appel à des géomètres. Or, ces étapes sont longues et peuvent parfois être compliquées à mettre en place. La volonté d'Enedis est de renforcer aussi bien la sécurité des biens et des personnes sur les chantiers que la fiabilisation de la cartographie.

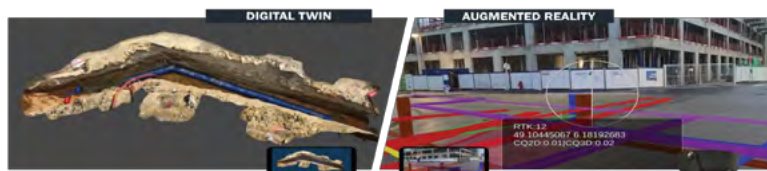


Fig. 1 : Présentation d'un jumeau numérique et de la réalité augmentée

Pour contrer ces inconvénients, tout en garantissant un réseau en classe A, Enedis souhaite mettre en place un nouveau process en ayant recours à la réalité augmentée et au recollement



photogrammétrique. Elle fait le choix d'internaliser les solutions développées par Syslor : ARCAM (réalité augmentée) et TRACEUR (jumeau numérique à partir d'un recollement photogrammétrique).

ARCAM permet la visualisation de réseaux enterrés en réalité augmentée. Elle contribue principalement à réaliser, maintenir et contrôler le marquage piquetage, à identifier la position des ouvrages tout au long d'un chantier, à contrôler les PGOC (Plan Géoréférencé des Ouvrages Construits) ... TRACEUR, quant à lui, permet, à partir de la prise de photos, la création d'un jumeau numérique de la fouille ainsi que la génération de l'orthophotographie associée. Cette solution a pour ambition de réaliser et d'améliorer la qualité des PGOC, de supprimer l'intervention du géomètre sur le chantier et d'assurer la traçabilité des accessoires.

➤ **Objectifs**

L'objectif principal de ce PFE est de déterminer si les deux solutions permettent une visualisation, une identification des réseaux en classe A et de valider l'intérêt de l'intégration des outils de réalité augmentée et de recollement photogrammétrique développés par Syslor chez Enedis. Cela s'articule autour de 2 objectifs secondaires :

- Expérimenter les solutions pour une évaluation de leur fiabilité, en interne et dans le cadre de collaboration avec des entreprises. Afin d'évaluer l'efficacité des solutions ARCAM et TRACEUR, ces dernières doivent faire l'objet d'études et d'expérimentations tels que tests terrains réalisés dans des conditions multiples, comparatifs des gains de productivité et de coûts, évaluation de la précision... En parallèle, Enedis a souhaité collaborer avec d'autres entreprises pour enrichir les expérimentations par des tests avec les futurs utilisateurs afin d'identifier les besoins spécifiques sur le terrain.
- Contribuer à la réflexion autour de la mise en place d'une solution d'automatisation du processus par le déploiement d'un serveur interne à Enedis pour la gestion de TRACEUR.

2. Matériel / Portail

➤ **Matériel**

Les deux solutions fonctionnent avec le même matériel : un smartphone couplé à une antenne GNSS. Néanmoins, ARCAM et TRACEUR utilisent deux applications distinctes. L'antenne GNSS proposée par Syslor permet un positionnement RTK, des observations multifréquences compatibles avec l'ensemble des constellations GNSS et une précision annoncée inférieure à 10cm.

➤ **Portail et application mobile**

Dans le projet, plusieurs portails et applications sont utilisés: Syslor, ARCAM et TRACEUR. Le premier permet le partage de données, la création de dossier et le traitement des acquisitions pour les solutions de réalité augmentée et pour le recollement photogrammétrique. Cherchant à internaliser ces solutions, Enedis a mis en place deux serveurs indépendants : ARCAM permettant la gestion de la réalité augmentée (création dossier, intégration de données...) et TRACEUR qui est en cours de création, visant à permettre le traitement des acquisitions et la génération automatique des plans des ouvrages géoréférencés.

Un cahier des clauses techniques et particulières reprenant les actions et l'interface souhaitée a pu être rédigé en coopération avec les entreprises. La problématique cybersécurité est primordiale. Elle est portée par un partenariat Enedis, Syslor et Davinking.

3. Données expérimentales

Afin de démontrer que les solutions Syslor permettent une représentation en classe A des réseaux, des acquisitions sont réalisées sur un maximum de chantiers divers, le but étant d'avoir un échantillon représentatif des conditions réelles et de pouvoir tester la solution dans des environnements différents. Plusieurs éléments sont à prendre en compte dans le choix des chantiers : environnements (rural, urbain...), longueur de tranchées, type de chantier (branchement, raccordement...), ...

Aux données expérimentales acquises lors du stage, s'ajoutent les données obtenues par les prestataires. L'utilisation des solutions par les entreprises permet entre autres à Enedis et Syslor de tester la maniabilité de leur appareil par les techniciens terrain, d'auditer le process de prise de vue.

4. Réalité augmentée

➤ Méthodes de représentation

Dans un premier temps, il s'agit d'intégrer, sur le portail de réalité augmentée, un fichier shp reprenant des éléments issus tout particulièrement du SIG ou de la cartographie à grande échelle d'Enedis ou un fichier dgn comprenant les plans de synthèse multiconcessionnaires... de la zone souhaitée.

Il est également possible d'intégrer directement un fichier shp des réseaux pour d'une entité régionale ou une ville. Sur le terrain, à partir de la position du GNSS, l'application affiche le réseau dans un rayon de 2km. Nous retrouvons sur ces plans, la visualisation des zones d'incertitude correspondant aux différentes classes.

La procédure de visualisation des plans intégrés se réalise en 2 étapes :

- Détection du sol : déplacement rectiligne dans une direction sur environ 5m
- Projection du modèle avec un recalage automatique

Pour lever la contrainte liée à la connectivité GNSS (connexion impossible ou non précise), une nouvelle version de l'application de réalité augmentée sans GNSS a pu être testée uniquement via l'application de réalité augmentée Syslor. Elle permet, à partir de deux points communs entre les éléments du fond de plan et la réalité, de caler le modèle pour aboutir à sa projection. Cette méthode étant en phase de test, elle nécessite encore un recalage manuel régulier du modèle. Ce mode de fonctionnement est en cours d'amélioration pour éviter la contrainte citée précédemment.

➤ Analyses

Les analyses pour ARCAM sont réalisées entièrement sur le terrain. Plusieurs éléments peuvent être vérifiés : le marquage piquetage, le fond de plan ou encore le PGOC.

A partir des deux premiers éléments précités, la vérification de la visualisation des réseaux en classe A peut se faire en retraçant les éléments au sol à partir de la réalité augmentée. Les écarts sont alors mesurés directement sur le terrain. Pour le PGOC, il est possible de vérifier le bon positionnement des réseaux dans les traces de remblais de la fouille au sol ou directement avec le réseau si la fouille est encore ouverte.

5. Recollement photogrammétrique

➤ Méthodes d'acquisition

L'acquisition des données TRACEUR sur les chantiers se déroule en 2 étapes :

- Positionner les GCP (Groud control point) de part et d'autre de la tranchée, répartis de façon homogène de sorte à encadrer la fouille. Ces derniers sont généralement représentés par des cibles afin d'automatiser le traitement mais peuvent être modélisés sous tout type de forme (points de bombe, piquet...). Par la suite, ces points sont relevés au GNSS et servent de points de calage pour la modélisation 3D. Il est donc primordial que ces derniers soient immobiles entre le levé et la prise de photo
- Prise de vue. Elle peut être réalisée de deux façons : par photo ou vidéo. Un procédé rigoureux est mis en place pour les deux types d'acquisition: réalisation d'un aller-retour autour de la fouille, prise en photo de tous les points de calage et non modification du zoom. Comme expliqué dans la littérature, cette partie est la plus complexe du processus de photogrammétrie, il est donc nécessaire d'être vigilant à la qualité de la prise de vue : tous les réseaux doivent être correctement visibles, avoir une orientation correcte du téléphone (environ 20°) ou adopter une allure faible.

➤ Analyses

Pour une analyse quantitative, dans un premier temps, nous nous attachons à comparer les coordonnées des GCP obtenues par relevé GNSS et les coordonnées de ces mêmes points sur le nuage de points. Dans un second temps, nous portons notre attention sur un des indicateurs le plus important, l'écart calculé entre le PGOC obtenu par détection traditionnelle et celui par recollement



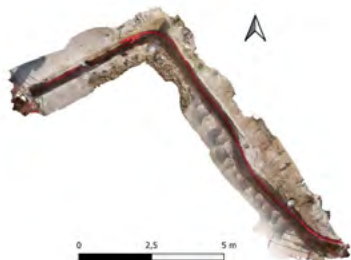


Fig. 2: Visualisation de l'orthophoto d'une fouille

photogrammétrique. Ces deux comparaisons permettent de vérifier de façon directe l'appartenance à la classe A.

Pour une analyse qualitative, il est possible de réaliser une comparaison visuelle avec le géoréférencement massif d'Enedis. Celui-ci regroupe des orthophotos réalisées par photogrammétrie aérienne. Ces dernières permettent une précision de 5cm.

Comme évoqué précédemment, Enedis possède un SIG comprenant l'ensemble de son réseau ainsi que des éléments de voirie. Ces derniers peuvent permettre une précision de 10cm sur la majorité du territoire. Il est donc pertinent pour les chantiers proches de voiries de comparer les acquisitions avec ces plans vecteurs.

De plus, l'acquisition sur certains chantiers se fait en plusieurs prises de vue. Dans ce cas, il est possible de réaliser, à partir de cloud compare, une comparaison des nuages de points de la zone commune. L'utilisation d'une même cible entre chaque prise de vue, permet de comparer ses coordonnées sur chaque nuage de points.

6. Indicateurs de performance

Les indicateurs d'évaluation du projet ont été définis sur la base de l'état de l'art et du retour d'expérience de précédentes expérimentations :

- Respect de la classe A
- Gain de temps : sur le terrain pour la détection et/ou dans le traitement pour la gestion du dossier et les retours des différents intervenants
- Amélioration de la sécurité des biens et des personnes sur les chantiers
- Suivi de l'état du système mobile (batterie du téléphone, stockage...)

7. Conclusions et perspectives

La présentation des 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 nous amènent à constater un fort impact des solutions Syslor pour l'amélioration des conditions de détection et de marquage des réseaux. Les gains de productivité sont notables: moins de déplacement sur les chantiers, gain de temps, coûts moins élevés, diminution du nombre d'accident du travail.... Les chantiers ont gagné en sécurité grâce à un remblai rapide des tranchées, à la suppression de la nécessité de se rendre dans la fouille... Enfin, nous avons pu noter une nette réduction des dégâts aux ouvrages: une plus grande précision dans la connaissance des réseaux évite des dégradations de canalisation ou de câbles. Il reste à évaluer le gain de précision du calcul des cubatures. De plus, l'hypothèse de la visualisation et de la détection des réseaux en classe A grâce aux solutions Syslor s'avère en voie de validation.

A ce jour, l'implantation du serveur interne à Enedis, TRACEUR, est conditionnée par la réalisation d'un cahier des clauses techniques et particulières et par la finalisation du travail de développement : algorithme de calcul de cubatures, de reconnaissance de matériel par deep learning, de qualification et localisation et de génération automatique du tracé du PGOC.

L'intensification de l'expérimentation auprès des entreprises partenaires permettrait un retour d'expérience orienté terrain ainsi qu'une appropriation des solutions par les équipes terrains. Cela donnerait lieu à un retour d'expérience prenant en compte les demandes des entreprises permettant ainsi d'identifier les améliorations nécessaires des solutions et les accompagnements à mettre en place pour faciliter la conduite du changement. Ainsi, à l'avenir, le projet aura à mettre en place une méthodologie favorisant la motivation et l'implication des équipes et en limitant les résistances au changement.

Détection du taux de régénération des forêts secondaires du Congo par télédétection

PFE présenté par :

Soufiane Eddarif

Société d'accueil :

INRAE

Directeur de PFE :

Frederic Frappart & Marc Peaucelle

Correcteur :

Tania Landes

Encadrant :

Frederic Frappart & Marc Peaucelle & Bertrand Ygorra



1. Introduction :

Les forêts jouent un rôle crucial dans la régénération des écosystèmes et la conservation de la biodiversité, en particulier dans des régions riches en biodiversité comme le Congo. Cependant, la déforestation massive et la dégradation des forêts ont des conséquences dévastatrices, menaçant la capacité de ces écosystèmes à se régénérer et à fournir des services écosystémiques essentiels. Parmi ces services, on peut citer la séquestration du carbone, la régulation du climat et la fourniture d'habitats pour la biodiversité.

Pour comprendre et évaluer le potentiel de régénération des forêts secondaires au Congo, il est essentiel de surveiller de manière précise les taux de régénération. Ce projet de mémoire de master, réalisé à l'INRAE Bordeaux Nouvelle-Aquitaine sous la direction du Dr. Frédérique Frappart et du Dr. Marc Peaucelle, spécialistes de la télédétection et de la cartographie des écosystèmes forestiers, vise à utiliser des techniques de télédétection pour détecter et quantifier le taux de régénération des forêts secondaires au Congo. Des images satellites haute résolution seront utilisées pour développer des méthodes avancées de traitement d'images et d'analyse spatiale, fournissant des informations précises et détaillées sur les zones de repousse tout en identifiant les facteurs environnementaux qui influencent le processus. En utilisant la télédétection, ce projet contribue à comprendre le potentiel de régénération des forêts secondaires au Congo et fournit des informations cruciales pour la conservation et la gestion durable de ces écosystèmes.

2. Description des cartes données utilisées :

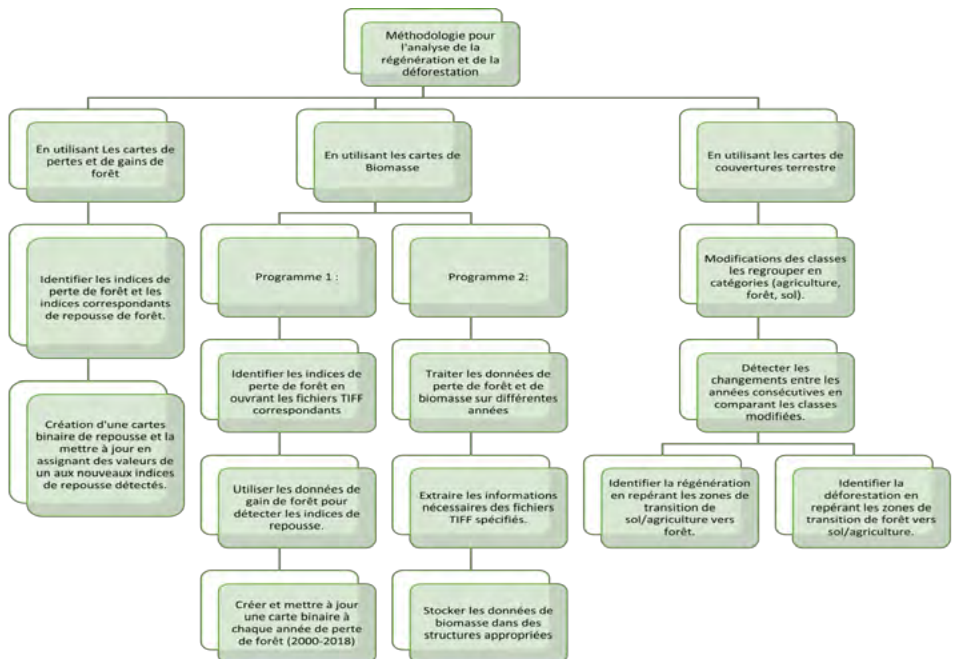
Caractéristiques	Cartes Hansen Loss year et Hansen Gain	Cartes de Biomasse ESA-CCI	Cartes de Land Cover ESA-CCI
Satellite utilisé	Landsat	Sentinel-2	Envisat (2002-2012)
Résolution spatiale	30 mètres	100 mètres	300 mètres
Informations fournies	Déforestation et régénération de la végétation.	Biomasse forestière et quantité de carbone stockée.	Types de couverture terrestre.
Utilisations	Recherche sur la déforestation, surveillance de l'environnement, planification de la conservation des ressources forestières.	Évaluation de la santé des forêts, surveillance des changements dans leur structure, gestion durable des ressources naturelles.	Planification de l'utilisation des terres, gestion des ressources naturelles, études environnementales à grande échelle.



Caractéristiques	Carte Pan Tropical Forest Strata	Carte Intact Forest Landscape	Carte Terrestrial Ecoregions of the World
Classement des forêts	Différentes strates basées sur leur structure et leur fonction écologique.	Zones forestières largement intactes.	Facteurs écologiques.
Informations fournies	Composition floristique, densité de la végétation, types de forêts.	État de conservation des forêts vierges, rôle dans la préservation de la biodiversité et la régulation climatique.	Répartition et diversité des écosystèmes terrestres.
Utilisations	Évaluation de la distribution et des changements des écosystèmes forestiers tropicaux.	Évaluation de la proportion de forêts vierges, identification des zones prioritaires pour la conservation des écosystèmes forestiers intacts.	Évaluation de la diversité des écosystèmes, répartition des habitats, connectivité écologique.

Tableaux : Descriptions des cartes utilisées pour le traitement au cours du projet

3. Développement d'une méthode de détection de régénération et déforestation :



Organigramme : Méthodologie suivie pour détecter la régénération et la déforestation dans le bassin du Congo

4. Analyse des résultats :

Le graphique illustre la dynamique temporelle des valeurs de biomasse extraites des pixels dérivés de la carte de Hansen loss year. Il montre trois courbes représentant les valeurs de biomasse pour les années 2000 à 2018, avec la carte de biomasse 2010 affichée en bleu, la carte 2017 en jaune et la carte 2018 en vert. Les courbes de 2017 et 2018 présentent une forme similaire, avec un décalage d'un an dû à la disponibilité des données. Cependant, la courbe bleue représentant les valeurs de biomasse de 2010 semble distincte des deux autres. La différence observée entre la courbe bleue (2010) et les courbes jaune et verte (2017 et 2018) peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, il est important de considérer que la carte de la biomasse de 2010 a été générée à partir de données antérieures de huit ans aux deux autres cartes.

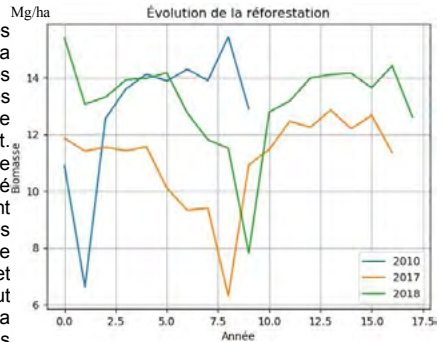


Figure : Graphe d'évolution de la biomasse en fonctions des années de coupes.

Au cours de cette période, divers facteurs ont pu influencer l'évolution de la biomasse, notamment les perturbations naturelles (incendies de forêt, invasions d'insectes) et les activités humaines (déforestation, dégradation des forêts).

En outre, les progrès de la technologie satellitaire et des techniques de traitement des données peuvent avoir contribué à améliorer la précision et la résolution des cartes de la biomasse de 2017 et 2018. Ces améliorations ont pu conduire à une meilleure détection et représentation des valeurs de biomasse par rapport à la carte de 2010. Ainsi que, les changements dans les conditions environnementales et les pratiques d'utilisation des terres entre 2010 et 2017/2018 pourraient avoir influencé les différences observées. Des facteurs tels que la variabilité du climat, les interventions de gestion des terres et les initiatives politiques peuvent avoir affecté les niveaux de biomasse au cours de cette période.

Des diagrammes de dispersion ont été réalisées également pour décrire la densité basée sur les valeurs de biomasse pour les années 2010, 2017 et 2018. Toutefois, une irrégularité a été observée dans le diagramme de dispersion généré pour l'année 2007, où un seul point de densité était présent. Cette anomalie peut être attribuée à d'éventuelles limitations des données ou à des erreurs dans les cartes de la biomasse pour cette année-là. Il est plausible que le processus de collecte des données ou les techniques de traitement employées pour la carte de la biomasse de 2007 aient donné lieu à une valeur aberrante ou à des inexactitudes, ce qui a conduit au point de densité solitaire observé dans le nuage de points.

En ce qui concerne l'année initiale de chaque diagramme de dispersion, dans laquelle tous les points de densité semblent très concentrés, ce phénomène peut être attribué aux conditions initiales de la zone d'étude. L'année initiale représente une période où la forêt secondaire a connu une repousse rapide ou présenté une densité de biomasse élevée en raison de conditions environnementales favorables, telles qu'un ensoleillement suffisant, la disponibilité de nutriments ou des perturbations minimales. Lorsque les années suivantes sont prises en compte, les diagrammes de dispersion peuvent présenter des variations de densité, reflétant la nature évolutive de l'écosystème forestier en réponse aux changements des facteurs environnementaux.

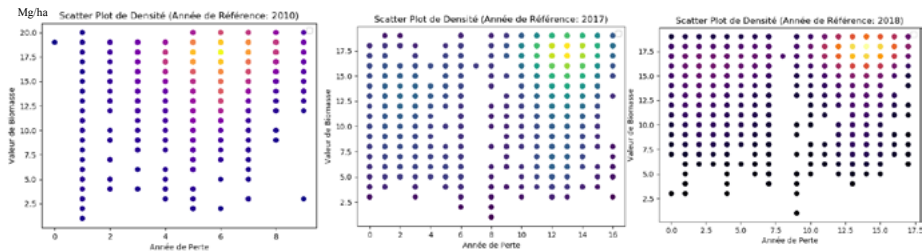


Figure 2: Diagrammes de dispersion des pixels en fonctions de leurs valeurs de la biomasse en Mg/ha au cours des années

un autre graphique décrivant l'évolution du nombre de pixels classés comme forêt de 1992 à 2015 a été inclus. Ce graphique montre une nette tendance à l'augmentation du nombre de pixels forestiers au fil des ans, indiquant la croissance de la forêt secondaire dans la région du Congo. L'expansion des pixels forestiers suggère une régénération réussie et l'expansion de la couverture forestière, potentiellement due à des processus naturels ou à des efforts de reboisement.

5. Conclusion :

L'analyse révèle la dynamique temporelle des valeurs de biomasse dans les forêts secondaires de la région du Congo, avec des similitudes et des différences entre les années soulignant les influences des perturbations naturelles, des activités humaines, des progrès technologiques et des changements environnementaux sur la régénération des forêts. Les modèles de densité cohérents décrits dans les diagrammes de dispersion offrent des informations précieuses, à l'exception d'une anomalie de 2007 attribuée à des limitations ou des erreurs de données. Une forte concentration de densité au cours des premières années indique une repousse rapide et des conditions environnementales favorables, tandis qu'une tendance à l'augmentation des pixels de forêt de 1992 à 2015 signifie une régénération et une expansion réussies. Ces résultats soulignent l'interaction complexe des facteurs environnementaux et humains, nécessitant des analyses et des études plus approfondies pour une compréhension globale de la régénération des forêts secondaires au Congo. La recherche contribue à la compréhension de la régénération potentielle et soutient les efforts de conservation, en guidant la prise de décision éclairée pour la préservation de la biodiversité.

En conclusion, les résultats actuels fournissent des indications prometteuses sur le taux de repousse des forêts secondaires dans la région du Congo, mais des travaux futurs sont nécessaires pour une interprétation complète des résultats. La soutenance de cette recherche offrira une opportunité précieuse pour partager les résultats finaux et les conclusions définitives concernant le taux de repousse des forêts secondaires, contribuant ainsi à l'amélioration de la conservation et de la gestion durable de ces écosystèmes importants.

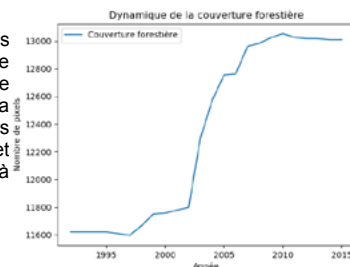


Figure 3 : Dynamique de la couverture forestière entre 1992-2015

Identification et mise en œuvre d'outils BIM/SIG pour la gestion et le pilotage de projets de maîtrise d'œuvre complexes



PFE présenté par : **Baptiste Mischler**
Société d'accueil : **OTE Ingénierie**
Directeur de PFE : **Stéphane Moisy**
Correcteur : **Mathieu Koehl**



1. Contexte et objectifs

Le rapprochement entre BIM et SIG possède deux caractéristiques : il est **nouveau** puisque l'avènement du BIM, dans les projets de construction à forte technicité, et la prise en charge de rendus 3D complexes dans les SIG sont seulement possible depuis une petite dizaine d'années et il évolue **rapidement** avec, chaque année, de nouvelles techniques, logiciels, outils et processus d'intégration.

Bien que, les domaines du BIM et SIG possèdent des points de divergences et des limites qui leurs sont propres, une mise en confrontation est nécessaire pour déterminer les modes de cohabitation qui tirent parti de leurs caractéristiques intrinsèques. C'est dans ce but que s'inscrit ce travail : **réaliser une intégration BIM/SIG** afin de développer un outil de gestion de projets de maîtrise d'œuvre complexes.

L'étude de cas abordée est la **restructuration du Stade de la Meinau de Strasbourg**. Un tel projet de rénovation est intéressant d'un point de vue de la géomatique pour plusieurs raisons : l'emprise des travaux est conséquente ; la localisation du site se trouve au cœur de la ville ; les travaux sont pluriannuels ; enfin le chantier sera réalisé en site occupé.

La finalité de l'étude est de pouvoir visualiser et analyser, au fil du temps, l'emprise des zones occupées par le chantier et par le public, ainsi que l'ensemble des flux liés aux travaux et à la fréquentation du stade. En d'autres termes, l'objectif sera de développer une **maquette BIM/SIG 4D**.

L'outil déployé vise un public élargi qui pourra interagir avec le projet à travers une plateforme numérique. Pour atteindre cet objectif, trois étapes sont à mettre en œuvre :

1. Intégrer l'ouvrage, le projet et son environnement avec des données géospatiales
2. Modéliser les phases de travaux en 3D, les flux (piétons et véhicules) et la dimension temporelle du chantier
3. Partager cette maquette BIM/SIG 4D à travers une application web pour la visualisation et l'analyse à l'aide d'un ensemble d'outils dédiés

Les objectifs de l'étude visent à avancer sur un ensemble de problématiques liées à la gestion d'un projet BIM/SIG. Ils sont énoncés ci-dessous :

- La convergence : étudier la convergence BIM-SIG d'une manière globale dans le domaine AEC (Architecture, Engineering & Construction)
- Les solutions logicielles : évaluer des solutions d'intégration BIM-SIG existantes
- La conception et le développement : exploiter des possibilités de cette intégration en l'appliquant à un projet de construction d'infrastructure complexe
- La diffusion : publier des résultats dans une interface interactive où les données seront interopérables et interrogeables dans un but de consultation, d'analyse et de communication.



2. Enjeux d'une intégration BIM-SIG

2.1. Interopérabilité

L'interopérabilité est la capacité de cohabitation des données en termes de structure et de format de fichier. L'objectif est de pouvoir conserver, lors de l'import vers le SIG, les géométries 3D et les informations sémantiques du fichier BIM d'origine. Dans la plupart des projets d'intégration la conversion s'effectue du modèle BIM vers le SIG, puisque les possibilités de manipulation des données sont plus riches dans ce dernier.

Le format **IFC** (*Industry Foundation Classes*) promet d'être le format standard d'échange d'informations pour le BIM. Il ainsi pour objectif de palier les soucis d'interopérabilités entre les logiciels. Depuis la version 4 du format, l'IFC est capable d'ajouter et d'éditer des éléments donnant des informations géographiques (**Liu et al., 2017**). Parallèlement, il existe le standard **CityGML**. Mondialement reconnu pour stocker, échanger et représenter des modèles de ville 3D en conservant les aspects géométriques et sémantiques de chaque objet, il a l'avantage de prendre en charge le géoréférencement des données. Il est ainsi particulièrement adapté aux applications géospatiales et à une utilisation dans un SIG.

Dans la pratique, le nombre important de classes du standard **IFC** implique une ambiguïté de description des éléments et ajoute de la complexité au format (**Noardo et al., 2020**). Des défauts de représentation aberrants surviennent suite à une perte de géométrie dû à l'import ou à l'export des fichiers. D'autre part, étant principalement dévoué aux SIG, le **CityGML** est plus apte à assurer une « continuité numérique » de la donnée.

2.2. Outils de conversion

Il n'existe pas une unique façon de résoudre la problématique d'intégration mais bien plusieurs, qui varient en fonction de besoins spécifiques à chaque projet. Par la complexité des domaines BIM et SIG, chaque méthode répondra à un objectif précis, défini par ses utilisateurs. C'est ainsi que l'on recense dans la littérature, plusieurs méthodes et outils d'intégration.

Pour évaluer ces différentes solutions, **Liu et al. (2017)** proposent un critère nommé « EEEF » : *Effectiveness, Extensibility, Effort, Flexibility* (Efficacité : perte d'information minimisée ; Extensibilité : haut degrés d'ouverture/d'évolutivité ; Effort : temps/travail/coûts ; Flexibilité : possibilité qu'un résultat puisse être appliqué à d'autres études).

2.3. Avantages et inconvénients d'une intégration BIM-SIG

Après un travail de synthèse de la littérature scientifique, les avantages et inconvénient d'une intégration BIM-SIG sont proposé dans le **Tableau 1**.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Meilleure application de la méthodologie BIM par l'apport des données SIG- Enrichissement des maquettes 3D urbaines- Analyses spatiales- Extension des possibilités de modélisations des phénomènes et éléments du monde réel- Evolution vers les concepts de <i>CIM</i> et <i>Smart City</i>- Visualisations 3D réalistes	<ul style="list-style-type: none">- Complexité de l'interopérabilité entre les données.- Géolocalisation fichiers BIM pas toujours renseignée- Perte d'information- Taille des fichiers- Adoption encore timide pour de véritables projets à des fins de prise de décision

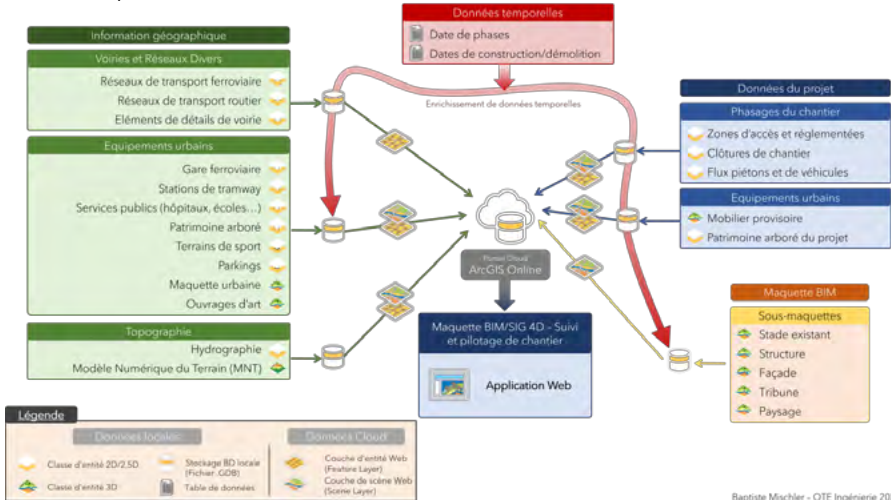
Tableau 1 : Avantages et inconvénients d'une intégration BIM-SIG.



3. Modèle conceptuel de l'intégration BIM-SIG

L'architecture du modèle conceptuel de l'intégration BIM-SIG a été élaborée pour que l'application web remplissent les objectifs de développement d'une maquette BIM/SIG 4D. Le schéma est organisé sous la forme d'une étoile où les données, situées à l'extérieur, convergent au centre pour représenter l'intégration sur la plateforme d'hébergement en ligne et dans l'application finale (**Fig. 1**).

Pour la mise en œuvre de l'intégration BIM-SIG, le choix a été porté sur l'utilisation des solutions issues du partenariat entre *Esri* et *Autodesk*.



Baptiste Mischler - OTE Ingénierie 2022

Fig. 1 : Modèle Conceptuel de l'Intégration BIM-SIG

4. Contexte géographique

Les données utilisées proviennent pour l'essentiel de l'Eurométropole de Strasbourg via son programme *OpenData*. Par exemple, les données nuage LiDAR de 2021 ont permis de créer une maquette précise des bâtiments du quartier à l'aide d'*ArcGIS Pro* et *CityEngine*. Ce socle est complété par des données de la BD TOPO de l'IGN, de la plateforme collaborative *OpenStreetMap* et des données métiers collectés par OTE dans le cadre de la maîtrise d'œuvre.

5. Traitements

Les maquettes BIM du stade proviennent de la plateforme cloud *BIM Collaborate Pro* (*Autodesk*). Depuis 2017, le partenariat entre *Autodesk* et *Esri* a permis de mettre en œuvre une convergence BIM/SIG entre ces deux écosystèmes. Les fichiers *Revit* contenant les maquettes sont ainsi directement lisibles par le SIG *ArcGIS Pro*. Après des opérations de filtrage dans *Revit*, les maquettes BIM sont intégrées dans le SIG pour réaliser les traitements avant leur publication dans *ArcGIS Online*. Ces traitements consistent à appliquer à chaque éléments BIM une date de construction ou de

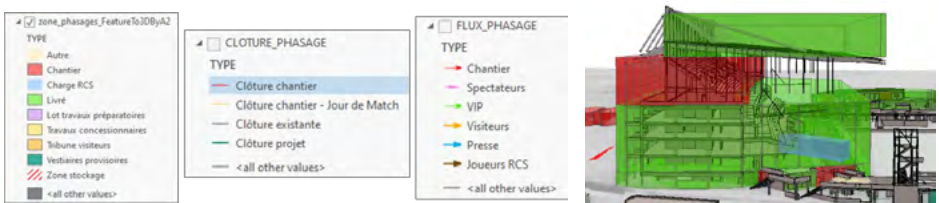


Fig. 2 : Symbologie des 3 couches de phases numérisées dans le SIG. À droite : Représentation de la couche ZONES dans la fenêtre graphique d'ArcGIS Pro.

démolition. Ils sont capitaux pour répondre à l'un des objectifs principaux de l'étude : visualiser le déroulé de la construction avec une simulation temporelle à l'aide d'un curseur (« *Time Slider* »). Les plans de phases des travaux du stade, au format .pdf, ont été digitalisés manuellement dans *ArcGIS Pro* afin de constituer une base de données 4D reprenant les éléments de ces plans. 3 couches vectorielles sont créées à partir de ces plans (**Fig. 2**) : **ZONES** et éléments provisoires du chantier ; **CLÔTURES** de chantier, existantes et de projet ; **FLUX** de véhicules et piétons.

6. Application web

L'interface interactive de consultation des données et des résultats de l'étude est une application web développée avec les outils de conception d'*Esri* (**Fig. 3**). En demandant uniquement un éditeur de texte et disposant d'une bonne flexibilité avec l'utilisation des langages web (*HTML*, *CSS* et *JavaScript*), il a été choisi d'utiliser le kit de développement *ArcGIS Maps SDK for JavaScript* pour réaliser une application entièrement personnalisable.

Une grande partie du développement a été consacrée à l'utilisation du module *TimeSlider* avec des couches 3D de type *SceneLayer*, une fonction nativement indisponible par la *SDK*. Un filtrage temporel du côté client a ainsi été choisi pour accélérer l'affichage des éléments BIM lors du défilement du curseur afin de garantir une bonne fluidité de l'application. D'autres fonctions/widgets essentiels pour remplir les objectifs du projet ont été développés dans l'application.



Fig. 3 : Interface de la maquette 4D de l'application web avec les différents widgets encadrés en couleur.

Cette maquette 4D interactive a permis de valider la pertinence d'intégrer les données BIM dans son contexte géographique. L'intégration apporte une réelle valeur ajoutée aux données, aux méthodologies de travail et donne des pistes pour mieux échanger les informations entre les acteurs d'un projet.

7. Références bibliographiques

LIU, X., WANG, X., WRIGHT, G., CHENG, J., LI, X. et LIU, R. (2017). *A State-of-the-Art Review on the Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS)*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6(2). Article No. 53.

NOARDO, F., HARRIE, L., ARROYO OHORI, K., BILJECKI, F., ELLUL, C., KRIJNEN, T., ERIKSSON, H., GULER, D., HINTZ, D., JADIDI, M., PLA, M., SANCHEZ, S., SOINI, V.-P., STOUFFS, R., TEKAVEC, J. et STOTER, J. (2020). *Tools for BIM-GIS Integration (IFC Georeferencing and Conversions) : Results from the GeoBIM Benchmark 2019*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(9). Article No. 502.

Acquisition 3D et création de maillage d'objets complexes dans le contexte du HBIM pour une intégration géoréférencée dans le logiciel Autodesk Revit



PFE présenté par : **Lucille Fauvel**
Société d'accueil : **Novatlas**
Directeurs de PFE : **Fabien Neyens et Marc Duperthuy**
Correcteur : **Mathieu Koehl**



1. Introduction

L'acquisition 3D et la modélisation de maillages complexes sont des techniques importantes dans le contexte de la modélisation des informations sur les bâtiments historiques (HBIM). L'acquisition 3D implique l'utilisation de technologies telles que le balayage laser ou la photogrammétrie pour collecter des données sur la géométrie et les détails d'un bâtiment. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour créer un modèle numérique détaillé et précis du bâtiment. En complément de ces méthodologies, la modélisation de maillage complexe est un mode de représentation numérique d'objets complexes dans un modèle 3D. Ce procédé consiste en la décomposition d'un élément en un grand nombre de petites faces plates (sous forme de triangles ou bien de quadrilatères), qui sont ensuite reliées entre elles pour former un maillage. Cette méthode est souvent utilisée pour créer des modèles très détaillés et est particulièrement utile dans le contexte de HBIM car elle permet de capturer des détails complexes tels que des éléments décoratifs et des caractéristiques architecturales. La combinaison des techniques d'acquisition 3D et de modélisation de maillage complexe permet la création de modèles numériques détaillés et précis de bâtiments historiques. Ces modèles peuvent ensuite être utilisés à diverses fins telles que la planification de la rénovation, la conservation de l'édifice ou encore les visites virtuelles. De plus, la précision et la richesse des détails du modèle amélioreront la compréhension de l'histoire, du contexte et du développement du bâtiment, permettant des décisions de préservation plus précises. L'utilisation de l'acquisition 3D et de la modélisation de maillage complexe dans HBIM permet également d'améliorer la collaboration et la communication entre les professionnels impliqués dans la préservation des bâtiments historiques. Ces modèles peuvent être facilement partagés et accessibles par différentes parties prenantes, facilitant ainsi le processus de préservation. Cette approche peut faciliter le processus de préservation, tout en améliorant la compréhension du bâtiment et de son contexte historique.

L'étude de ce projet de fin d'étude prend place pendant la campagne de numérisation de la Cathédrale Saint-Étienne de Toulouse, sur demande du cabinet d'architecture Amiot à l'entreprise Novatlas. Comme la grande majorité des demandes rencontrées par cette dernière, la finalité de la mission consiste à obtenir des plans 2D à jour du monument. Dans le but de développer leurs procédés de numérisation et de traitement dans un contexte HBIM, la société Novatlas a décidé de prendre ce cas d'étude comme une opportunité d'amélioration de leur méthodologie de travail. L'objectif de ce PFE est dans un premier temps d'assister les équipes terrain lors de la phase d'acquisitions 3D ainsi que de comprendre et d'optimiser les méthodologies appliquées aux levés du patrimoine historique. Un autre objectif sera, dans un second temps, de définir une méthode d'intégration de maillage haute définition et/ou de modélisation précise de modénature spécifique aux missions de sauvegarde du patrimoine. Le but de cette étude sera également de définir les possibilités et les limites sur des éléments identifiés tels que des modénatures, des statues ou autres éléments complexes afin que l'entreprise puisse répondre aux demandes HBIM et proposer de nouvelles solutions aux demandes de leurs clients.



2. PHASE 1 : Acquisition 3D et traitement des données

La première partie de ce mémoire sert de base au développement de l'étude et répertorie les instruments, les procédés et les outils mis à disposition par l'entreprise. Concernant le choix d'instrumentation effectué durant ce PFE, la pertinence d'utilisation entre le Z+F IMAGER 5016 et le RTC 360 réside dans leurs différences respectives. Alors que le Z+FIMAGER 5016 permet d'effectuer des scans de plus gros volumes avec un principe de bulle plus précis et une portée plus grande, le RTC 360 permet quant à lui de scanner de plus petits volumes en un temps très rapide. Le trépied en carbone, la petite taille de l'appareil et son poids réduit en font l'instrument adéquat pour accéder à des zones plus complexes d'accès comme les escaliers en colimaçon étroits de la cathédrale. A contrario, le Z+F IMAGER 5016 n'est pas autant maniable mais permet d'obtenir une très bonne qualité de photos et permet également d'effectuer des 'zoom' de scans sur certaines zones afin de concentrer la donnée (l'appareil vient rescanner une zone définie par l'utilisateur avec une plus grande résolution afin de venir compléter le nuage de points). Les deux instruments sont donc complémentaires par leurs différences dans le levé de la cathédrale Saint-Étienne de Toulouse dans le cadre de la mission effectuée. C'est surtout au niveau des choix de paramètres des instruments lors de l'acquisition sur terrain qu'un point de vue critique peut être apporté.

Par ailleurs, le choix de l'instrumentation pour le levé photogrammétrique a lui aussi été réfléchi en réponse aux enjeux de la mission. L'utilisation du drone Matrice 300 RTK nous permet d'obtenir une grande qualité d'images grâce à son capteur 45 MPx et son paramètre de plein format. Moins imposant que le Matrice 300 RTK, le drone DJI Phantom V2.0 nous permet d'obtenir les données des zones plus difficiles d'accès autour de la cathédrale avec une distance de vol d'environ 5 mètres par rapport aux façades. Cela nous permet d'obtenir une précision entre 5 mm et 1 cm qui a pour but de se rapprocher de la précision du levé lasergrammétrique. L'utilisation de ces deux appareils nous permet de relever avec précision le bâtiment de la cathédrale.

Le choix des logiciels de traitement des données lasergrammétriques est inhérent au matériel utilisé, d'où l'utilisation des logiciels Cyclone Register 360 et Z+F. Ces deux logiciels de traitement nous permettent tous deux de géoréférencer les nuages de points des stations effectuées, ainsi que d'exporter ces dernières au format .e57 qui est le format de référence utilisé par l'entreprise. Leur import sur Autodesk Recap permet d'effectuer la passerelle entre le pôle Acquisitions 3D et le pôle BIM/CIM de l'entreprise avec l'enregistrement des fichiers comme 'RCP - Tour Virtuel Unifié' comprenant le nuage de points complet géoréférencé ainsi que les visuels de chaque station du nuage (photographie 360° prise depuis le scanner laser).

En conclusion, cette première partie recense les méthodes employées sur terrain afin d'effectuer le levé de la cathédrale Saint-Etienne de Toulouse, en prenant en compte son architecture complexe et les problématiques qui en résultent.

3. PHASE 2 : Création de maillages d'objets complexes

La seconde phase du PFE a consisté à effectuer une étude de marché sur les logiciels permettant la création de maillages complexes sur des objets et des éléments tels que des statues, des modénatures, des voûtes, etc. Après comparaison et étude, il est apparu évident que le logiciel Reality Capture répondait à ces besoins. Après utilisation pour le recalage des données photogrammétriques et lasergrammétriques et la création d'un modèle maillé sur un élément de la cathédrale, nous pouvons constater que les paramètres par défaut du logiciel sont globalement convaincants et permettent de fournir des rendus très satisfaisants sur des petits éléments. Dans le cadre de l'export au format .obj d'une gargouille de la cathédrale, nous n'avons pas rencontré de problème particulier dans la création du maillage, la texturation ou l'application d'une correction colorimétrique. Cependant, nous notons que la partie la plus longue a été d'assembler les composants des différentes façades et toitures. Le temps d'alignement des composants a été très majoritairement la partie la plus chronophage du processus (jusqu'à 8h de calcul pour l'alignement des photos). En revanche, grâce à l'application d'un masque d'écrêtage à partir d'une 'boîte de construction', nous avons pu mailler, texturer et coloriser le modèle de gargouille relativement rapidement.

Les photographies acquises sur site étaient très nombreuses, et ont dû être divisées par deux afin de ne pas trop ralentir les temps de calcul. Par ailleurs, l'ajout de données lasergrammétriques représente un atout de taille dans la manipulation et le traitement des données tridimensionnelles donnant un nuage de points très complet. Par ailleurs, concernant le dossier de fichier créé lors de l'export, il est très intéressant de noter que les fichiers MTL et PNG contiennent les informations de texture et de colorimétrie complémentaires au fichier OBJ de géométrie.

4. PHASE 3 : Intégration d'objets maillés géoréférencés dans l'environnement BIM

Nous retrouvons dans la troisième phase de la méthodologie développée une étude de marché réalisée courant janvier 2023 sur les différents outils existants permettant l'importation de maillages dans le logiciel Autodesk Revit. Après comparaison et étude, le plugin Dynamo étant intrinsèque au logiciel Revit, et non payant, c'est donc vers ce dernier que notre choix s'est tourné afin de simplifier le flux de travail et la méthodologie. De plus, l'utilisation de '**Dynamo Player**', une seconde interface de Dynamo dans Revit permettant une utilisation simplifiée des programmes scriptés, facilite grandement son utilisation par tous les collaborateurs. L'utilisation de Dynamo pour répondre aux enjeux du PFE apparaît donc comme la meilleure option possible pour atteindre les objectifs de l'entreprise.

L'utilisation de Dynamo donne lieu à la création de scripts personnalisés à l'aide d'une interface graphique, où les nœuds représentent différentes opérations ou fonctions qui peuvent être connectées ensemble pour former une chaîne de nœuds représentant un script personnalisé. Cette programmation visuelle, couplée à l'utilisation de différents packages définis dans le mémoire, contribue à l'écriture d'un script d'importation de maillages dans le logiciel Autodesk Revit. Contrairement au plugin 'Mesh Import' proposé dans Revit pour importer des objets maillés, l'écriture du script Dynamo a pu répondre aux problématiques de géoréférencement en gardant les données tridimensionnelles du maillage, ce qui autorise l'importation des éléments à leur emplacement exact. Pour que le géoréférencement soit exact, il faut veiller à ce que chaque .obj soit géoréférencé au préalable avant l'utilisation du script Dynamo.

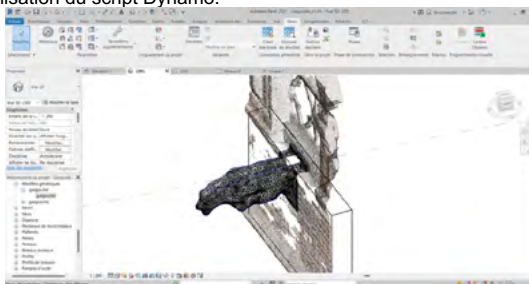


Fig. 1 - Exemple d'importation d'un objet maillé (gargoille de la cathédrale Saint-Étienne de Toulouse) dans un nuage de points et un modèle de mur géoréférencé sur Autodesk Revit. (Source de l'auteur)

Les différents scripts développés durant le PFE offrent la possibilité à l'utilisateur de paramétrer ces maillages selon les besoins et les niveaux de précision attendus, ainsi que de renseigner sur chaque élément des informations de rendu (matériaux, etc.). De plus, l'ajout du script d'import multiple permet de gagner un temps précieux à l'utilisateur en automatisant le processus d'importation dans le logiciel. Le principal obstacle rencontré durant l'intégration des modèles maillés dans Revit a été celui de la qualité du maillage importé. Un maillage comportant plusieurs éléments, ou un maillage dont les points sont trop proches, rencontrera plus de difficultés à être intégré dans un modèle Revit qu'un maillage unique et uniforme. La décision de créer des paliers d'importation a été prise au cours du développement du script afin d'éviter les problèmes liés au poids des familles de maillage qui risquent de ralentir le projet si elles sont trop nombreuses. Il reviendra à l'utilisateur d'avoir un avis critique sur la pertinence d'utilisation des maillages, leur niveau de LOG (comme vu précédemment avec la décimation des maillages) et la finalité du projet.

5. Conclusion

L'objectif majeur de ce PFE était d'étudier les procédés d'acquisition, de traitement et de modélisation des données 3D spécifiques à l'entreprise ainsi que de proposer une méthodologie d'importation de maillages d'objets complexes dans un logiciel de BIM (Autodesk Revit) afin de les intégrer à un modèle numérique.

L'approche développée nous permet donc d'obtenir, à partir de nuages de points issus de levés lasergrammétriques et photogrammétriques, des familles Revit contenant des maillages d'éléments du projet. À travers l'étude des divers outils et procédés, nous nous sommes efforcés de répondre à la problématique posée en début de PFE tout en évaluant **les limites** de cette dernière. En effet,

plusieurs perspectives peuvent venir améliorer et prolonger notre approche. Nous avons pu voir que certaines étapes du processus ont mis du temps à être développées durant ces 4 mois et auraient nécessité un approfondissement afin de venir compléter la méthodologie mise en place. Nous citons notamment la problématique de la texture sur les modèles maillés importés dans le projet Revit. De même, **l'absence de normes** concernant le HBIM nous a poussés à établir plusieurs 'seuils' (en particulier sur les niveaux de LOG des éléments importés) mais qui gardent eux aussi certaines limites expliquées en détail dans le mémoire.

Somme toute, la programmation visuelle à travers l'utilisation du plugin **Revit Dynamo** a été l'un des pivots de cette étude grâce à ses nombreux nœuds permettant d'interagir avec la géométrie des maillages, entre autres avec l'utilisation du package 'MeshToolkit'. L'apparition de nouveaux plugins comme 'Mesh Import' laissent à penser que ce procédé de modélisation deviendra plus courant, plus particulièrement sur des objets complexes ou encore sur des **modèles de précision**. L'importation des maillages au sein d'une maquette numérique géométrique deviendra donc probablement plus facile, et ce par l'ajout de **plugin ou de logiciels 'passerelle'**. On pourrait supposer que cette importation serait rendue plus fluide et paramétrable afin de ne pas alourdir et/ou ralentir les procédés de modélisation et de rendu, en pouvant par exemple modifier après coup les paramètres des maillages. L'obtention d'un **modèle numérique hybride**, mêlant éléments paramétriques Revit et maillages externes, constituerait un atout de taille pour la représentation d'éléments et de bâtiments, notamment dans le domaine de la topographie.

Certaines solutions logicielles naissantes comme 'Reality Capture' ou encore 'Unreal Engine' attestent de l'intérêt grandissant des sociétés pour le traitement de données 3D et pour leur rendu. On observe que ces dernières sont constamment plus précises et plus fiables, et apportent une **grande qualité visuelle** du travail mené par les équipes. À ce jour, il est encore parfois nécessaire de passer par certains **logiciels passerelle** afin de charger les modèles dans les interfaces de rendus ce qui ralentit le processus, mais nous pouvons observer que c'est de moins en moins le cas comme en atteste par exemple '**Datasmith**' qui permet de charger le modèle depuis un bon nombre de logiciels de modélisation vers Unreal Engine afin de réaliser le travail de rendu tout en accélérant le pipeline.

Par ailleurs, l'avenir de la modélisation des informations sur les bâtiments historiques (HBIM) semble prometteur, car il continue d'être un outil important pour la **préservation des bâtiments et des structures historiques**. Un domaine où l'impact le plus significatif est celui du **patrimoine virtuel**, HBIM peut être utilisé pour créer des visites virtuelles de bâtiments et de structures historiques, permettant au grand public de les explorer d'une manière qui n'était pas possible auparavant. Un autre domaine où l'impact sera important est celui de la **planification, de la rénovation et de la conservation**. L'intégration de technologies telles que la réalité augmentée, la réalité virtuelle et le BIM devrait également constituer une partie importante de l'avenir de HBIM. Ces technologies permettront aux modèles HBIM d'être plus interactifs et offriront la possibilité au public de découvrir des bâtiments et des structures historiques de manière plus immersive. L'utilisation des techniques **d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle** jouera très probablement un rôle plus important dans l'avenir de HBIM. Ils peuvent être utilisés pour analyser de grandes quantités de données, permettant de détecter et de prévoir les problèmes potentiels qui peuvent affecter la préservation des bâtiments historiques. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'à ce jour les méthodes HBIM ne possèdent toujours pas de **normes** venant cadrer les procédés comme c'est le cas pour le BIM. Avec l'expansion et la diffusion de HBIM, nous pouvons cependant supposer que certaines règles verront probablement le jour à mesure que ce procédé gagnera en utilisation.

Finalement, bon nombre d'études actuelles se tournent de plus en plus vers des **processus intégrant des intelligences artificielles**. Des perspectives sont à envisager concernant ces procédés logiques et automatisés qui constituent des outils très intéressants reposant sur des algorithmes d'apprentissage automatique nommés '**machine learning**'. L'hybridation des processus de simulation numérique est aujourd'hui très prometteuse, en particulier concernant **l'enrichissement et l'accélération des calculs intensifs**. Le principe de recherche pourrait par exemple consister à 'faire apprendre' les processus de maillage et de modélisation à un réseau de neurones en lui fournissant un large éventail d'échantillons de données pour que ce dernier puisse s'entraîner sur plusieurs cas de figure.

CRÉATION DE MODÈLES 3D A DES FINS DE CONSERVATION ET DE VALORISATION DU PATRIMOINE MILITAIRE BÂTI DE SAINT DENIS



PFE présenté par : **Charlotte Goulet**
Société d'accueil : **Direction des Affaires Culturelles de la Réunion**
Correcteurs : **Hélène Macher et Mathieu Koehl**
Encadrante : **Carine Durand**



1. Contexte et objectifs du projet

L'île de la Réunion est une île issue d'un volcanisme de point chaud, au milieu de l'océan Indien. Elle est habitée par l'Homme depuis le 17^{ème} siècle uniquement, lorsqu'elle est alors une escale sur la route des Indes pour la Compagnie des Indes.

L'histoire militaire de la Réunion commence lors de la cession de l'île à la Compagnie des Indes par le Roi de France qui exige, en contrepartie, qu'elle soit peuplée et défendue, ce qui initie les premières réflexions sur la fortification de l'île. Aujourd'hui, le plus vieil édifice en dur existant sur l'île est une poudrière, à Saint-Paul, construite en 1724. A Saint Denis, les plus vieux bâtiments sont également des bâtiments militaires liés à des bâtiments servant au commerce. En fait, l'histoire militaire de l'île est directement liée à l'intérêt économique et géopolitique de celle-ci. L'urbanisme de plusieurs villes de la Réunion s'articule autour de noyau historique militaire.



Figure 1: Localisation des bâtiments faisant objets d'étude dans le cadre du projet ©ANOM

accès, numériquement, au grand public à des bâtiments non visitables et anticipe les travaux à venir sur certains des sites. La numérisation des bâtiments devra donc permettre :

- la réalisation de plans, de coupes ou tout document graphique permettant aux futurs maîtres d'œuvre de projeter les travaux,
- la réalisation de modèles et documents offrant une meilleure valorisation des bâtiments auprès du grand public mais également d'enregistrer l'état actuel des bâtiments au travers de nuages de points qui pourront servir dans des projets de valorisation futurs.

Saint Denis était pendant longtemps le port principal par lequel transitait la majorité des marchandises. La ville était donc le cœur économique de l'île et, par conséquent, une zone de présence militaire forte. L'étude s'intéresse à sept sites anciennement militaires localisés sur la carte ci-contre :

La Caserne Lambert (1), Le Fortin de la Redoute (2), La Chapelle-Poudrière de la Redoute (3), L'Ancien Génie Militaire (4), La Maison du Commandant d'Armes (5), La Caserne d'Artillerie (6) et le Parc d'Artillerie avec la Maison du Commandant de Gendarmerie (7).

Le projet de numérisation des bâtiments militaires de Saint Denis vise à donner



2. Acquisitions lasergrammétriques

Afin de préparer les travaux de terrain, nous avons réalisé des cahiers des charges propres à chacun des sites prenant en compte la destination des nuages de points.

On a notamment différencié les levés à destination des professionnels de la construction, donc servant à réaliser des documents relatant de l'état existant, des levés à destination d'une valorisation du bâtiment ayant de multiples applications.

On donne ci-dessous l'exemple du cahier des charges pour l'ancienne Caserne d'Artillerie.

Élément	Commentaire	Résolution
Ancienne Caserne d'Artillerie	<i>Lever ne portant que sur les extérieurs</i>	
Façades	Possibilité de lire le calepinage des pierres de taille et leurs dimensions	2cm
Ouvertures	Position et dimensions claires. Non nécessité d'avoir les détails des menuiseries (contemporaines)	2 à 5cm
Toitures	Si possible, forme, volume général de toutes les toitures	10cm
Toiture du bâtiment principal, si possible	Un projet de surélévation est en cours de réflexion, si possible, lever la toiture de façon à réaliser des plans de l'existant à destination d'un maître d'œuvre donc avec la position de la structure et des accès.	1 à 5cm
Galeries	Intérieur des galeries afin d'avoir les poteaux, sols et sous-faces en entier.	2 à 5cm
Abords	Non nécessaires	/

Il est impossible de définir un niveau de détail de numérisation d'un bâtiment pour une destination donnée car de très nombreux paramètres entrent en compte. Cependant, il est possible de définir des tendances qui peuvent aider à estimer cette précision et donc notamment le temps que passera un topographe sur cette numérisation. On notera qu'il faudra toujours essayer de discuter au maximum avec le commanditaire du lever pour comprendre à quoi le lever servira, ce qui sera regardé ou encore qui va l'utiliser. Si le lever est fait avant de connaître sa finalité, il faudra essayer d'anticiper les besoins pour définir un niveau de détail optimal (qui n'est pas forcément celui étant le plus détaillé car celui-ci serait très lourd à stocker et très difficile à traiter a posteriori).



Figure 2: maillage primitif arborescent avant consolidation renforcée

A partir de cela, nous avons pu réaliser les travaux de terrain, effectués avec le scanner laser Leica BLK360 mis à disposition par la DAC. Ce scanner est un petit scanner laser, très compact et léger commercialisé depuis 2017. Il est équipé de la technologie HD/HDR (High Dynamic Range) permettant de coloriser le nuage de points relevé en limitant les phénomènes d'éblouissement et de contre-jour. La prise de points va à une vitesse allant jusqu'à 680.000 pts/sec. La portée de l'appareil est comprise entre 0,5m et 45m avec une précision de 4mm à 10m et 8mm à 20m. Les données en sortie sont des fichiers .blk.

Les bâtiments numérisés comportaient souvent une trame très régulière. Il a été choisi de faire une station toutes les deux trames dans les coursives et à l'extérieur. Pour optimiser les stations, il était choisi d'alterner la trame de départ pour avoir une alternance complémentaire entre intérieur et extérieur, favorisant la couverture notamment dans les arches et ouvertures en façade. Enfin, il a été au maximum réalisé un « maillage arborescent » de consolidation. C'est-à-dire que des stations de consolidation étaient prises, en s'éloignant de la façade, plus écartées entre elles et en respectant une alternance comme on peut le voir sur l'image ci-dessus : une station sur quatre par rapport à la ligne d'avant. Les stations les plus lointaines étaient prises avec une résolution supérieure à celles de la façade.

3. Traitement des nuages de points

Pour passer des données brutes à un modèle exploitable, plusieurs étapes sont nécessaires. Elles sont présentées par Margot Heynen dans son mémoire *La production numérique d'éléments du patrimoine, conservateurs d'authenticité du monument restauré* (Heynen, 2020).

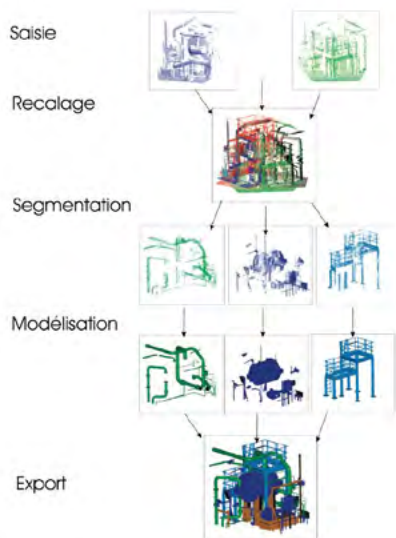


Figure 3: Etapes de la modélisation "Tel que construit" [Heynen, 2020]

La saisie correspond aux données brutes scan par scan, dans notre cas, des données .blk.

En les assemblant, on passe à l'étape de recalage. Dans notre cas l'étape de recalage commence directement sur le terrain avec le préalignement fait sur Cyclone Field 360. Cependant, on pourrait aussi choisir de tout recalcr sur Cyclone Register à partir des données .blk importées. C'est ce qui a été fait pour la Chapelle-Poudrière. Le temps est à peu près le même pour un petit projet si l'on prend en compte le temps (long) de déchargement des données projet Cyclone Field 360 de la Tablette vers l'ordinateur (cf paragraphe 1.2 « Gestion de l'espace de stockage et données »). Sur un projet plus gros (Casernes ou autre, au-delà d'environ 50 stations), il est préconisé d'utiliser le préalignement du terrain.

L'étape de segmentation peut permettre dans notre cas de différencier différentes époques de construction du bâtiment ou encore de mettre de côté des éléments contemporains qui ne nous intéressent pas. Cette étape a été réalisée sur Recap Pro ou CloudCompare dans notre cas, en fonction des projets. Recap présente des problèmes pour traiter de gros fichiers pour le moment, ce qui n'a pas permis de terminer le traitement pour ces gros projets et ce qui explique

le choix d'essayer un traitement sur CloudCompare.

L'étape de modélisation est la plus large car elle englobe de nombreuses possibilités à partir des étapes précédentes. On peut imaginer réaliser des maquettes :

- Entièrement paramétrées, c'est-à-dire à partir de primitives géométriques (comme sur Revit dans notre cas),
- Maillées à partir du nuage de points, c'est-à-dire que l'on va créer un maillage, donc un ensemble de faces géométriques formant un ensemble, en « reliant » les points du nuage de points (sur Meshlab dans notre cas),
- Mixtes

L'export concerne tous les livrables créés à partir de l'un ou l'autre des logiciels, aux différentes étapes. Ainsi, l'étape d'export n'est ni unique ni uniquement en fin de processus, c'est une étape qui permet de passer d'une étape à une autre, tout au long du projet. De plus, plusieurs exports différents peuvent être faits à partir d'un même projet.

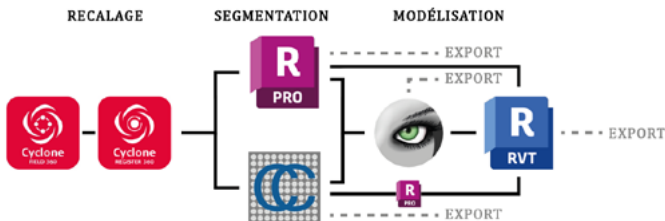


Figure 4: Chaîne de traitement sur les différents logiciels utilisés avec les étapes de la modélisation « Tel que Construit »

4. Création et valorisation de modèles numériques

L'objectif de ce PFE était de réaliser différents modèles numériques exploitables pour la valorisation auprès du grand public ou par les professionnels de la construction. Les contraintes et attentes pour chacun des types de modèles à mener à différentes expérimentations de modélisation.

Pour la création d'une maquette numérique d'un bâtiment existant, le nuage de points est un outil servant d'appui pour la modélisation. Le nuage de points ne fera pas partie de la maquette numérique finale. Chaque élément créé est porteur de sémantique. Le logiciel Revit, permet d'intégrer un nuage de points (géoréférencé) au projet afin de travailler directement avec.

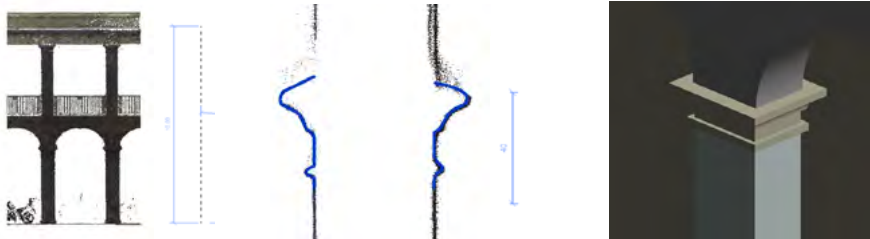


Figure 5: Modélisation par primitives géométriques sur Revit à partir du nuage de points (vues de l'élévation Sud du nuage de points, en coupe du nuage de points au niveau d'un poteau, en perspective du poteau modélisé)

Dans le cas de la création de modèle numérique à destination d'une valorisation auprès du grand public, plusieurs essais ont été faits pour segmenter les nuages de points, créer des maillages directement à partir du nuage de points et créer des modèles mixtes entre maillage et modélisation par primitives géométriques. Ces modèles pourront ensuite être intégrés à des logiciels permettant la réalisation de vidéos tel que le plugin Enscape ou le logiciel Maya, ou bien à des logiciels intégrant un moteur de rendu afin de paramétrer des visites virtuelles du modèle. Ces étapes seront réalisées lors d'un projet futur d'avantage axé sur la valorisation à partir de ces modèles.

5. Conclusion et Perspectives

Ce projet a permis de mettre en exergue plusieurs aspects de la lasergrammétrie au service de la valorisation et de la conservation du patrimoine bâti en s'intéressant au patrimoine bâti militaire de Saint Denis à la Réunion. Les objectifs de ce projet, étaient très vastes à savoir la création de maquettes et modèles numériques à destination des professionnels de la construction et pour la réalisation de supports numériques de valorisation du patrimoine. Nous pouvons tirer un bilan de cette première phase de réalisation.

Tout d'abord, la réalisation de cahiers des charges pour le lever lasergrammétrique de chacun des bâtiments de l'étude a permis de repreciser les intérêts et les volontés de chaque acteur allant du secteur de la construction à celui de la valorisation. Même si chaque projet est unique et nécessite une analyse propre à ses spécificités, nous avons, initié un catalogue des éléments catalysant la résolution souhaitée d'un lever lasergrammétrique.

Ensuite, la réalisation d'une longue campagne de lever lasergrammétrique sur différents sites et dans différentes conditions a permis d'établir une méthodologie optimisée pour correspondre au matériel et aux logiciels dont dispose la DAC la Réunion.

Enfin, les ébauches de réalisation de modèles numériques et de maquettes numériques sont prometteuses et montrent le champ des possibles pour l'exploitation des nuages de points réalisés lors de ce projet. Nous mettons notamment en avant la multiplicité d'outils et de méthodes existants pour le traitement de nuage de points ou le traitement à partir d'un nuage de points.

Pour la suite de ce projet, il a été proposé un stage pour un étudiant en topographie qui pourrait alors réaliser l'interprétation des nuages de points et la création de modèles et supports de valorisation.

Par ailleurs, les nuages de points produits pourront être transmis à des acteurs extérieurs à la DAC pour être traités et valorisés. Ils pourront être diffusés aux propriétaires des bâtiment afin qu'ils puissent eux aussi commander un post-traitement à un prestataire selon les besoins futurs.

Enfin, ce projet ouvre de nouvelles perspectives sur l'utilisation de la lasergrammétrie et du levé numérique au sein de la DAC la Réunion, notamment au service du patrimoine.

Développement d'une approche automatique d'analyses nuages de points-maquette numérique, appliquée à la comparaison spatiale des réservations



PFE présenté par : **Philippine Hubert**
Société d'accueil : **Novatlas**
Directeur de PFE : **Corentin Castanié**
Correctrice : **Hélène Macher**



1. Contexte et objectifs du projet

Dans un contexte où le monde de la construction est en constante activité, il est crucial de garantir que les éléments construits répondent aux exigences de qualités spécifiées, telles que les tolérances géométriques, pour assurer leur sécurité et leur performance tout au long de leur durée de vie.

La détection rapide de défauts sur les chantiers est importante pour éviter une consommation importante du budget et un retard de livraison du projet. De nombreuses solutions informatiques de détection de défauts ont été développées au cours des dernières décennies pour enrichir le contrôle physique des éléments construits. Cependant, il est plus difficile de contrôler le positionnement d'éléments plus petits et plus nombreux tels que les réservations. Ces espaces vides, placés dans les dalles et les voiles lors de la construction du gros œuvre, permettent la mise en place de réseaux. Leur bon positionnement est donc essentiel dans le fonctionnement du bâtiment.

L'étude proposée s'appuie sur un cas d'étude tangible : le projet de construction The Link, un gratte-ciel en construction dans le quartier d'affaires de la Défense, et qui constituera le plus haut gratte-ciel de France à son achèvement en 2025.

L'objectif principal de ce Projet de Fin d'Études porte sur le développement d'une procédure automatique permettant d'identifier de manière quantitative la différence de positionnement et de dimensionnement des réservations entre la maquette BIM « telle que conçue » et le nuage de points « tel que construit ».



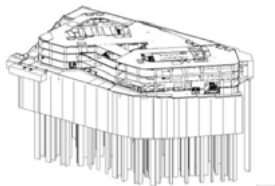
Fig. 1 : projet The Link
Crédit photo : © Artefactory

2. Présentation des données

Le projet vise à comparer les données théoriques (telles que conçues) avec les données effectives (telles que construites) pour l'ensemble des réservations du bâtiment, cela nécessite de disposer de plusieurs jeux de données pour les deux phases distinctes du projet.



Données telles que conçues :



Les données telles que conçues ont été fournies sous forme de maquette BIM géoréférencée en format rvt et ifc. Le modèle BIM est organisé en familles qui représentent des groupes de composants de construction paramétriques.

Fig. 2 : maquette BIM des niveaux inférieurs du projet The Link

Données telles que construites :

L'acquisition des données telles que construites a été réalisée par balayage laser à l'aide d'un scanner statique accompagné de tachéométrie. Le scanner laser Trimble TX7 a été utilisé pour acquérir les ensembles des données lasergrammétriques des deux sous-sols du projet alors achevés. La méthode d'acquisition suit les principes du balayage laser terrestre, qui implique plusieurs variables fondamentales, notamment la résolution angulaire et spatiale, et la densité de points. En outre, les stations de numérisation ont été stratégiquement positionnées pour obtenir les éléments des réservations les plus distincts possibles tout en maintenant un chevauchement suffisant entre chaque numérisation.



Fig. 3 : nuage de points résultant de l'acquisition et traitement des données

Les données acquises ont été traitées à l'aide de différents logiciels de traitement de nuages de points. Les nuages de points ont d'abord été échantillonnés pour réduire leur densité. Nous avons ensuite procédé à une phase de prétraitement des données, impliquant l'élimination des points indésirables et la réduction du bruit présent dans le nuage de points. Enfin, une consolidation, basée sur la recherche de points homologues entre nuages de points, nous a permis d'assembler l'ensemble des nuages acquis depuis les différentes stations en un seul et même nuage.

Pour finir, nous avons procédé au géoréférencement de ce nuage, ce qui signifie que les coordonnées réelles ont été attribuées aux points de repère. Les points ont été mesurés à l'aide de cibles connues en coordonnées situées sur le chantier, permettant alors d'exprimer chaque point du nuage selon des coordonnées topographiques tridimensionnelles.

3. Automatisation de la chaîne de traitement : détection et d'extraction

Parmi la large gamme de possibilités s'offrant à nous pour parachever les objectifs fixés, nous avons dû nous positionner sur les solutions les plus adaptées pour détecter et extraire les données nécessaires à notre étude de manière automatisée et en se basant sur les données disponibles et les besoins du client.

L'objectif ultime étant de comparer des informations clé relatives aux réservations afin de fournir une comparaison optimale de leur positionnement et dimensionnement : concernant les réservations circulaires nous souhaitons obtenir les coordonnées du centre de chacune d'elles ainsi que le rayon qui leur est associé. Nous souhaitons extraire des réservations rectangulaires les coordonnées de leur centre ainsi que la longueur et largeur de chacune.

Nous avons ainsi opté pour l'écriture d'un script dynamo pour identifier et extraire les informations telles que conçues de la maquette Revit, ainsi que l'utilisation du logiciel Cyclone 3DR par le biais de scripts pour extraire les informations homologues sur les nuages de points acquis.

Identification et extraction des informations telles que conçues :

La réalisation d'un script à travers l'interface de programmation dynamo nous a permis d'obtenir les informations recherchées depuis la maquette Revit. Le script développé se compose en diverses parties.

Nous avons commencé par sélectionner les réservations par niveau et famille. Dans un second temps, les sommets de chaque réservation ont été extraits pour obtenir leurs coordonnées, qui sont converties afin de les exprimer selon le système topographique. Ensuite, les informations souhaitées sont calculées, notamment la moyenne des sommets de chaque face pour obtenir les coordonnées du centre de chaque réservation ou encore la distance entre les points situés sur le cercle ou le rectangle afin d'obtenir les dimensions des réservations (leur rayon ou leur hauteur/largeur). Finalement, l'ensemble de ces informations sont exportées vers un fichier Excel ainsi que des fichiers CSV.

Identification et extraction des informations telles que construites :

Une étude approfondie des différentes fonctionnalités proposée par le logiciel Cyclone 3DR nous aura permis de juger chacune sur leur pertinence en vue d'une automatisation. Certaines fonctionnalités ne sont pas disponibles dans l'API script de Cyclone 3DR et d'autres ne fournissent pas les résultats escomptés, tandis que certaines nécessitent une interaction avec l'utilisateur et ont donc été écartées dans le cadre de l'automatisation souhaitée.

Finalement, nous avons pris la décision de développer deux automatisations d'extraction des données reposant sur deux algorithmes différents de détections d'éléments sur un nuage de points : une macro VBA utilisant la fonctionnalité de croissance de surface et un script JavaScript pour utiliser la fonction de reconnaissance de formes géométriques 2D de Cyclone 3DR.

Automatisation de la fonction de croissance de surface par la réalisation d'une macro VBA

Le processus de cette fonction de croissance de surface implique la sélection d'un point de départ appelé surface graine, puis l'expansion de la surface autour de cette graine tant que les points voisins ont des critères similaires. L'algorithme cesse son expansion et ferme la surface lorsque les points adjacents ne répondent plus aux critères.

La macro réalisée a été développée en langage VBA en vue d'automatiser la copie des coordonnées du centre théorique de chaque réservation, provenant de la maquette Revit et constituant la surface graine de chaque forme. Le script permet le lancement de la recherche de la forme géométrique par la fonction de croissance de surface *RegionGrow* de Cyclone 3DR.

Les actions de copie et de recherche sont alors répétées jusqu'à ce que la macro ait extrait l'ensemble des formes pour chacune des réservations.

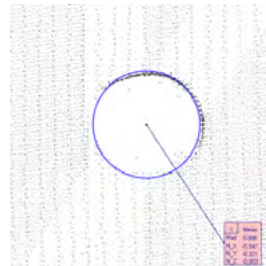


Fig. 4 : Extraction du cercle de la réservation par croissance de surface en renseignant les coordonnées du centre

Automatisation de la fonction de reconnaissance de forme par la réalisation d'un script JavaScript

La seconde automatisation réalisée consiste en l'application d'un script JavaScript exécutable sur le logiciel Cyclone 3DR. Celui-ci permet l'importation d'un nuage de points, sa segmentation autour de chaque centre théorique de la réservation. La segmentation est effectuée en utilisant des formes 3D autour de chaque centre et selon les dimensions théoriques des réservations, obtenues grâce au script Dynamo réalisé.



Fig. 5 : Segmentation du nuage de points selon une forme sphérique autour des réservations circulaires



Le script utilise ensuite les fonctions de reconnaissance de formes géométriques proposées par Cyclone 3DR. Ainsi, selon la forme de la réservation telle que conçue, des cercles et rectangles sont recherchés sur les nuages de points segmentés.

Les caractéristiques propres aux formes extraites, telles que les coordonnées du centre, le rayon pour les cercles et la hauteur et largeur pour les rectangles, sont ensuite exportées.



Fig. 6 : Détection du cercle de la réservation par reconnaissance de forme

4. Analyse des résultats de l'automatisation

Une fois l'ensemble des données extraites nous avons pu comparer des données telles que conçues/ telles que construites et réaliser un filtrage selon différentes variables. En effet, la définition d'une tolérance de 4 centimètres sur le positionnement du centre des réservations ainsi que sur leurs dimensions nous a permis d'extraire l'ensemble des réservations situées au-delà de la tolérance fixée.

En outre, l'obtention des coordonnées des réservations situées hors tolérance permet de pouvoir les représenter et ainsi de fournir un plan au client faisant apparaître l'ensemble des réservations situées hors tolérance, comme nous pouvons l'observer dans l'illustration suivante :



Fig. 7 : Plan du sous-sol 1 comprenant les réservations circulaires situées hors tolérance (en rouge)

Conclusion

Ce projet a exploré les possibilités d'exploitation et de corrélation entre une maquette BIM et un nuage de points pour comparer le positionnement des réservations dans le contexte de l'industrie de la construction. Le projet a impliqué l'écriture de scripts pour automatiser les contrôles et optimiser le processus de comparaison. Les résultats ont permis de proposer une solution novatrice de comparaison quantitative de positionnement des réservations entre la maquette BIM et le nuage de points, ainsi qu'une solution de visualisation.

Ce projet ouvre de nombreuses perspectives en termes de processus et d'utilisations dans l'industrie de la construction et est sujet à de nombreux développements. En effet, la solution de visualisation pourrait être développée pour inclure un contrôle visuel et garantir une précision plus élevée des résultats. Il est également important de souligner que la solution proposée dépend de l'évolution des logiciels et des API, il est donc possible que de nouvelles fonctions soient développées pour apporter une réponse plus directe à la problématique.

Proposition d'une chaîne de traitement efficiente aboutissant à une maquette BIM sur Revit

Cas pratique du "grenier" Saint-Christophe (site classé historique)

PFE présenté par : Aurélie Verhelst
Société d'accueil : Archéotech SA
Directrice de PFE : Elise Feihl
Correctrice : Tania Landes



1. Introduction et contexte de l'étude

Archéotech est une entreprise implantée dans la région Lausannoise, en Suisse. Elle a été créée par Olivier Feihl en 1979 et regroupe une dizaine de collaborateurs. Depuis plus de 40 ans, Archéotech participe à l'acquisition et à la conservation des biens archéologiques, artistiques et architecturaux en Suisse et à l'étranger. Pour ce faire, ils utilisent les nouvelles technologies de mesure pour les mettre au service de la documentation et de la compréhension de ce patrimoine. Leurs missions principales sont l'étude des pathologies en façade des édifices, la médiation au travers de la réalisation de visites virtuelles pour des musées, le relevé et la documentation du patrimoine bâti à des fins de réhabilitation et de rénovation. Cette documentation prend la forme de dessins en 2D réalisés sur Autocad ou de modèles surfaciques. Pourtant, Archéotech aimerait développer ses compétences dans le domaine du BIM pour répondre à un engouement croissant de la part des architectes du patrimoine envers des maquettes BIM Revit.

C'est dans ce contexte d'application du BIM au patrimoine historique que cette étude s'implante. En effet, le principal défi est d'adapter des outils développés pour la conception des bâtiments neufs à la modélisation d'édifices historiques tout en garantissant l'exactitude, la précision et la qualité visuelle des livrables. En réalisant la conception de la maquette Revit en interne cela permet une meilleure cohérence dans la production et de la gestion de données. Ainsi, face à une envie d'intégration du BIM au sein de la société, l'objectif principal est alors de déterminer une chaîne de traitement efficiente permettant la modélisation sous Revit des bâtiments du patrimoine type. Nous nous appuierons sur les bâtiments du grenier Saint-Christophe pour mener à bien cette étude.

Le hameau Saint-Christophe est un ensemble de bâtiments Vaudois qui se situe sur la commune de Champvent. Lors de cette étude, nous nous concentrerons sur l'étude et la modélisation de l'ancien grenier à grain qui a probablement été construit au début du XVII^{ème} siècle. Le grenier correspond au type d'architecture à laquelle Archéotech SA est souvent confrontée.

En effet, il regroupe une majorité des éléments qui posent question lors de la modélisation paramétrique du patrimoine historique.



Fig. 1 : Photographie du grenier à grain, Archéotech

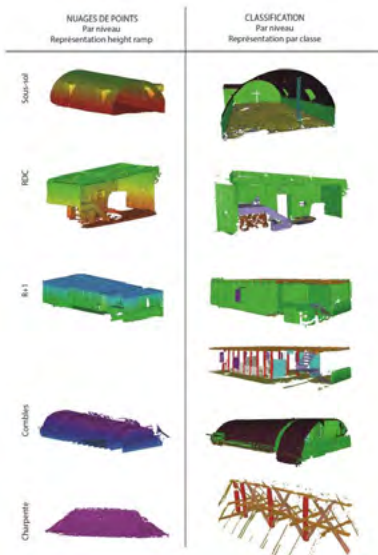


2. De la mesure à un nuage de points organisé

Le relevé du grenier a été réalisé en novembre 2021. Ce relevé lasergrammétrique a été effectué au scanner laser Trimble X7. Il a été complété d'un relevé topographique et GNSS pour permettre le géoréférencement indirect de l'ensemble de la scène ainsi que par un vol drone et la prise de nombreuses photographies. La pratique de relevé utilisée semble être en adéquation avec la précision attendue pour les livrables. Toutefois, nous avons souligné quelques incohérences et proposé des solutions pour remédier à ces dernières et améliorer la méthode de relevé utilisée jusqu'alors. Parmi ces améliorations nous proposons :

- la création d'un seul projet plutôt que plusieurs lors du balayage,
- limiter le nombre de cibles mesurées à trois, sauf dans un contexte particulier (charpente par exemple),
- la suppression de la mise en place d'une rotation dans Scene pour garder la bonne orientation du projet, l'utilisation des SCU peut répondre à ce besoin.

De plus, actuellement aucun post traitement avancé n'est affecté au nuage de points avant de procéder au dessin. Pour faciliter l'intégration du nuage de points dans Revit, nous proposons alors d'intégrer les étapes suivantes dans la chaîne de traitement : le rééchantillonnage, le nettoyage, la segmentation et la classification. Pour réaliser ces étapes de post traitements avancés, nous avons utilisé le logiciel Cloud Compare qui est un logiciel métier libre de droit. Les détails figurant dans l'édifice n'étant pas très précis, un rééchantillonnage spatial a été appliqué afin de ne garder qu'un point tous les centimètres. Ce rééchantillonnage n'a pas d'impact sur l'usage des outils de segmentation. En outre, l'étape de nettoyage ne concernait que la suppression du peu d'artefacts restant dans l'édifice et la suppression du contexte extérieur (arbres et autres bâtiments du domaine). Nous avons procédé à la segmentation du nuage en utilisant les intervalles de valeurs de champs scalaires. Cette fonction permet de segmenter un nuage en définissant un intervalle de valeurs scalaires à partir de méthodes de calcul choisies. Tous les points dont les valeurs scalaires qui tombent dans l'intervalle choisi seront dissociés du nuage de points mère.



Nous avons procédé à une première segmentation par étages à l'aide de l'outil *Heigh ramp*. Puis nous avons segmenté les étages en fonction de leurs caractéristiques constructives. L'ensemble de la segmentation a été réalisée en utilisant des méthodes de calcul de facteurs géométriques dont les plus fréquents ont été l'usage de nombre de points voisins, du calcul de la courbure, de planéité et de la verticalité. En utilisant une méthode semi-automatisée, nous nous affranchissons de paramètres pouvant altérer la qualité de la classification, comme l'erreur sur le pointé et les imprécisions liées à la sélection manuelle. Enfin, la classification est venue clôturer les post-traitements. Cette dernière permet de labéliser les différents objets issus de la segmentation. Nous avons choisi de classer selon les propriétés constructives afin que les classes se rapprochent au mieux des catégories Revit. Nous affectons alors une couleur unique à chaque classe pour distinguer chaque composant visuellement. Ces étapes permettent une première approche de l'édifice et permettent de comprendre son fonctionnement. La classification retenue va conditionner la manière de modéliser dans Revit.

Fig. 2 : résultat de la classification du nuage intérieur

3. Modélisation et interopérabilité

Une fois que nous avons en notre possession un nuage de points organisé nous avons débuté la modélisation sous Revit. Nous avons mis en place un double géoréférencement (local et géographique en MN95) afin de faciliter la fluidité du logiciel. Puis, nous avons défini les niveaux, pour ensuite débiter la modélisation. La modélisation a débuté par la création des éléments structurels *in situ*. La plupart de temps, l'utilisation des composants génériques n'est pas possible à cause du caractère singulier de l'architecture du grenier. Ensuite, nous avons procédé à la création de familles chargeables et paramétrables pour initier la création d'une bibliothèque de famille appliquée au patrimoine au sein de la société. Les éléments modélisés sous forme de familles chargeables sont des éléments caractéristiques de ce type d'architecture que l'on pourra probablement retrouver dans d'autres édifices. Un travail considérable a été fourni pour modéliser les ouvertures sous forme paramétrable. En effet, ces ouvertures sont caractéristiques de ce type d'architecture et les modéliser de manière très précise nous semblait indispensable. De plus, l'usage de paramètres d'occurrences permet de venir se positionner de manière très précise sur le nuage. Puis, nous avons intégré ces familles au modèle mère et nous les avons adapté au projet. Enfin, certains détails ont été ajoutés en 2D sous forme de lignes de détails pour peaufiner la qualité des documents livrés. Aussi, pour chaque composant, une réflexion a été portée sur le besoin ou non de le modéliser de manière très précise, d'envisager la possibilité de la simplification ou de le symboliser uniquement en 2D par des lignes de détails. Le choix se justifie par exemple par le caractère porteur ou non du composant, par son caractère singulier ou encore par sa répétition dans l'édifice.

Toute simplification devra être représentée par la suite pour illustrer les choix réalisés durant la modélisation et assurer une utilisation correcte et pérenne de la maquette. Nous avons eu aussi recours au plugin AS-Built qui enrichit les possibilités en permettant de modéliser les familles chargeables à partir de régions de nuages de points. Il offre certains outils d'analyse, qui, améliorés, pourront s'avérer très utiles. Enfin, l'interface *AS-Built modeler* permet la création de points de références et de lignes modèles par simple clic sur le nuage ce qui peut être utile notamment pour le dessin des escaliers. Cet outil permet aussi de gagner en précision sur le pointage.

Toutefois, les méthodes de modélisation restent personnelles en fonction des facilités développées par chacun pour tel ou tel outil. Aussi, la modélisation reste contrainte par l'outil informatique. Il faut alors parfois accepter de simplifier une géométrie trop complexe et un compromis est à définir entre représentation du détail et la durée de modélisation que cela implique. Les échanges récurrents avec des acteurs du patrimoine ainsi que ma formation en architecture m'ont permis de discerner les besoins de ces derniers et ainsi de mettre en place des solutions permettant la viabilité de la maquette dans le temps.

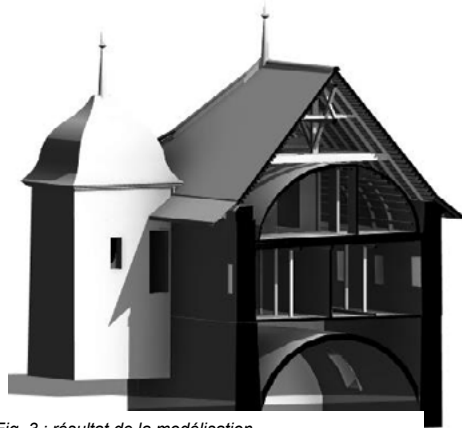


Fig. 3 : résultat de la modélisation

En effet, j'ai pu constater qu'une mauvaise organisation du modèle participe à l'alimentation de barrières à la pérennisation des modèles BIM. Par ailleurs, les difficultés constatées à l'export ralentissent le développement du BIM et entretiennent la méfiance de certains utilisateurs vis-à-vis des logiciels BIM. Toutefois, ces limites ne remettent pas en cause le développement de l'usage de Revit au sein d'Archéotech car elles peuvent être contournées.

4. Analyse de la qualité du modèle et représentation des critères qualitatifs

Pour analyser quantitativement la maquette, nous avons réalisé une analyse globale puis une analyse spécifique sur les éléments porteurs et caractéristiques de l'édifice. Les résultats sont satisfaisants avec un écart-type de 5cm sur l'ensemble du modèle. Lors de l'analyse spécifique, nous obtenons un écart type de 3,3cm sur les murs porteurs et de 2.5cm sur la charpente. En analysant ces écarts nous constatons que le choix de la méthode de modélisation influence beaucoup la précision. L'exemple le plus caractéristique est celui des murs porteurs dont les écarts les plus significatifs sont ceux du centre du mur. Cela s'explique par le choix d'une modélisation par face, ainsi l'objet paramétrique ne suit pas le fruit du mur en son centre. Cette analyse met alors en évidence les dégradations des éléments. Concernant la structure poteaux-poutres, les écarts s'expliquent par l'usage d'éléments au profil rectangulaire ne détaillant pas les inégalités de profil de ces derniers. Nous arrivons au même constat pour la charpente. Ensuite, les écarts affectant la voûte se justifient par sa forme géométrique imparfaite. Toutefois, nous constatons que pour ce type de plafond, une extrusion simple fournit un résultat suffisant. L'analyse de ces écarts nous a aussi permis de montrer que la volonté de vouloir détailler un élément peut engendrer plus d'imprécision et qu'il est parfois préférable de simplifier la géométrie lorsque l'élément est trop complexe à modéliser. Le plugin As-built nous a permis de dessiner avec plus de précision les familles. Puis, étant donné que certains éléments ont été plus simplifiés que d'autres, il est difficile d'affecter un LOD (Level Of Details) unique à l'ensemble de la maquette. Alors nous avons affecté des attributs aux composants Revit en fonction de l'écart type et du niveau de détail de chaque élément. Puis, à chaque attribut nous avons affecté un code graphique permettant visuellement, de distinguer chaque composant en fonction de ces critères qualitatifs.

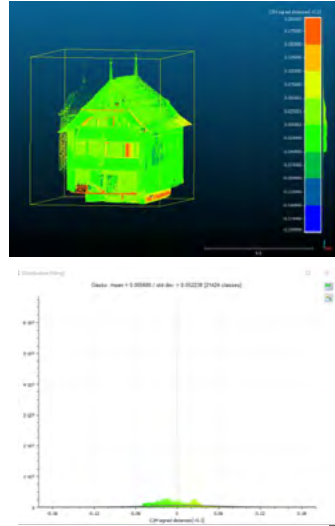


Fig. 4 : résultat de la comparaison mesh nuage sur Cloud Compare

Conclusion et ouvertures

Cette étude met en place une chaîne de traitement du nuage de points brut à la maquette Revit BIM complétée d'attributs. Elle permet la modélisation d'édifices historiques en s'appuyant sur un nuage de points qui a été rééchantillonné, nettoyé, segmenté et classifié. Les étapes de la chaîne de traitement comprennent une segmentation semi-automatisée permettant de minimiser les erreurs humaines et de limiter les ressources nécessaires pour la création de ce nouveau type de livrables. C'est un premier pas envers l'intégration du BIM au sein de la société Archéotech. Certaines pistes supplémentaires pourraient être explorées comme l'intégration d'orthophotos en tant que textures réalistes sur les objets paramétriques. Aussi, il serait intéressant d'étudier l'intérêt de numériser en couleur. Cela permettrait de faciliter la segmentation. L'usage de numérisations en couleurs offrirait également une simplification dans la navigation du nuage. Une évolution majeure de cette étude serait de passer de la modélisation des données à la modélisation de l'information. Certaines données sémantiques pourraient venir compléter la maquette comme des informations historiques sur les époques de construction et les étapes de restauration. En effet, Archéotech possède une base de données sur les menuiseries des bâtiments historiques du Moyen Âge. Aujourd'hui, cette base de données est reliée à Autocad et permet d'afficher en couleur les époques de ces menuiseries sur les plans .dwg. Nous pourrions envisager d'effectuer le même lien, cette fois-ci en 3D avec le modèle Revit.



Plus d'infos

<https://topographie.insa-strasbourg.fr>

Contact : 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

