

18^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 22 AU 24/09/21

Numérisation 3D
du patrimoine
culturel



■ ■ ■ Mot du directeur

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

En raison de la situation sanitaire toujours incertaine, les JDT auront lieu à nouveau cette année sous un format 100 % virtuel, en espérant pouvoir revenir à un format présentiel l'année prochaine. Ce format distanciel offre cependant une opportunité de s'adresser à un public plus vaste, pour faire rayonner la formation d'ingénieur topographe, au sens large, sans limite autre que celle d'internet lui-même.

Le programme aura la même richesse que les éditions passées. Les soutenances de projets de fin d'études (PFE), dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie, seront évidemment un élément important des 18^e Journées de la topographie 2021. Ce sera aussi l'occasion de découvrir des entreprises du domaine. Cette année, le salon des exposants se réinvente autour de deux événements : La parole aux entreprises et La topographie recrute, deux conférences pour permettre aux étudiants de découvrir les activités des entreprises mais aussi les nombreuses offres d'emploi qu'elles proposent.

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).

Le thème de la conférence des JDT cette année est « Numérisation 3D du patrimoine culturel ». Des experts décriront comment les nouvelles techniques d'acquisition en 3D permettent de préserver le patrimoine culturel, de réaliser des études archéologiques et de rendre accessibles des sites au grand public à l'aide d'outils numériques.

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

Programme

100 % VIRTUEL

	MERCREDI 22 SEPTEMBRE	JEUDI 23 SEPTEMBRE	VENDREDI 24 SEPTEMBRE
8 h			
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE) JURY 1 JURY 2	Soutenances de PFE JURY 1 JURY 2 JURY 3	Soutenances de PFE JURY 1 JURY 2
10 h			
11 h			
12 h	Délibération et annonce des résultats	Délibération et annonce des résultats	Délibération et annonce des résultats
13 h	Soutenances de PFE JURY 1 JURY 2	La parole aux entreprises 13 h - 15 h	
14 h			Conférence : « Numérisation 3D du patrimoine culturel » 14 h - 16 h
15 h			
16 h		La topographie recrute 15h30 - 17h30	Présentation du métier de géomètre-expert 16 h - 17h30
17 h		Délibération et annonce des résultats	
18 h		Conseil de l'Association francophone de topographie {AFT} [Réservé aux membres] 17h30 - 20 h	Clôture des Journées de la topographie
19 h			

■■■ La parole aux entreprises

JEUDI 23 SEPTEMBRE
DE 13 H À 15 H

Cette année le traditionnel salon des exposants se réinvente autour de deux événements au format 100 % virtuel : La parole aux entreprises et La topographie recrute. Deux occasions de découvrir des entreprises dans le domaine de la topographie.

Lors de l'évènement La parole aux entreprises, vous pourrez découvrir des entreprises et leurs activités dans le cadre d'une conférence en ligne. Chaque entreprise disposera de 10 minutes pour se présenter. Des questions pourront être posées en direct aux entreprises à l'aide d'une messagerie instantanée. Les contacts des entreprises seront diffusés pour que vous puissiez les contacter si vous souhaitez plus d'informations.

Entreprises



AFT
(invité d'honneur)



Geotopo



Esri France



Leica
Geosystems



Geofit Group



Mire SAS



Geomesure



OPSIA



Geosat Groupe

■ ■ ■ La topographie recrute

JEUDI 23 SEPTEMBRE

DE 15H30 À 17H30

Deux événements virtuels remplacent cette année le traditionnel salon des exposants : La parole aux entreprises et La topographie recrute.

Deuxième évènement du jeudi après-midi, La topographie recrute est un nouveau rendez-vous autour des offres d'emploi en topographie. De nombreuses entreprises sont à la recherche de topographes ! Elles se présenteront et proposeront des offres d'emploi, de projets de fin d'études et de stages à pourvoir.

Chaque entreprise aura un temps de parole lors d'une conférence en ligne pour présenter l'entreprise et les offres proposées. Les offres d'emploi, de projets de fin d'études et de stages seront également affichées au sein de l'INSA Strasbourg et diffusées en ligne sur le blog de la topographie.

Cet évènement est une opportunité pour les étudiants de découvrir un secteur attractif avec une grande variété d'offres de recrutement. Les jeunes diplômés à la recherche d'un premier emploi pourront profiter de la conférence en ligne pour repérer l'emploi qui leur correspond le mieux.

Entreprises



Esri France



Gexpertise



Geofit Group



IGO



Geosat Groupe



Mire SAS



Geotopo



OPSIA

■■■ Conférence : « Numérisation 3D du patrimoine culturel »

**Préservation, étude archéologique
et diffusion au grand public**

**VENDREDI 24 SEPTEMBRE
DE 14 H À 16 H**

Ces dernières années, les techniques d'acquisition 3D se sont développées. Que ce soit à partir de photographies ou de levés au scanner laser il est possible d'obtenir la géométrie 3D de sites, de bâtiments ou d'objets sous forme de nuages de points. Dans le domaine du patrimoine culturel ces techniques répondent à plusieurs problématiques.

Préservation du patrimoine culturel : numériser pour conserver le patrimoine

La numérisation permet d'obtenir et de conserver une version numérique de sites, d'édifices, d'objets. En cas de dommages (incendies, guerres, catastrophes naturelles...), la version numérique peut permettre de reconstruire/restaurer le patrimoine culturel.

Étude archéologique : numériser pour étudier un site, un édifice

Grâce à la numérisation, les archéologues et architectes du patrimoine peuvent disposer de documents pour des études historiques (modèles 3D, coupes, sections, orthophotos). De plus, la numérisation peut servir de base pour la reconstruction d'un édifice incomplet à partir d'hypothèses de reconstruction fournies par les archéologues. Des scénarios peuvent être mis en place pour présenter l'évolution d'un édifice dans le temps.



Diffusion au grand public: numériser pour rendre accessible

L'objectif est de rendre accessibles virtuellement des sites ou édifices qui ne sont pas visitables et ce, par divers moyens : vidéo, immersion en réalité virtuelle, réalité augmentée avec un *smartphone*, jeux vidéo... Cela permet au plus grand nombre d'accéder à la culture et à la connaissance grâce au numérique et de promouvoir la richesse et la diversité du patrimoine culturel. L'utilisation de la réalité augmentée permet aussi de présenter au grand public les états antérieurs de sites ou de bâtiments.

Lors de la conférence, des experts expliqueront, à travers différents projets, comment les nouvelles techniques d'acquisition en 3D permettent de préserver le patrimoine culturel, de réaliser des études archéologiques et de rendre accessibles des sites au grand public à l'aide d'outils numériques.

Intervenants

- AGP [Art Graphique & Patrimoine]
experts du patrimoine, spécialistes du numérique
- Bertrand Chazaly,
expert numérique et 3D chez Fugro France

[liste non exhaustive]



■ ■ ■ Remerciements

Merci à Raphaël Moreau, étudiant en 5^e année, pour son aide dans l'organisation des évènements des Journées de la topographie 2021 et plus particulièrement pour la gestion des échanges avec les entreprises.

Nous tenons également à remercier les étudiants de 5^e année qui ont participé à la relecture des résumés des projets de fin d'études :

- Florian Barcet
- Maximilien Deiber
- Toma Dellarovere
- Charlotte Goulet
- Philippine Hubert
- Eva Ivanova
- Lucy Le Foll
- Raphaël Moreau
- Aymeric Mottier

■■■ Ordre de passage des PFE



MERCREDI 22 SEPTEMBRE

JURY 1

8 h 30 • Mise en place et automatisation d'un contrôle qualité de données hétérogènes en vue d'une modélisation BIM¹ des infrastructures • p. 19

- Étudiante : CACCIAGUERRA Sophie
- Structure d'accueil : Futurmap, Lyon
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

9 h 30 • Modélisation 3D des composants d'un orgue pour la création d'une animation à objectif éducatif • p. 23

- Étudiante : BRANTHONNE Anaïs
- Structure d'accueil : Centre d'interprétation du patrimoine Point d'orgue, Marmoutier
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

10 h 30 • Optimisation des protocoles de numérisation 3D multicapteurs et de fusion de données hétérogènes au sein de l'entreprise Premier Plan • p. 27

- Étudiante : GAUTRON Élisa
- Structure d'accueil : Premier Plan, Biarritz
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

13 h 30 • Développement de prestations de simulation de girations 3D • p. 31

- Étudiant : BAEHREL Maxime
- Structure d'accueil : TES Europe, Horbourg-Wihr
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

14 h 30 • Restitution 3D des vestiges architecturaux du site d'Eridu, Irak • p. 35

- Étudiante : IDAM Yasmine
- Structure d'accueil : Maison interuniversitaire des sciences de l'Homme - Alsace, Strasbourg
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

15 h 30 • Gestion informatique intégrée des données de la mission archéologique d'Eridu, Irak • p. 39

- Étudiant : JUND Édouard
- Structure d'accueil : Maison interuniversitaire des sciences de l'Homme - Alsace, Strasbourg, Archimède - UMR 7044
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

JURY 2

8h30 • Création et mise en place d'un process qualité au sein d'un cabinet de géomètre-expert • p. 43

- Étudiant : SIMONET Aurélien
- Structure d'accueil : Marie Simler et associés, Benfeld
- Correcteur : LEDIG Jacques

9h30 • Adaptation d'un système de monitoring ; analyses techniques et économiques d'électro-nivelles pour le contrôle de voies ferrées • p. 47

- Étudiant : CALAY Alexandre
- Structure d'accueil : MAP Géomatique SA, Auvernier (Suisse)
- Correcteur : FERHAT Gilbert

10h30 • Mise en place d'un système qualité encadrant l'ensemble des méthodes de levés 3D de la démarche commerciale jusqu'au produit fini • p. 51

- Étudiant : LALOUX Joseph
- Structure d'accueil : TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
- Correcteurs : FERHAT Gilbert, LEDIG Jacques

13h30 • Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition par lasergrammétrie en milieu difficile et couvert forestier en vue de la construction d'un parc éolien • p. 55

- Étudiant : MYOTTE DUQUET Jean-Baptiste
- Structure d'accueil : Cabinet Coquard, Baume-les-Dames
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre, LANDES Tania

14h30 • Optimisation et développement de solutions photogrammétriques pour la réalisation de relevés de façade au sein du cabinet Ellipse géomètres-experts • p. 59

- Étudiant : JEANNIN Guillaume
- Structure d'accueil : Ellipse géomètres-experts, Mostel
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

15h30 • Amélioration et adaptation du protocole de mesure d'empreintes d'abrasion par photogrammétrie • p. 63

- Étudiante : SAYEH Hiba
- Structure d'accueil : Compagnie nationale du Rhône, Lyon
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre



JEUDI 23 SEPTEMBRE

JURY 1

8 h 30 • Mise en place et développement d'un service de Webmapping 3D • p. 67

- Étudiant: PETIT Thomas
- Structure d'accueil: Syslor, Metz
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, KOEHL Mathieu

9 h 30 • Relevé et modélisation du tunnel du tram entre les arrêts Rotonde et Halles à Strasbourg • p. 71

- Étudiante: SCHUELLER Delphine
- Structure d'accueil: Compagnie des transports strasbourgeois, Strasbourg
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, KOEHL Mathieu

10 h 30 • Modélisation et reconstitution 3D de vestiges du camp du Struthof en relation avec le PCR² à partir d'éléments historiques • p. 75

- Étudiant: SEDDIK Yassine
- Structure d'accueil: Archéologie Alsace, Sélestat
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, KOEHL Mathieu

JURY 2

8 h 30 • Détection et reconstruction 3D d'arbres urbains par segmentation de nuages de points: apport de l'apprentissage profond • p. 79

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

9 h 30 • Acquisition lasergrammétrique d'ouvrages d'art pour l'interopérabilité BIM¹-SIG³, cas pratique du syndicat mixte Routes de Guadeloupe • p. 83

- Étudiante: SERMANSON Sonia
- Structure d'accueil: SL Topo, Le Gosier, Guadeloupe
- Correctrice: MACHER Hélène

10 h 30 • Détection d'ouvertures par segmentation sémantique de nuages de points 3D intérieur/extérieur: apport de l'apprentissage profond • p. 87

- Étudiante: LHENRY Camille
- Structure d'accueil: Laboratoire ICube - équipe Trio, Illkirch-Graffenstaden
- Correcteur: MURTIYOSO Arnadi

JURY 3

8h30 • Étude d'un nouveau système de guidage dynamique en tunnel • p. 91

- Étudiant: COTTANCEAU Xavier
- Structure d'accueil: Groupement Avenir, Bonneuil-en-France
- Correcteur: FERHAT Gilbert

9h30 • Adaptation et amélioration de la chaîne de contrôle dimensionnel distant appliquée au suivi de fabrication de modules LNG⁴ et de structures d'éoliennes *offshore* • p. 95

- Étudiant: REY Antoine
- Structure d'accueil: Fugro France, Castries
- Correcteur: FERHAT Gilbert

10h30 • Réalisation d'un démonstrateur technique de positionnement PPK⁵ à partir de mesures GNSS⁶ réalisées par *smartphone* • p. 99

- Étudiant: VEILLE Pierre
- Structure d'accueil: Sogelink, Caluire-et-Cuire
- Correcteur: FERHAT Gilbert



VENDREDI 24 SEPTEMBRE

JURY 1

8h30 • Développement d'une solution de numérisation 3D en temps réel via un *smartphone* • p. 103

- Étudiant: HAENEL Raphaël
- Structure d'accueil: Syslor, Metz
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, GRUSSENMEYER Pierre

9h30 • Étude et amélioration des échanges entre géomètre et architecte, et optimisation de la création de BIM¹ à partir de nuages de points • p. 107

- Étudiant: POTENTINI François
- Structure d'accueil: Cabinet Sibella, Bastia
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, MACHER Hélène

10h30 • Création d'un modèle 3D phasé et valorisation des graffitis de la tour Heinrich des Ponts couverts de Strasbourg • p. 111

- Étudiante: URFER Lisa
- Structure d'accueil: DRAC Grand Est, Strasbourg
- Correctrices: LANDES Tania, MACHER Hélène

JURY 2

8h30 • Réalisation d'un outil permettant la génération des plans de niveaux et de ventes de lots de copropriété automatiquement et ajustement sur l'outil existant au sein du cabinet Geosat permettant la génération des EDD⁷ et des certificats Carrez • p. 115

- Étudiante: FAURE Pauline
- Structure d'accueil: Geosat, Bordeaux
- Correcteur: KOEHL Mathieu

9h30 • Conception d'un outil de visualisation 3D et de visite virtuelle orienté *web* • p. 119

- Étudiante: LEMBERT Élisabeth
- Structure d'accueil: Archimed-GE, Strasbourg
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Zones humides et aménagements urbains • p. 123

- Étudiante: LAUTIER Jade
- Structure d'accueil: Urbactis, Montauban
- Correcteur: ALBY Emmanuel

1 - BIM: *Building information modeling*
2 - PCR: Programme collectif de recherche
3 - SIG: Système d'information géographique
4 - LNG: *Liquefied natural gas*
5 - PPK: *Post processed kinematic*
6 - GNSS: *Global navigation satellite system*
7 - EDD: État descriptif de division

Résumés des PFE



Mise en place et automatisation d'un contrôle qualité de données hétérogènes en vue d'une modélisation BIM des Infrastructures

PFE présenté par : **Sophie CACCIAGUERRA**
Société d'accueil : **FUTURMAP**
Directrice de PFE : **Coline THOURY**
Corretrices : **Tania LANDES, Hélène MACHER**



1. Introduction

1.1. Objectifs et contexte du projet

L'entreprise FUTURMAP est spécialisée dans le traitement de données géographiques et la modélisation 3D. Elle intervient sur différents projets BIM en conception ou en rétro-ingénierie, que ce soit dans le domaine du bâtiment, ou, plus récemment, dans le domaine des Infrastructures.

En BIM Infrastructure, aucun contrôle qualité poussé n'est actuellement réalisé sur les données d'entrée en phase de préparation. Ce n'est donc qu'en phase de production que sont remarquées les erreurs de données.

Les maquettes numériques sont contrôlées après coup par une étude qualitative et quantitative. Un contrôle final est également réalisé afin de vérifier la conformité géométrique, informatique et documentaire des maquettes BIM Infrastructure.

Une mauvaise donnée d'entrée peut représenter une perte de temps, qui implique un rallongement des délais et des conséquences économiques pour l'entreprise. C'est pourquoi un contrôle en phase de préparation est nécessaire.

Le retour d'expérience sur les projets réalisés en BIM Infrastructure a permis de mieux comprendre l'importance du contrôle des données d'entrées, et ses conséquences sur la production des maquettes.

Le PFE a ainsi pour objectif de mettre en place un processus de contrôle qualité de ces données d'entrée, afin de valider leur qualité et de les exploiter.

L'objectif est d'aboutir à la production d'un processus interne qui pourra être mis en place en septembre 2021. Il sera notamment utilisé par l'équipe de production de maquette BIM Infrastructure à Madagascar.

Pour réaliser ce projet, plusieurs logiciels et processus de contrôle sont étudiés, seule la solution la plus optimale sera retenue.

Il est important de préciser que dans le contexte de cette étude, la notion d'hétérogénéité est liée à la pluralité de la nature des données et plus particulièrement celles issus de différents procédés d'acquisition.

Dans ce résumé, nous analyserons les propriétés du nuage de points LiDAR et présenterons le processus mis en place pour contrôler les données d'entrée.

1.2. Le BIM Infrastructure

Le BIM, de l'anglais *Building Information Modeling*, se traduit en français par Modélisation des Informations de Bâtiment. Cependant, cette définition n'englobe pas les Infrastructures, c'est pourquoi une définition mot à mot ne peut être satisfaisante.

Une Infrastructure signifie en premier lieu la fondation inférieure. Dans le contexte de l'aménagement cette définition se voit évoluer : elle va alors définir l'ensemble des aménagements et installations réalisées au sol ou en souterrain nécessaire aux activités humaines et aux déplacements. [1]

On peut se tourner vers la norme NF EN ISO 19650 qui définit le BIM comme l'« utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation de manière à constituer une base fiable permettant les prises de décision ».

La difficulté de la création de maquettes BIM Infrastructure repose sur la collaboration entre de nombreux intervenants, qui chacun réalisent des tâches différentes. En effet, un tel projet rassemble

un grand nombre de pôles métiers (réseaux, routes, bâtiments, ouvrages d'art, ferroviaire) autour d'une même maquette.

Il est donc aisé de comprendre l'hétérogénéité des données du fait de la pluralité des sources.

2. Les données d'entrée

Lors de création de maquette BIM Infrastructure, trois types de données d'entrée peuvent être utilisées (le nuage de point, le plan, et les dossiers des ouvrages exécutés). Au niveau de ce PFE, l'étude se limitera aux nuages de points issus d'acquisitions LiDAR, car les plus régulièrement utilisées par l'entreprise. L'étude se limitera également aux environnements autoroutiers et ferroviaires, qui représentent la majorité des appels d'offres en BIM Infrastructure.

2.1. Les nuages de points LiDAR, source de données hétérogènes

L'objectif de ce PFE est de réaliser un processus de contrôle qualité des données d'entrée mais plus particulièrement des nuages de points LiDAR.

Les données généralement utilisées lors de projet BIM Infrastructure sont des nuages de points LiDAR. Le LiDAR, de l'anglais *Light Detection And Ranging*, est une technologie permettant le relèvement de points par lumière laser. [2]

Les nuages de points LiDAR se décomposent en deux catégories : le LiDAR aérien et terrestre.

Eux-mêmes sont décomposés par modes d'acquisitions. Dans le terrestre l'acquisition peut être statique (TLS) ou dynamique (MLS). Elle est dynamique dans l'aérien (ALS).

Le scanner statique terrestre, ou *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) en anglais, acquiert les données de manière statique.

L'acquisition LiDAR dynamique, aussi appelé *Mobile Laser Scanning* (MLS), est un processus de collecte de données géospatiales à partir d'un véhicule mobile, composé d'un scanner laser, d'un système de position et d'orientation (POS) et enfin un ordinateur embarqué.

Le LiDAR Aéroporté, ou *Airborn Laser Scanning* (ALS), permet l'acquisition de données géospatiales à partir d'un engin aérien. Ce type d'acquisition a une composition similaire à celle du MLS.

Le mode d'acquisition joue un rôle majeur sur le nuage délivré. De manière générale, les nuages issus d'acquisitions terrestres sont plus denses que ceux issus d'acquisitions aériennes (cf. Figure 2.1-1).

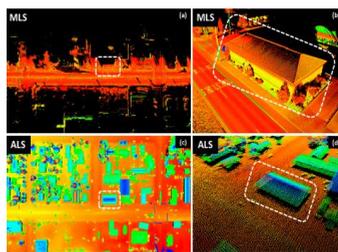


Figure 2.1-1: comparaison nuage terrestre dynamique MLS et aérien ALS [4]

2.2. Analyse des erreurs intra-donnée

L'objectif de ce PFE est donc de réaliser un processus de contrôle qualité des données LiDAR en entrée mais plus particulièrement un contrôle inter-données et intra-donnée. Le contrôle inter-données a pour but de vérifier la précision de la consolidation entre les nuages de points issus de différentes acquisitions. Le contrôle intra-donné, quant à lui, compare la qualité de la consolidation entre les différents scans d'un nuage de points.

a) TLS

Les sources d'erreurs du scanner statique sont de nature systématique et accidentelle. Quatre catégories d'erreurs se distinguent : les erreurs instrumentales, environnementales, liées à l'objet et enfin les erreurs méthodologiques faites par l'opérateur. [2]

Toutefois, la mise en place de bons procédés lors de l'acquisition mais aussi lors du géoréférencement permettent la réduction de systématismes. De plus, une révision régulière des appareils permet la réduction des erreurs systématiques.

Un processus de contrôle intra-donnée pour le scanner statique est d'ores et déjà mis en place au sein de l'entreprise. (Vérification de la globalité du nuage, de la consolidation entre les différents scans (coupe au niveau de cages d'escalier), des oublis ou manque de données...).

b) ALS et MLS

De par leur composition quasi-similaire, l'ALS et le MLS présentent les mêmes sources d'erreurs. On retrouve chez ces deux modes d'acquisitions trois catégories d'incertitudes :

- les incertitudes de navigation et de positionnement du mobile provenant du POS.
- les incertitudes de calibration impactant le géoréférencement
- les incertitudes du balayage laser qui peut déformer localement le nuage de points. [3]

La prise de vue joue un rôle déterminant sur la présence d'erreurs dans les nuages LiDAR dynamiques. En effet, dans les données MLS, les erreurs observées proviennent généralement des masques présents dans l'environnement de l'acquisition. A l'inverse l'ALS ne souffre pas de ces derniers mais d'erreurs dues à sa trajectoire et à l'augmentation de son empreinte laser sur le sol (>0.5m), ce qui conduit à une augmentation des incertitudes de positionnement horizontal. [4]
Le contrôle intra-donnée sera expliqué plus en détail dans le mémoire de PFE.

3. Mise en place d'une check-list QC (Quality Control)

Afin de réaliser un processus de contrôle qualité, nous avons mis en place une check-list qui permettra d'apporter des informations complémentaires à la donnée. Les logiciels CloudCompare et FME seront utilisés lors de ce contrôle qualité.

Les éléments de cette check-list vont permettre d'identifier la donnée à privilégier dans un cas et d'anticiper sa fidélité dans l'autre.

Différentes informations devront être renseignées telles que la précision du nuage mais aussi la date d'acquisition du nuage, le système de coordonnées et la grille altimétrique afin d'éviter de comparer des données dont les référentiels sont différents et biaiser le contrôle qualité.

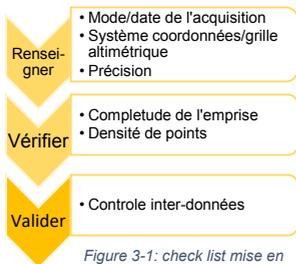


Figure 3-1: check list mise en place

Il faut ensuite vérifier la complétude de chaque nuage afin d'identifier l'absence potentielle d'information sur une emprise de projet donnée.

La densité de points (pts/m²) au sein d'un nuage est également un élément indicatif lors du contrôle qualité des données. En effet, il est possible de savoir si un objet est visible sur un nuage en fonction de sa densité.

Cette problématique s'applique plus particulièrement au LiDAR aérien puisque les données acquises par MLS ou TLS sont généralement très denses. Cette étude sera appliquée avec une tolérance définie en fonction du niveau de détails et de précision souhaité pour la création de maquette BIM.

Enfin, un contrôle inter-données est réalisé. Nous allons, de manière semi-automatisée, mesurer les écarts planimétriques et altimétriques entre les nuages de points. Ces écarts devront rentrer dans les tolérances fixées afin que la donnée soit validée. Le calcul de tolérance selon la typologie de projet sera expliqué plus en détails dans le mémoire.

4. Contrôle qualité inter-données

Lors de la réalisation d'un contrôle qualité, l'étude de la fidélité des données est primordiale, et au centre du processus de contrôle. Différentes approches peuvent être envisagées afin d'étudier cette fidélité. La méthode retenue est celle du nuage à nuage, c'est-à-dire le calcul de la distance entre les points de deux nuages de sources différentes. Il s'agit d'un contrôle inter-données.

On utilise ici la méthode des plus proches voisins (Figure 4-1), aussi appelée *Nearest Neighbour* en anglais. Cette technique utilisée dans l'analyse des nuages de points LiDAR permet notamment de mesurer la distance euclidienne qui sépare un point de son voisin le plus proche. Si les écarts planimétriques entre nuages sont trop élevés, les voisins ne peuvent être correctement identifiés, d'où la nécessité de réaliser le contrôle planimétrique avant le contrôle altimétrique.

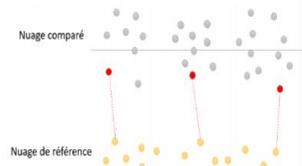


Figure 4-1: schéma de la mesure d'écart nuage à nuage avec la méthode du voisin le plus proche [5]

• Réalisation du contrôle planimétrique

Afin de réaliser un contrôle planimétrique, il est nécessaire d'extraire un objet ponctuel commun aux nuages. Cette extraction est complexe. La difficulté de celle-ci provient de l'hétérogénéité des données exploitées. Par exemple, un nuage LiDAR aérien ne délivre pas la même représentation qu'un scanner terrestre (cf. figure 2-1.1). Cette complexité implique qu'une extraction commune automatisée est difficilement réalisable à l'échelle de ce PFE. C'est pourquoi, l'extraction d'objets (exemple : poteau caténaire, panneau signalisation) se fait grâce à la création d'une zone d'extraction, exécutée par l'opérateur. Le reste du processus a été scripté sous FME, ce qui permet un contrôle planimétrique semi-automatique. (cf. Figure 4-2),



Figure 4-2: processus mis en place pour le contrôle planimétrique semi-automatique

Une fois les zones d'extractions tracées, elles sont importées dans FME pour réaliser l'extraction d'objet et l'interpolation de leur centre sans considérer l'altitude. Puis la position des centres des objets est comparée, il en ressort un rapport d'écarts planimétriques. Si les écarts relevés ne rentrent pas dans les tolérances, le rapport d'erreur est envoyé à l'entreprise responsable de l'acquisition afin qu'ils procèdent à des modifications de données.

- **Réalisation du contrôle altimétrique**

Lorsque le contrôle planimétrique est validé, nous procédons au contrôle altimétrique. Ce dernier a été entièrement automatisé à l'aide d'un script FME. Nous nous basons sur le principe de contrôle des données d'entrées du département BIM Bâtiment, notamment avec la création de coupes (cf. 2.2.a).



Figure 4-3: processus mis en place pour le contrôle altimétrique

Le processus de contrôle consiste à valider l'écart altimétrique entre nuages de points. Afin d'optimiser les temps de calcul, les coupes transversales sont réalisées à partir d'une polyligne, permettant de définir la zone d'étude. Ci-après est présenté un exemple de contrôle altimétrique.

Exemple : contrôle altimétrique nuage statique TLS (violet) et ferroporté MLS (rouge)

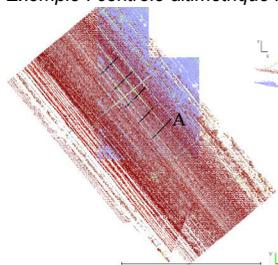


Figure 4-4 : Réalisation de coupes transversales à partir de la zone d'étude



Figure 4-5 : Coupe transversale A

moyenne quadratique (m)	mediane (m)	ecart_type (m)
0.094	0.103	0.031

Figure 4-6 : Calcul de la moyenne, médiane, écart-type de la coupe A à partir de la méthode du plus proche voisin

Il est mis au point pour chaque contrôle des livrables PDF automatiquement délivrés par FME, afin de visualiser directement les écarts identifiés sous forme cartographique.

5. Conclusion et perspectives

Ce résumé met en lumière l'enjeu lié au contrôle qualité sur les données d'entrée en projet BIM Infrastructure. La difficulté de ce contrôle repose sur l'hétérogénéité des données de par la pluralité des sources (nuage, plan, etc.).

Dans le cadre de ce PFE, nous nous focalisons uniquement sur les nuages de points par acquisition LiDAR, et nous avons pu voir qu'il était possible de mettre en place un contrôle qualité semi-automatisé sur les données d'entrée. Cela passe notamment par la mise en place d'un contrôle inter-données dont les deux étapes clés sont le contrôle planimétrique puis altimétrique des données.

La finalité de ces contrôles est de faire remonter les rapports d'erreurs à nos clients et de pouvoir trancher sur la donnée la plus optimale à utiliser.

Dans l'optique d'une amélioration continue, ces processus sont susceptibles d'évoluer. Notamment, afin d'optimiser l'extraction manuelle ainsi que les rapports cartographiques des écarts, en y rassemblant les informations les plus pertinentes.

Références

- [1] C. Marie-Claire, D. Claude, H. Hervé, L. Pascal, T. Régine, and T. Eric, "Description synthétique des techniques et des usages utilisés dans une démarche BIM par type d'ouvrage, Projet MINdD," 2018.
- [2] T. Landes, "Instruments et méthodes 4 : scanners laser et nouvelles technologies," Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spécialité Topographie, 2019.
- [3] E. Lachat, "Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine," Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spécialité Topographie, Thèse de doctorat, 2019.
- [4] E. Che, J. Jung, and M. J. Olsen, "Object recognition, segmentation, and classification of mobile laser scanning point clouds: A state of the art review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 4, 2019.
- [5] H. Lamarfa, "Développement d'une méthode multi-échelle de traitement des nuages de points LiDAR mobile pour la détection de convergence des tunnels miniers souterrains," Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Université Laval, 2019.

Modélisation 3D des composants d'un orgue pour la création d'une animation à objectif éducatif

PFE présenté par : Anaïs BRANTHONNE
Société d'accueil : Centre d'Interprétation du Patrimoine Point d'Orgue
Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,
Equipe TRIO, INSA Strasbourg PAGE
Directeur de PFE : Philippe BERGER
Correctrice : Hélène MACHER
Encadrante : Tania LANDES



1. Contexte et objectifs de l'étude

De nos jours, peu de personnes connaissent réellement les orgues, on en voit partout dans les églises mais leurs composants et leur principe de fonctionnement restent méconnus. Au XVIIIème siècle, la grande famille des facteurs d'orgues, la famille Silbermann, reconnue mondialement pour ses instruments s'est installée en Alsace. En 1709, André Silbermann construit l'un des orgues considérés à ce jour comme étant le mieux préservé mais aussi le plus connu des orgues Silbermann d'Alsace (figure 1). Situé dans l'église abbatiale Saint-Etienne de Marmoutier, sa partie instrumentale est classée aux Monuments Historiques depuis 1971, puis, en 1972 ce fut au tour du buffet. Pour faire découvrir ces instruments uniques, le Centre d'Interprétation du Patrimoine Point d'Orgue de Marmoutier a construit un orgue moderne : l'*Organum XXI* (figure 2). L'ensemble de ses composants est éclaté dans l'espace et chaque élément constituant un orgue peut être observé par les visiteurs.



Figure 1 : Orgue Silbermann de Marmoutier (crédit photo : T.Landes).



Figure 2 : Organum XXI (crédit photo : T.Landes).

Dans l'objectif d'une valorisation de ces instruments et d'un rayonnement du patrimoine musical de Marmoutier sur l'ensemble du territoire alsacien, la Communauté de Communes du Pays de Saverne et le Centre d'Interprétation du Patrimoine (CIP) Point d'Orgue ont proposé un Projet de Recherche Technologique (PRT) et un Projet de Fin d'Etudes (PFE). Pour mener à bien ces projets, une convention de collaboration avec le laboratoire ICube de l'INSA Strasbourg a été mise en place.

Au cours du PRT, des numérisations 3D ont été réalisées par techniques lasergrammétrie essentiellement. Au terme de ce projet, une visite virtuelle de l'orgue Silbermann de Marmoutier a été proposée. Grâce à ces travaux, la modélisation 3D des composants d'un orgue a pu être réalisée lors du PFE. L'objectif principal est de permettre aux visiteurs une meilleure visualisation et compréhension de ces instruments. Les éléments modélisés de cet orgue seront intégrés dans un puzzle 3D. Cette animation interactive déjà existante sur le parcours d'exposition du CIP doit faire l'objet d'un renouvellement afin d'être plus ludique.

Différents objectifs sont à prendre en compte. Par exemple, les éléments à modéliser mais surtout la méthode à employer sont à déterminer. Peu de travaux dans la littérature se penchent sur la mise en valeur des orgues, il faut donc s'appuyer, plus généralement, sur la valorisation du patrimoine et les moyens mis en œuvre. Également, le niveau de réalisme doit intervenir dans les paramètres afin d'être le plus fidèle possible à la composition d'un orgue. Concernant le puzzle 3D, les interrogations sont apparues lors de la conception de l'interface de l'animation. Les petits comme les plus grands doivent être en mesure d'y accéder, la contrainte principale est donc la simplicité d'utilisation.

2. Modélisation 3D des composants d'un orgue

Après concertation avec l'équipe de Point d'Orgue, un total de douze composants a été sélectionné en vue de leur modélisation et intégration dans le puzzle 3D. En voici la liste : sommier, porte-vent, claviers, registres, buffet du positif de dos, buffet du Grand-Orgue, moteur, soufflets, sol, structure de l'orgue, banc et pédalier. Seul le sommier, invisible depuis l'extérieur, est modélisé à partir du nuage de points de l'Organum XXI. Les autres éléments sont modélisés à partir des numérisations de l'orgue Silbermann.

Choix des logiciels de modélisation

Très rapidement, pour chaque composant, une première analyse dans la manière de concevoir le modèle 3D s'est effectuée. Seuls les nuages de points consolidés lors du PRT et des photos de l'orgue Silbermann étaient à notre disposition.

Par exemple, le porte-vent est essentiellement composé de géométries simples et régulières. La réalisation d'un maillage était donc inutile car plus lourde que des primitives géométriques, suffisantes pour modéliser cette pièce. Dans le cas des registres, la numérisation présentait trop peu de points. Il faut garder à l'esprit que ces pièces seront intégrées dans un puzzle 3D. Les traits des composants doivent être nets, sans déformations et agréables à observer. L'utilisation de primitives géométriques restait donc la solution la plus adaptée en comparaison au maillage. A l'inverse du porte-vent, les registres sont constitués de formes complexes, ainsi, seuls des logiciels dédiés à la modélisation peuvent être utilisés car ils possèdent les outils nécessaires. Dans le cas de la modélisation des tuyaux de l'orgue en étain, le principal problème était l'absence de points à cause de la réflexion des rayons laser du scanner sur leur surface. Considérés comme des miroirs, les tuyaux n'ont pas pu être numérisés, rendant la création d'un maillage impossible. Le manque d'information sur les diamètres des tuyaux et les longueurs a nécessité une prise de mesures complémentaire par l'organiste. A partir de ces données, une méthode de modélisation adaptée a été entreprise. Certaines parties des composants, telles que les détails des buffets, ne pouvaient pas être modélisées par primitives géométriques car cela impliquait une simplification du modèle mais surtout une perte d'information, la création d'un maillage était donc requise.

Ainsi, pour répondre au besoin spécifique à chaque composant, des solutions logicielles ont été sélectionnées. *Trimble Realworks* a été utilisé pour la création de modèles 3D à partir de primitives géométriques simples tels que le porte-vent. Pour la conception de formes géométriques complexes ou bien de modèles 3D à partir de mesures, *Maya Autodesk* était le plus performant. Etant compatible avec le moteur de jeu choisi, certaines étapes ultérieures seraient donc facilitées. Enfin, *3DReshaper* et *CloudCompare* ont été utilisés car complémentaires. Le premier permet d'améliorer les maillages obtenus et le second de créer le maillage selon la méthode choisie.

Modélisation par primitives géométriques

La modélisation par primitives géométriques signifie que les nuages de points sont ajustés avec des formes géométriques simples telles que des cylindres, des sphères, des extrusions d'une forme dessinée, ... il s'agit, dans ce cas, d'un modèle tridimensionnel qualifié de « tel que conçu » (Landes et al., 2011).

La modélisation 3D des composants a été effectuée en s'appuyant sur les nuages de points obtenus lors du PRT à l'aide du logiciel *Trimble Realworks*. En revanche, le logiciel *Maya* ne permettant pas d'importer un nuage de points, des prises de mesures ont donc dû être réalisées.

Le nuage de points consolidé et échantillonné à 1 mm de l'orgue Silbermann a été, dans un premier temps, segmenté manuellement suivant les différents composants à modéliser. Cette étape a permis une meilleure organisation du processus de modélisation. *Maya Autodesk* présente beaucoup d'outils pour modéliser des formes complexes. Généralement, l'objet « primitive » de base est un cube ou un cylindre puis par insertion d'*Edge Loop* (figure 3a), de déformations de *Vertex*, d'étirement de *Faces* (figure 3b) ou de différences de primitives géométriques (*Mesh booléens*), toute forme souhaitée peut être reproduite. Le travail de modélisation sur *Maya* reste tout de même chronophage, environ 400 heures ont été consacrées à la réalisation des modèles 3D.

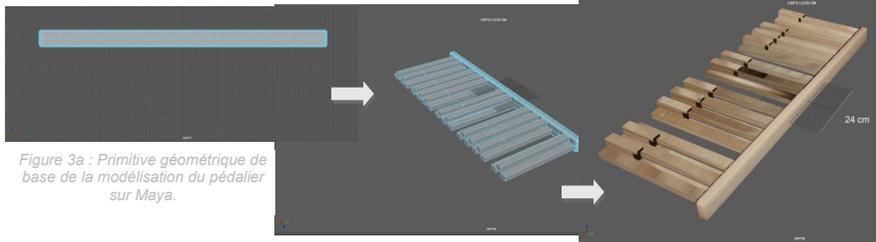


Figure 3a : Primitive géométrique de base de la modélisation du pédalier sur Maya.

Figure 3b : Extrusion des Faces à partir des Edges Loops insérées.

Figure 3c : Application de la texture sur le modèle 3D.

Modélisation hybride

La combinaison de primitives géométriques et de maillages permet une représentation plus fidèle et détaillée des deux buffets composant l'instrument, ce qui permet d'aboutir à une modélisation hybride. Un maillage a donc été réalisé pour les détails des deux buffets puis intégré à la structure du buffet créée avec *Maya* à partir de primitives géométriques. Une comparaison entre maillages selon la triangulation de Delaunay et la méthode de Poisson a été réalisée. En effet, la principale difficulté dans la modélisation des détails des buffets était la densité de points trop faible provoquant une trop grande imprécision dans la création du maillage. À terme, il s'est avéré que le maillage Poisson effectué sur CloudCompare permettait de garder plus de détails et de conserver un niveau de réalisme intéressant (Kazhdan et al., 2020). Cette méthode commence par le calcul des normales du nuage de points des tourelles par exemple. On constate que plus la densité de points est importante, plus l'écart entre les points est homogène, plus le maillage Poisson sera fidèle à la réalité. Enfin, un niveau suffisant d'*octree* doit être indiqué afin de préserver les détails les plus importants. Après un premier maillage grossier, il est impératif de combler les trous, de lisser certaines parties ou encore d'inverser le sens des normales pour qu'elles soient toutes dans la même direction. Cette condition est indispensable pour correctement appliquer la texture sur le maillage.

Texturage des modèles 3D

Le choix des textures fut extrêmement important et réalisé en collaboration avec les membres de Point d'Orgue. Une campagne photographique de l'orgue Silbermann a donc été effectuée. Les différentes textures bois ont été prises en mode automatique avec le Canon EOS R5 doté d'un objectif de 24 à 105 mm. La lumière homogène sur la photo, un éclairage approprié, une uniformité de la texture sans grande différence de couleur, une prise de vues large sont autant de contraintes à respecter pour obtenir des rendus visuels satisfaisants. Enfin, certaines textures ont directement été choisies depuis une plateforme internet mise à disposition librement (source : <https://www.textures.com/library>).

Pour appliquer les textures sur des primitives géométriques, différentes techniques existent mais celle utilisée au cours de ce PFE est la technique de l'*UV mapping* (Wikipedia, 2008). Elle consiste à appliquer une image plane (2D) sur la surface d'un modèle en 3D par projection. Le terme UV provient de la nature bidimensionnelle du repère image. En effet, U et V constituent les deux axes du plan de la texture appliquée. Alors que les axes X, Y et Z sont affectés aux axes 3D du modèle. Malgré un travail fastidieux, le principal avantage de cette méthode est de pouvoir texturer des surfaces complexes sans discontinuité radiométrique entre chaque élément. Pour appliquer les textures sur des maillages, deux possibilités s'offrent à nous : appliquer une photographie éventuellement redressée au préalable ou bien appliquer une couleur unie selon le modèle HSV (Wikipedia, 2006). Cette solution est utilisée pour les maillages des détails des buffets. En effet, le modèle 3D importé dans *Maya*, étant très détaillé et donc lourd, il fut impossible de lui appliquer la texture désirée. Une couleur unie du modèle HSV proche de la texture bois a été utilisée.

Maya Autodesk propose plusieurs solutions pour limiter les disparités apparaissant lors de l'application d'une texture selon la technique de l'*UV mapping*. Il est possible d'appliquer des UV de manière automatique sur le modèle 3D déplié ou encore de déplacer les faces constituant le modèle 3D sur l'unité de texture afin d'obtenir un meilleur rendu (figure 4). En revanche, ces procédés ne sont pas systématiques. En effet, dans le cas de modèles réalisés sur *Trimble Realworks* par primitives géométriques puis importés sur *Maya*, l'application de la texture ne peut être améliorée car seul l'UV automatique peut être appliqué. Ceci s'explique par le fait que les modèles en question ne sont pas constitués d'arêtes mais de milliers de faces, il est donc plus difficile de sélectionner les faces dont la texture doit être modifiée.

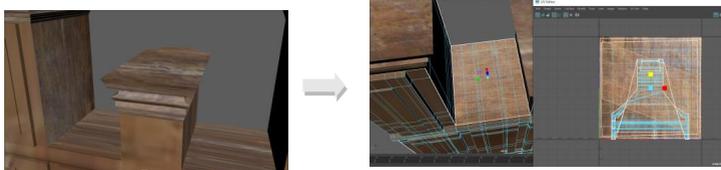


Figure 4 : Amélioration de la texture du buffet du Grand Orgue en jouant sur l'échelle de la texture concernée.

Voici une vidéo (figure 5) de présentation des modèles 3D (réalisée sur *Unity 3D* et *VSDC Video Editor*) :

Figure 5 : QR code de la vidéo et aperçu des modèles 3D



3. Création du puzzle 3D sous Unity

Même si plusieurs moteurs de jeux existent sur le marché, le choix s'est directement porté sur *Unity* puisque l'ensemble des animations proposées par le CIP aux visiteurs sont réalisées depuis ce moteur de jeu. Développé par *Unity Technologies*, cet outil est, à ce jour, l'un des plus répandus dans l'industrie du jeu vidéo. *Unity* s'appuie sur le langage de programmation C# (prononcé *C Sharp*) et bénéficie d'une grande communauté d'utilisateurs. En comparaison avec les autres moteurs de jeux tels que *Unreal Engine* ou encore *Ogre3D*, *Unity* a été jugé plus adapté aux débutants car il possède une interface utilisateur plus simple. De nombreux tutoriels et plus d'outils sont disponibles librement (Eleftheria et al., 2017). Ce puzzle 3D est réalisé en collaboration avec Julien Garrigue, développeur des animations interactives existantes à Point d'Orgue.

Choix de l'interface et conception du puzzle 3D

Attractive et efficace, l'interface du puzzle 3D doit répondre aux objectifs définis initialement. L'utilisateur sera en mesure de choisir la langue souhaitée parmi le français, l'anglais et l'allemand. De plus, il pourra naviguer à 360° autour des modèles 3D ainsi que zoomer sur les composants. Également pour apprendre davantage sur les composants, les visiteurs pourront cliquer sur un lien d'information pour chaque élément.

La confection du puzzle débute par le paramétrage de la caméra qui correspond à ce que l'utilisateur observera mais aussi par l'installation des différents modules de langues. Également, une attention particulière sera portée à la conception de l'interface utilisateur qui se doit d'être ergonomique. Je vous invite à lire le mémoire du PFE pour en apprendre davantage sur la conception de ce puzzle sous Unity 3D.

4. Conclusion et perspectives

La modélisation 3D d'orgues n'existe pas ou peu et découvrir cet instrument de musique aux côtés des organistes est une chance. D'un point de vue plus technique, ce projet regorge de points forts puisque pour arriver à produire des modèles 3D et répondre au cahier des charges, tout un processus de numérisations et de traitements a dû être mis en place. Pour se moderniser et se démarquer, la conception du puzzle 3D pourra être adaptée à la réalité mixte : une technologie peu connue encore mais qui peut se révéler être un véritable atout.

Références bibliographiques

- Kazhdan, M., Chuang, M., Rusinkiewicz, S. & Hoppe, H. (2020). Poisson Surface Reconstruction with Envelope Constraints. *Computer Graphics Forum* 39(5), p.173–182.
- Landes, T., Grussenmeyer, P., Boulaassal, H. (2011). Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2). *Revue XYZ de l'Association Française de Topographie (AFT)*, n°129, p.25-38.
- Eleftheria, C., Stelios, X. (2017). Overview and Comparative Analysis of Game Engines for Desktop and Mobile Devices. *International Journal of Serious Game*. Volume 4, p.21-36. URL: <https://doi.org/10.17083/ijsg.v4i4.194>
- Wikipedia (2008). UV mapping. https://en.wikipedia.org/wiki/UV_mapping
- Wikipedia (2006). Modèle HSV. https://fr.wikipedia.org/wiki/Teinte_Saturation_Valeur

Optimisation des protocoles de numérisation 3D multi-capteurs et de fusion de données hétérogènes au sein de l'Entreprise Premier Plan.

PFE présenté par : **Elisa Gautron**
Société d'accueil : **Premier Plan, Cabinet de GE**
Directeur de PFE : **Quentin Gross (GE)**
Correctrices : **Tania Landes et Hélène Macher**
Encadrant : **Quentin Gross (GE)**



1. Contexte et objectifs de l'étude.

La Topographie est la science qui permet la mesure, puis la représentation des formes visibles sur le terrain, qu'elles soient naturelles ou artificielles. L'objectif est de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée. La Topographie et les modèles en trois dimensions (3D) sont de nos jours indissociables, que ce soient des points géoréférencés ou des maquettes numériques.

Les outils de relevé 3D sont relativement facile d'accès, mais leurs utilisations et leurs associations, selon les missions, ne le sont pas forcément. Les contraintes et les difficultés demandent une analyse en amont et en aval de la chaîne d'acquisition-traitement choisie.

Souvent, une seule technique ne peut pas satisfaire toutes les exigences d'un projet vaste et complexe. Par conséquent, plusieurs capteurs et techniques sont généralement utilisés simultanément pour obtenir un meilleur modèle. La fusion des données, ou l'intégration des données issues de différentes techniques, peut se faire au niveau du capteur ou en phase de traitement après la collecte des données. L'intégration de capteurs et l'acquisition rentable de données spatiales, combinées, présentent l'utilisation d'appareils d'imagerie numérique, de scanners laser et de capteurs de positionnement. Quand nous sommes devant un objet complexe, inaccessible ou avec une mise en danger, l'acquisition partielle par drone photogrammétrique est souvent la solution.

La lasergrammétrie est une méthode dite « active », la mesure est disponible directement et la photogrammétrie est une méthode dite « passive », la donnée est exploitable indirectement à la suite d'un traitement. La problématique est d'identifier les différents critères nécessaires à l'optimisation des processus de numérisation 3D associant ces deux types de technologies. L'objectif principal est d'analyser les outils existants pour proposer une chaîne d'acquisition et de traitement, la plus optimale possible, pour une entreprise à l'échelle de Premier Plan, cabinet de Géomètre-Expert.

Afin que les modèles 3D produits puissent être sûrs et précis à travers une acquisition multi-capteurs, il est nécessaire de maîtriser les appareils et les logiciels ainsi que leurs limites pour constituer un modèle 3D dans toutes les situations. Le niveau de détails géométriques est un facteur principal pour l'étude. Il est engendré via les éléments initiaux définissant la résolution, en l'occurrence le « pas de balayage » lasergrammétrique et le pixel-objet photogrammétrique « GSD ».

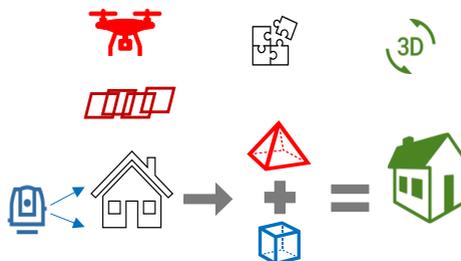


Figure 1 : Schéma de principe relevé 3D multi-capteurs

2. Analyses des méthodes d'acquisition et de traitement existantes.

Pour cette analyse il a été étudié des exemples inopérants, c'est à dire des missions n'ayant pas fourni les résultats voulus au moment de la consolidation des nuages de points lasergrammétriques et photogrammétriques. Afin de déceler les éléments responsables, un exemple en particulier situé à Bayonne (64) centre-ville est examiné.

Les analyses objectives sont séparées en trois groupes : les acquisitions individuelles, les traitements individuels et les éléments de consolidation.

Il en ressort principalement que l'acquisition par photogrammétrie aérienne représente la plus grande source d'erreurs et rend difficile voire impossible la consolidation. En effet, la photogrammétrie aérienne demande la gestion d'énormément de paramètres et le respect des règles de l'art : techniques, technologiques, sécurités...

De plus, un manque de recouvrement entre les zones acquises, de points de calage et un écart important dans la résolution des données ont impacté la consolidation nuage-nuage.

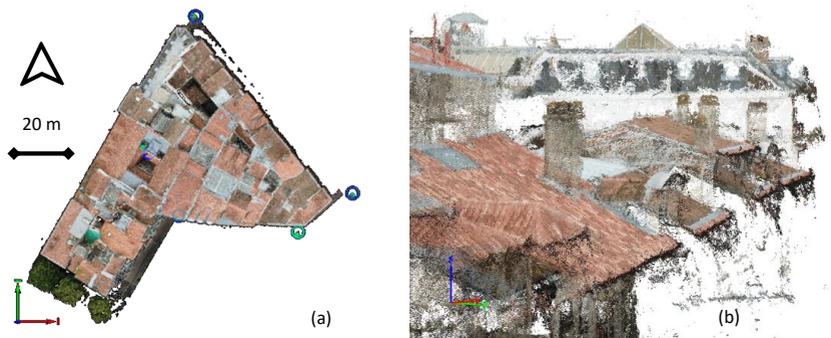


Figure 2 : (a) Photogrammétrie, Nuage de points dense PIX4Dmapper, site Bayonne centre-ville, (b) présence forte de bruits et d'effets de bords.

3. Tests et mise en place d'un protocole site (1) : premiers résultats.

Ce premier test se situe au Phare de Biarritz (64) avec un relevé 3D multi-capteurs, intérieur et extérieur du bâtiment et de son environnement.

Grâce aux analyses précédentes, il a été établi un protocole conditionnel afin d'éliminer les contraintes dès l'acquisition à partir d'un bilan des erreurs théoriques. Ce protocole a été déployé avec de nombreux instruments : 4 drones, 3 scanners 3D statiques et 2 scanners 3D dynamiques. La pluralité des appareils a permis d'obtenir un panel de jeux de données avec différents « pas de balayage » et « GSD ». Pour un référencement homogène, un canevas robuste et un semis de cibles ont été levés en coordonnées locales par double retournement, en nombre suffisant pour avoir des échantillons représentatifs de GCPs et de CPs. De plus, les stations tachéométriques ont été géoréférencées en NRTK (Trimble R12 - 180 époques).



Figure 3 : Vue aérienne, Phare de Biarritz (64)

L'ensemble des données ont été traitées à partir des logiciels natifs de chaque appareil lasergrammétrique et à partir de PIX4Dmapper pour la photogrammétrie aérienne. La globalité des acquisitions et des traitements a été réalisée avec les mêmes paramètres pour admettre un comparatif rationnel.

Les différentes consolidations ont été effectuées sur le logiciel Trimble Realworks qui a permis d'estimer les meilleures combinaisons de nuages de points issus de différentes sources, informant et

conditionnent le choix des appareils et des paramètres d'acquisition pour le niveau de détails géométriques voulu des prochaines missions.

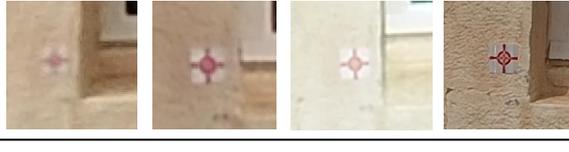


Figure 4 : Exemples qualités visuelles des résolutions de la plus grande à la plus petite des 4 drones, même distance et même objet (cible 6cm²).

La consolidation présente 3 étapes. Il a été déterminé le nuage de points de référence en scanner 3D statique par des critères de sélection objectifs, ensuite il y a été distingué le nuage de points en scanner 3D dynamique et le nuage de points photogrammétrique. Les éléments de calage et de contrôle sont issus du relevé tachéométrique et sont également connus en absolu.

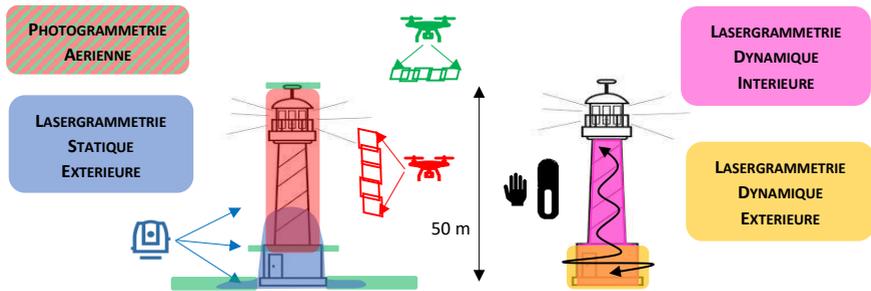


Figure 5 : Schéma de principe des zones de recouvrement des acquisitions, site (1) Phare.

Le nuage de points global du site (1) Phare de Biarritz (64) est composé à terme de nuages de points par photogrammétrie aérienne et par lasergrammétrie statique et dynamique. Dans cet essai, la meilleure consolidation nuage-nuage présente une erreur finale (annoncée logiciel) de 1,6 cm. Tous les nuages sont dans le même système, voici des écarts sur quelques points de contrôle.

Ecartes vrais (mm)				
Points	X	Y	Z	3D
m2	8	-10	8	15
m3	-7	11	6	14
m4	-5	-9	7	12
m5	6	9	10	15
m6	-4	8	9	13

Tableau 1 : Ecartes des points de contrôle entre leurs valeurs vraies et pointées dans le nuage de points après consolidation.

Figure 6 : Visualisation, consolidation et zonage des acquisitions extérieures.



4. Confirmation de la méthode site (2) : seconds résultats.

Dans un souci de confirmation de la méthodologie, un second site (2), une Villa à Biarritz (64) a fait également l'objet d'un relevé 3D multi-capteurs. En fonction de la demande du client et des caractéristiques physiques de ce site (2), la solution choisie est un relevé par lasergrammétrie terrestre pour l'extérieur et les façades, et par photogrammétrie aérienne pour les toitures, accompagné d'un canevas fermé et d'un semis de points de contrôle en coordonnées locales et géoréférencées. Ces seconds résultats sont à découvrir dans le mémoire et au moment de la soutenance. Mais vous pouvez

observer les premiers éléments de cette mission. Pour ce relevé 3D il a été utilisé qu'un seul drone - capteur M4/3 et la station géospatial Trimble SX10 jouant le rôle de tachéomètre et de scanner 3D statique.



Figure 7 : Vue aérienne Site (2) Villa



Figure 8 : Photogrammétrie, Orthophoto PIX4Dmapper, site (2) Villa

5. Conclusion et perspectives.

L'ensemble des recherches et des tests a abouti à des résultats satisfaisants, en termes de consolidation de modèle 3D et d'exploitation des données pour les livrables. Dans une volonté d'optimisation des modes opératoires, une nouvelle approche préparatoire est mise place pour l'analyse des éléments en amont en fonction du niveau de détails géométriques souhaité pour la mission. La réalisation d'une mission est soumise à la qualité de la donnée voulue. Pour garantir les mesures, la méthode doit prendre en compte la dégradation inerrante aux différents exports et/ou transformations des données qui seront utilisées pour les livrables. Cependant, cela demande des relevés plus performants et agit sur les rendements.

Les protocoles évolueront constamment avec les technologies de la numérisation 3D mais les principes fondamentaux sont pérennes. L'objectif est de suivre ces progressions. La rénovation de sites ou de bâtiments devient la majorité des demandes des futurs clients, entraînant de nombreuses perspectives d'évolution du BIM et de la réalité virtuelle.

6. Récapitulatif des matériels et des logiciels.

Voici un récapitulatif afin de visualiser tous les éléments intervenants dans la réalisation de cette étude.

Matériels	Logiciels
Scanners 3D Statiques Leica RTC 360 Trimble X7 Faro Focus S70	Traitement lasergrammétrique Leica Cyclone Register 360 Trimble Realworks Scene Geoslam Hub
Scanners 3D Dynamiques Leica BLK2GO Geoslam Zeb Revo RT	Traitement photogrammétrique PIX4Dmapper
Aéronefs DJI Mavic Pro DJI Matrice 210 v2 + X5S DJI Phantom 4 RTK DJI Matrice 300 RTK + Zenmuse P1	Applications de vol DJI GS PRO DJI PILOT DJI GS RTK
Topographie Station totale Trimble S5 Station géospatial Trimble SX10 Antenne GNSS Trimble R12	Orthophotos PointCab Leica Cyclone Register 360 Trimble Realworks PIX4Dmapper

Collaborateurs : Leica Geosystems, Geomesure, Escadrone.

Développement de prestation de simulation de girations 3D



PFE présenté par : Maxime Baehrel
Société d'accueil : Transports Europe Services
Directeur de PFE : Hervé Kautzmann
Correcteur : M. Emmanuel Alby
Encadrant : M. Mathieu Koehl



1. Contexte de l'étude

Transports Europe Services (TES) est une entreprise effectuant des prestations pour les plus grandes sociétés de transport exceptionnel d'Europe.

En effet, c'est elle qui va effectuer les études préliminaires nécessaires en vue de définir le meilleur itinéraire pour y faire passer le convoi. De même, elle effectuera des démarches, auprès des autorités, permettant d'obtenir les autorisations de circulation en France ainsi qu'en Europe. Lorsque l'itinéraire défini ne permet pas le passage d'un convoi, des aménagements routiers et urbains peuvent être mis en place. Selon la catégorie et les caractéristiques du convoi, des voitures pilotes ou des guideurs moto sont imposés au transporteur.

L'objectif de cette étude est donc d'effectuer des acquisitions lasergrammétriques et photogrammétriques d'un environnement où se pose la question d'un possible passage du convoi. À la suite de cela sera effectuée une modélisation en trois dimensions de ce dernier permettant d'effectuer une giration la plus réaliste possible.

Pour mener à bien cette étude il faut tout d'abord définir les besoins de l'entreprise en termes de précision, de temps à consacrer à la partie acquisition et traitement des données ainsi qu'à la facilité d'utilisation. Il faudra alors en ressortir une méthode d'acquisition la plus optimale couplée au meilleur logiciel de modélisation 3D.

2. Acquisition des données

2.1. Lieu acquis

Lors de la définition d'un itinéraire à suivre pour le transport exceptionnel, certains endroits peuvent poser un problème, notamment dans les villages étroits. En effet, jusqu'alors, la personne en charge de mettre en place l'itinéraire partait en reconnaissance afin de percevoir les éventuels endroits où le convoi pourrait ne pas passer. Puis, elle effectuait soit des tests avec des gabarits ou des mesures avec de simples lasers.



Les acquisitions ont été effectuées suivant un cheminement problématique se situant à Dampierre-sur-Salou en la Haute-Saône en France. (Figure 1)

En effet, plusieurs endroits peuvent empêcher le passage de transports exceptionnels, comme un débord de toit, un arbre ou bien encore un coin de bâtiment. Nous nous sommes donc rendus sur place afin d'effectuer des acquisitions.

Figure 1 - Emplacement du lieu des acquisitions avec le cheminement en jaune

2.2. Méthodes d'acquisition

Afin de pouvoir réaliser une simulation de giration en trois dimensions, nous avons besoin d'acquérir notre environnement en vue d'en créer un maillage.

Deux appareils ont été utilisés afin de permettre une comparaison qualitative et visuelle. En effet, le but étant de déterminer la méthode regroupant les deux objectifs principaux qui sont le prix ainsi que la densité de points acquise.

2.2.1. GeoSLAM Zeb-Revo RT

Le GeoSLAM Zeb-Revo RT est un scanner laser dynamique ou plus communément appelé scanner laser à main. Cet instrument est basé sur l'algorithme SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) qui consiste à construire une représentation consistante de l'environnement en s'appuyant sur les mesures du mouvement et la fermeture de boucle.¹

Ce scanner laser s'avère être une très bonne solution en intérieur pour un gain de temps conséquent mais moins bonne pour des relevés en extérieur.²



Figure 2 - Zeb-Revo RT – GeoSLAM

	GeoSLAM Zeb-Revo RT
Dimensions (mm)	86 x 113 x 287
Poids (g)	1000
Autonomie (h)	4
Portée (m)	30 (intérieur) / 15 (extérieur)
Champ visuel (°)	270 x 360
Mode d'exposition	Automatique
Fréquence de mesure (pts/s)	43 200
Classe du laser	1

Figure 3 - Caractéristiques du GeoSLAM Zeb-Revo RT

Pour l'acquisition effectuée avec ce scanner laser, un total de 6 boucles d'une longueur d'environ 40m chacune avec recouvrement d'une dizaine de mètres entre ces dernières a été effectué. Le Zeb-Revo RT permet de suivre l'acquisition en direct via un smartphone ou une tablette et nous informe de la qualité de cette dernière grâce à une flèche de couleur.

2.2.2. Faro Focus 3D x330

Le Faro Focus 3D x330 est un scanner laser terrestre, un ensemble de 9 stations ont été effectuées pour cette acquisition.



Figure 4 - Faro Focus 3D X330

	Faro Focus 3D x330
Dimensions (mm)	240 x 200 x 100
Poids (g)	5200
Autonomie (h)	4,5
Portée (m)	0,6 - 330
Champ visuel (°)	300 x 360
Résolution (°)	0,009 x 0,009
Fréquence de mesure (pts/s)	122 000 / 244 000 / 488 000 / 976 000
Classe du laser	1

Figure 5 - Caractéristiques du Faro Focus 3D X330

Les stations ont été placées de sorte à avoir les meilleures prises de vues des éléments qui nous intéressaient dans cette rue. Afin de permettre une bonne consolidation entre les différents scans, des sphères ont été placées de sorte à être visibles depuis au moins deux stations différentes. Pour nous permettre d'effectuer la partie traitement sans problèmes nous avons veillé à avoir un minimum de trois sphères visibles depuis deux stations successives.

¹ Abouzahir, M. (2017), 'Algorithmes SLAM : Vers une implémentation embarquée', Thèse, Université Paris-Saclay, Paris. 199 p.

² Baehrel, M. & Lautier, J. (2020), 'Modélisation d'arbres urbains avec un scanner laser dynamique (zeb-revo rt) sur 3 sites strasbourgeois', PRT, INSA de Strasbourg, Strasbourg. 69p.

3. Traitement des données et comparaisons des différentes méthodes d'acquisition

Une fois les acquisitions effectuées, il a fallu traiter les nuages de points afin de les consolider entre eux. En effet, chaque nuage ayant été pris depuis des emplacements différents, il nous faut les assembler. Plusieurs logiciels nous permettent d'effectuer cette étape.

3.1. Traitement des nuages de points

3.1.1. Zeb-Revo RT

Pour la partie traitement du nuage de point du Zeb-Revo, plusieurs logiciels s'offraient à nous pour la consolidation des différents nuages. En effet, n'ayant comme seules données les nuages de points, il nous faut effectuer une consolidation Nuage/Nuage. Ainsi, les logiciels ayant été testés sont Trimble RealWorks, 3D Reshaper et CloudCompare.

Sur Trimble RealWorks l'erreur maximale de consolidation entre nuages est de 2,6cm. Cette valeur étant dans la fourchette de précision de l'appareil, nous pouvons en conclure un recalage correct.

Sur 3D Reshaper, lors de la première consolidation entre deux nuages nous obtenons une erreur de 15cm, ce qui est trop élevé pour admettre que le recalage est bon.

Sur CloudCompare, deux méthodes s'offrent à nous, soit la méthode automatique, soit la méthode manuelle. Les deux ont été testées et aucune des deux ne fonctionnent correctement avec nos données. La première qui fonctionne sur la méthode de l'ICP (Iterative Closest Points) et demande un premier alignement grossier nous affiche une erreur de l'ordre du mètre. La seconde, repose sur l'utilisateur puisqu'elle lui demande de saisir manuellement les points caractéristiques entre deux nuages. Elle nous fournit très souvent des résultats convaincants, mais dû à une densité de points trop faible, il est impossible de recalibrer les nuages entre eux sans avoir une erreur trop élevée.

La méthode retenue pour le recalage des différentes boucles est donc celle réalisée à l'aide de Trimble RealWorks.

3.1.2. Focus 3D X330

Les scans obtenus grâce au scanner laser terrestre Faro Focus 3D X330 ont été consolidés sous le logiciel SCENE, propre à Faro. Nous avons commencé à travailler sans la colorisation des scans afin d'avoir une meilleure visibilité des sphères. En effet, lors du lancement de la première consolidation suivant des cibles (des sphères dans notre cas), nous avons pu nous rendre compte que le logiciel avait, soit détecté de mauvaises sphères, soit n'en avait pas détecté du tout. Ainsi, grâce à l'application ATS Quality Manager incluse dans SCENE, les mauvaises sphères ont été enlevées et les manquantes rajoutées. Cependant, sur certains scans des cibles avaient été cachées dû à une forte circulation, ce qui a empêché de réaliser une consolidation entre tous les scans. La définition de nouveaux plans a donc été nécessaire afin de parer à ce problème. Cela étant fait, nous avons pu relancer une nouvelle consolidation qui a fourni des résultats très convaincants, de l'ordre du millimètre.

3.2. Comparaison des nuages de points

Premièrement nous pouvons constater que la densité est bien plus importante sur le Focus 3D X330 que sur le Zeb-Revo RT. En effet, le premier fournit environ 190 millions de points contre 2,5 millions pour le second. Ensuite, en effectuant un zoom sur les endroits problématiques, on se rend compte qu'ils ne sont pas suffisamment détaillés pour le second ce qui empêche un rendu réaliste. (Figure 6)



Figure 6 - A gauche un arbre acquis au Focus 3D X330 et à droite le même arbre acquis au Zeb-Revo RT

4. Simulation de giration 3D

4.1. Création d'épures de giration en 2D

Dans cette partie le logiciel retenu pour créer des épures de girations est le logiciel AutoTURN de Transoft. Il a été choisi car l'entreprise possédait déjà une licence et avait déjà pris ses marques avec ce dernier. Des premiers essais avaient été effectués en trois dimensions. Cependant, le logiciel fonctionnant sous AutoCAD, des données trop conséquentes n'étaient pas supportées ce qui dégradait fortement la qualité de l'environnement 3D. De plus, une limitation de 20 000 éléments lors de la définition du sol nous poussait à trouver une solution pour obtenir un maillage de ce dernier correct tout en restant en dessous de cette barre. Pour de petits cheminements cela ne pose pas de problème, en revanche plus ils sont grands, plus il est difficile de ne pas dépasser cette limite. Nous avons donc décidé d'effectuer nos épures en deux dimensions. Cela nous permettra ensuite d'en extraire les polygones directrices du tracteur ainsi que de l'essieu arrière directionnel.

4.2. Modélisation 3D d'un convoi exceptionnel

Afin de pouvoir effectuer la simulation de giration en 3D, nous avons besoin du convoi exceptionnel adéquat. Les modèles 3D étant payants nous avons opté pour une modélisation à l'aide de Blender. En effet, suivant des BluePrints du camion voulu (qui sont des schémas des différentes faces), le tracteur ainsi que l'essieu arrière directionnel ont été modélisés.

Une modélisation a aussi été créée à la suite de l'acquisition d'un nuage de points d'un convoi exceptionnel. Ce dernier a été traité sous 3D Reshaper.

4.3. Simulation de giration 3D sous Unity

Une fois tous les éléments nécessaires à la mise en place d'une simulation de giration 3D il fallait déterminer le logiciel capable d'importer tous les éléments et de retourner une simulation en trois dimensions. Unity est apparu comme un choix judicieux puisqu'il permet de lire des maillages et possède un lien direct pour l'import depuis Blender. A ceci s'ajoute la gratuité de ce dernier pour des petits projets ne générant pas des chiffres d'affaires supérieurs à 100 000 \$.

Un problème a cependant été rencontré lors de l'import d'une polygône. En effet, Unity ne gérant que des maillages il a fallu trouver une solution permettant de transformer celle-ci en un maillage.

La dernière étape était donc de créer ou bien de trouver un script en C# permettant au camion de suivre la polygône de la giration 2D. Plusieurs scripts ont été trouvés sur la boutique de Unity (AssetStore), payants ou gratuits, permettant cette fonction.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude a donc permis de mettre en place un protocole permettant de partir d'une acquisition brute pour aboutir à une simulation en trois dimensions. Elle a aussi permis de définir la méthode d'acquisition la plus adaptée aux besoins de l'entreprise.

Il s'avère que la plus-value apportée aux travaux déjà réalisés par TES reste minime compte tenu du temps qu'elle met à être acquise. De ce fait, des améliorations des logiciels de girations ainsi que le passage à une solution de mobile mapping system – plus onéreuse mais plus rapide d'acquisition – peuvent s'avérer être une nécessité afin de pouvoir fournir une simulation en trois dimensions dans un délai convenable.

Restitution 3D des vestiges architecturaux du site d'Eridu, Irak

PFE présenté par : **Yasmine Idam**
Société d'accueil : **MISHA UMR 7044**
Directeur de PFE : **Philippe Quenet**
Correcteur : **Emmanuel Alby**
Mathieu Koehl
Encadrant : **Philippe Quenet**



Maison Interuniversitaire des
Sciences de l'Homme
- Alsace -



INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG



1. Contexte et objectifs de l'étude :

Eridu, moderne Abu Shahraïn, est une cité sumérienne inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Elle est considérée comme l'une des plus anciennes ruines de Mésopotamie. Située à près de 30km du fleuve de l'Euphrate et à moins de 20km de la célèbre cité d'Ur, son étendue reste néanmoins inconnue.

Le site a connu plusieurs périodes d'occupation entre la période d'Ubaid (6750 à 3750 av. J.-C) et la période néo-babylonienne (626 et 539 av. J.-C), avec de possibles interruptions.

En Mésopotamie, il était de coutume de bâtir les nouvelles constructions sur des bâtiments antérieurs arasés à une certaine hauteur. Au fur et à mesure des siècles et des constructions, une colline artificielle, appelée tell en arabe, se forme. Ces tells nous permettent à l'époque actuelle de repérer l'emplacement des vestiges architecturaux : c'est le cas d'Eridu, qui contient 7 buttes.

Le site a été fouillé à 4 reprises pendant le XIXe et le XXe siècle : tout d'abord en 1854 par Taylor pour le British Museum. Il est revenu en Angleterre avec une carte topographique du tell 1 qui est, selon les archéologues, assez douteuse. D'autres fouilles ont été réalisées un demi-siècle plus tard, en 1918 par Thompson, et en 1919 par Hall. Ces derniers se sont également concentrés sur le monticule principal, et ont fourni plusieurs documents, dont des plans et des rapports de fouille. Enfin, 4 saisons de fouilles ont été menées par Fuad Safar, accompagné de Seton Loyd, entre 1946 et 1949 pour le compte du Service irakien des antiquités.

La situation politique instable en Irak a causé l'interruption des fouilles pendant 70 ans. Ce n'est qu'en 2014 qu'un permis a été délivré par le Conseil national des antiquités et du patrimoine irakien pour la reprise des chantiers. Une première mission a eu lieu en 2018, suivie d'une autre en avril 2019.

La mission est dirigée par Franco d'Agostino, de l'université Sapienza à Rome, en collaboration avec l'université de Strasbourg. L'équipe est multidisciplinaire et regroupe à la fois des archéologues, des ingénieurs et des techniciens de fouille. Les membres de cette équipe sont de différentes nationalités, parmi eux des français, des italiens et des irakiens. Une autre mission avait été prévue pour avril 2021 mais a été reportée à l'année prochaine à cause des restrictions liées à la pandémie du Covid, mais aussi à cause de l'instabilité politique du pays suite à un attentat dans la capitale irakienne.

Les fouilles réalisées sur le site principal (le tell 1) ont révélé plusieurs vestiges architecturaux qui seront concernés par ce projet :

- Le bâtiment H5
- Le Portico Building
- Le Sondage des Temples
- La Ziggurat

Ce projet consiste principalement à reconstituer l'état de fouille de ces bâtiments, puis à restituer l'état d'origine de certains d'entre eux, en fonction de la documentation disponible. Ces modèles 3D, réalisés sur Maya, seront par la suite intégrés dans un SIG réalisé par Edouard JUND dont le sujet de PFE porte aussi sur le site d'Eridu.

La nature du travail d'Edouard est différente de la mienne : une partie de son travail aboutira à un géoréférencement du site qui va permettre de localiser les fouilles, ainsi qu'à la production d'une base

de données où l'on intégrera la majorité des informations de la région. Nos travaux sont parallèles et complémentaires, puisque le positionnement de mes modèles 3D dans le SIG va permettre de dégager des informations quant à l'altitude des différentes couches stratigraphiques.

2. Le bâtiment H5 :

Situé à une dizaine de mètres du mur de soutènement sud-est, le « Building H5 » fait partie des vestiges les mieux préservés du site, et c'est aussi le bâtiment qui a la meilleure documentation en terme de qualité des photos.

Nous nous sommes tout d'abord intéressé à la restitution de l'état de fouille de ce bâtiment. Un plan a servi comme base pour la modélisation de son emprise. Nous nous sommes aidés des quelques échelons présents sur les photos pour estimer les hauteurs de conservation des murs. Ces derniers n'ont pas été conservés partout de la même manière à cause de l'érosion.

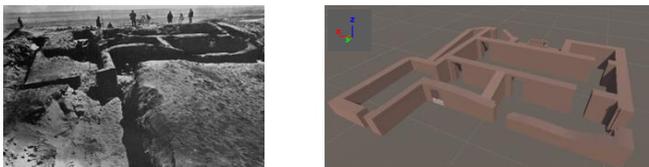


Figure 1 : Modélisation de l'état de fouille à partir d'une photo d'ensemble du bâtiment H5

Il est à noter qu'en fonction de la qualité des photos, et de la présence ou pas d'échelons, l'estimation des hauteurs peut être plus ou moins précise. Dans l'ensemble, nous nous sommes aidés de plusieurs éléments pour réaliser notre restitution :

- Les informations présentes dans les rapports de fouille (dimensions, hauteurs, descriptions, etc.),
- Les plans,
- Les photographies : en fonction de la qualité des photos, nous avons pu peaufiner l'état de fouille en faisant un calcul sur Photomodeler pour avoir une meilleure estimation de l'arasement des murs. Cette méthode consiste à effectuer une orientation de la caméra en indiquant les coordonnées de 5 points minimum. Ensuite, à partir d'un point connu en coordonnées, nous pouvons demander au logiciel de nous indiquer un « offset » qui représente une distance depuis ce point par rapport à un axe précis : si nous avons par exemple un point au sol connu en coordonnées, nous pouvons lui demander de nous indiquer le point qui se trouve à 2m par rapport à l'axe Z.

Parfois, ces 3 éléments se contredisent : vient alors le travail de réflexion avec l'aide de l'archéologue. La méthodologie suivie et la justification des choix retenus seront détaillés dans le mémoire. Nous allons y présenter une visualisation de nos différents degrés d'incertitude pour chacun de nos modèles 3D.

Le type d'architecture du bâtiment H5 est assez répandue en Mésopotamie, il était donc assez simple de définir une hypothèse de restitution. Ce travail s'est appuyé sur des croquis réalisés par M Philippe Quenet. Nous nous sommes basés sur le modèle 3D de l'état de fouille, en élevant les murs à une hauteur maximale de 3,95m. Des lanterneaux ont été rajoutés, ainsi qu'un escalier constitué de 21 marches menant vers la terrasse. Le rendu final est présenté dans le mémoire.

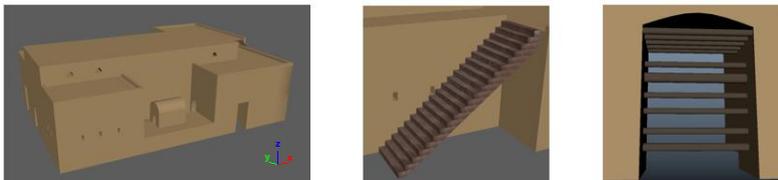


Figure 2 : Restitution 3D du bâtiment H5

3. Le Sondage des Temples :

Le sondage des temples, presque au centre du tell, correspond à 19 niveaux d'occupation retrouvés en dessous de la ziggurat. Les niveaux les plus profonds sont constitués de bâtiments unicellulaires et ont été construits par les tout premiers occupants sur une dune de sable.

La figure ci-dessous présente une visualisation de ces vestiges. En réalité, ces bâtiments sont à superposer les uns par rapports aux autres. Les bâtiments les plus anciens sont assez légers, et au fur et à mesure des siècles les nouvelles constructions deviennent de plus en plus imposantes, jusqu'à devenir monumentales à partir du niveau XI.



Figure 3 : Visualisation des différents niveaux d'occupation du sondage des temples

La première étape était de mettre à l'échelle les plans pour effectuer une modélisation de l'état de fouille, en suivant la même démarche que celle du bâtiment H5. Une fois ces niveaux modélisés, il a fallu déterminer les altitudes des sommets des terrasses ainsi que des murs afin de pouvoir effectuer un recalage vertical.

La méthode de construction de l'époque était la suivante : pour construire un nouveau temple, les Mésopotamiens arasait les murs à environ 1 m, comblaient les pièces de briques et construisaient leurs nouveaux bâtiments par-dessus. Généralement, la nouvelle terrasse englobe les murs du niveau en dessous. Le nouveau sol correspond donc à la hauteur d'arase des murs du niveau précédent. Cette logique de construction a été prise en compte lors du calcul des différentes altitudes. Le carroyage quant à lui nous a permis de réaliser le recalage horizontal de ces différents niveaux.

Les figures ci-dessous permettent de visualiser la superposition obtenue. Nous n'avons pas fait figurer les terrasses, puisque celles-ci engloberaient les murs des niveaux en-dessous, rendant la visualisation impossible.

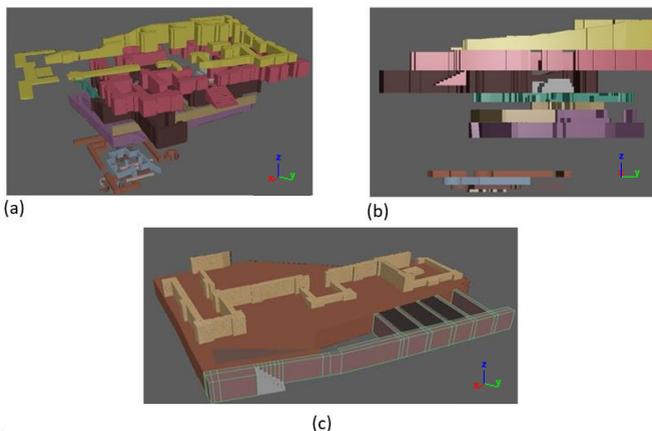


Figure 4 : (a) Vue en perspective de la superposition des 19 niveaux (b) Vue de droite (c) Exemple de restitution de l'état de fouille de temple X avec sa terrasse

Cette séquence de bâtiment contient 5 terrasses qui sont imbriquées les unes par rapport aux autres autour de la terrasse du temple VI. Chaque terrasse a un fruit que nous avons mesuré grâce à une coupe. Cette dernière nous a également permis de mesurer l'altitude du sommet de chaque terrasse. La terrasse I était plus compliquée à modéliser que les autres : elle est composée d'un parement de 93 cm qu'il fallait modéliser à part et coller à la terrasse. La face de ce parement contient des gradins d'une hauteur de 17 cm et d'une profondeur de 15 cm. La partie haute de ce parement est ondulée. Les fouilleurs n'ont pas atteint la même profondeur partout, d'où cette impression qu'il manque des éléments. En réalité, nous n'avons simplement pas d'autres informations. Nous avons également restitué en élévation le temple VII, à partir d'une maquette déjà réalisée.

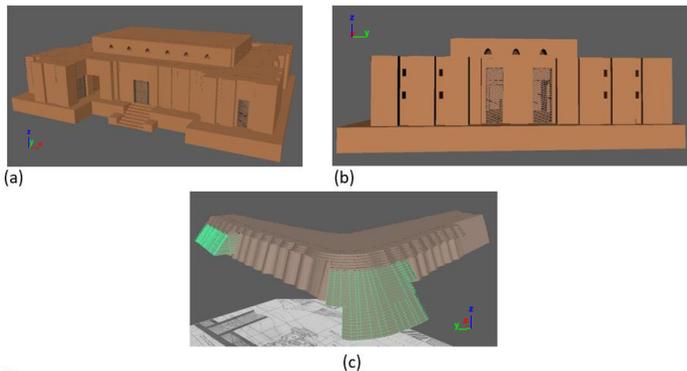


Figure 5 : (a) Vue en perspective de la restitution du temple VII (b) Vue de droite (c) Restitution de l'état de fouille de la terrasse I et de son parement

Tous ces modèles 3D vont être décomposés en sous-ensemble appelés « unités stratigraphiques » (US) pour une meilleure exploitation par les archéologues. Cette décomposition sera intégrée dans une base de données réalisée par Edouard Jund sur le logiciel ArcGis Pro.

4. La ziggurat :

À la fin du III^e millénaire av. J.-C., le roi Ur-Nammu d'Ur restaure le temple d'Enki (dieu des eaux en Mésopotamie) et y adjoint une ziggurat. Cette dernière a une base rectangulaire de dimensions 61,80 sur 46,50 mètres. On parvenait à son sommet par un escalier axial et deux escaliers latéraux.

Nous avons restitué un état hypothétique de cette ziggurat en appliquant le même fruit que celui de la ziggurat d'Ur, dont le modèle 3D a été réalisé par Laurène Moroni en 2019. Chaque escalier est constitué de 105 marches de 12,5 cm de hauteur et 26cm de profondeur.

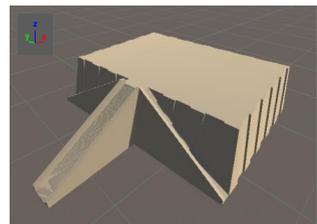


Figure 6 : Restitution de la ziggurat d'Eridu

5. Conclusion :

Ces modèles 3D ont été réalisés sur Maya, un logiciel de modélisation conçu pour les créateurs d'animations. La modélisation a été principalement réalisée sur la base de primitives géométriques, que nous avons modifiées grâce à plusieurs outils : edge loop, bridge, extrude, etc. Nous avons pu, à travers ce projet, nous rendre compte des limites de ce logiciel notamment pour des travaux topographiques. Par exemple, et contrairement à AutoCAD, nous ne pouvons pas modéliser un élément et demander au logiciel de le translater automatiquement d'une certaine distance. Nous ne pouvons pas non plus modéliser automatiquement des murs perpendiculaires ou parallèles les uns par rapport aux autres. Nous avons donc dû passer par d'autres chemins, parfois assez chronophages. Le logiciel reste néanmoins excellent pour des travaux d'animation et de simulation.

Gestion informatique intégrée des données de la mission archéologique d'Eridu, Irak.

PFE présenté par : **Edouard Jund**
Société d'accueil : **MISHA, Archimède – UMR 7044**
Directeur de PFE : **Philippe Quenet**
Correcteurs : **Emmanuel Alby & Mathieu Koehl**



1. Contexte et objectifs de l'étude.

En 2018, des fouilles ont repris, après 70 ans d'interruption, sur le site archéologique d'Eridu, l'actuel Abu Shahrayn (30°49'0.73"N, 45°59'48.21"E), dans le sud de l'Irak, à 35 km environ au sud-ouest de la ville de Nassiriyah. Abu Shahrayn est le nom de la butte archéologique dite principale (ou Site 1), qui est entourée de six autres buttes, elles aussi occupées dans l'Antiquité. Une première courte mission de terrain au printemps 2018, sur la butte principale, a été suivie d'une seconde en avril-mai 2019, qui a ciblé quatre des sept buttes. Elle a duré quatre semaines. La pandémie de COVID-19 a contraint l'équipe à ajourner ses campagnes de 2020 et 2021.



Figure 1 : Site d'Eridu à l'échelle du Moyen-Orient.

La mission est dirigée par le professeur Franco D'Agostino de l'université La Sapienza de Rome. Le directeur des fouilles en est le professeur Philippe Quenet de l'université de Strasbourg. L'équipe est internationale (irako-italo-française) et interdisciplinaire. Elle a réuni jusqu'à présent des archéologues et des historiens spécialistes du Proche-Orient ancien, des ingénieurs en géophysique et en aéro-pilotage, ainsi que des techniciens de fouilles.

Un des buts poursuivis dans ce projet est de synthétiser et d'homogénéiser autant que possible la documentation récoltée au cours des anciennes campagnes de fouille, qui ont eu lieu en 1853-1854, 1918, 1919 et 1946-1949 et lors des plus récentes (2018 et 2019). Ce programme a été entamé en 2019 grâce à un premier PFE réalisé par une étudiante de l'INSA, Laurène Moroni. Son traitement des relevés photogrammétriques de 2018 et 2019 a débouché sur l'établissement de modèles 3D et d'orthophotographies pour les quatre des sept buttes explorées jusqu'à maintenant.

La suite du programme comprend plusieurs volets. L'un d'eux, objet du présent projet, consiste à produire des fichiers moins lourds des orthophotographies et des rendus 3D existants, mais aussi et surtout à créer un SIG regroupant données anciennes et plus récentes. L'objectif n'est pas seulement de créer un espace assurant le stockage, la préservation durable, la manipulation et l'exploitation présente et future de l'information disponible, mais d'orienter les stratégies de terrain qui seront adoptées dans les années à venir.

Les objectifs concrets de ce projet sont les suivants :

- Créer une base de données permettant d'intégrer à la fois les données anciennes et les nouvelles données acquises directement sur le terrain lors des futures campagnes de fouilles.
- Créer un SIG alimenté par cette base de données et permettant la visualisation et l'analyse des données à différentes échelles et différentes périodes.

Cet outil permettra aux archéologues d'analyser la zone et ainsi de mieux comprendre le site et de mettre en place des stratégies pour le travail de terrain.

2. Préparation des données à intégrer dans la base de données.

a. Traitements photogrammétriques sur les images aériennes de 1926 :

Nous disposons de neuf photographies aériennes du site 1 ayant été prises en 1926 par la Royal Air Force. Ces données constituent un élément clé puisqu'elles permettent de constater l'état du terrain il y a presque un siècle et ainsi de repérer les chantiers de fouilles datant de 1918 et 1919. Les plans topographiques de l'époque sont très déformés (une dizaine de mètres pour deux cent cinquante mètres environ) notamment à cause des outils topographiques de faible précision utilisés sur le terrain et d'une application des méthodologies probablement précipitée. C'est pourquoi l'obtention d'une orthophotographie et d'un modèle numérique de terrain de 1926 seraient d'une grande pertinence pour replacer les anciens chantiers de fouilles.

Plusieurs difficultés se présentent : le jeu de données ne présente que neuf photos, ce sont en réalité des images argentiques développées qui ont été scannées, le recouvrement n'est pas idéal, il n'existe aucune information fiable quant au système d'acquisition des photos utilisés, et enfin il n'existe aucun point d'appui pour mettre à l'échelle ou géoréférencier le projet. En d'autres termes, ces images ne sont pas idéales pour y réaliser des traitements photogrammétriques.

Une méthodologie spécifique à cette situation a été mise en place afin d'obtenir des informations spatiales à partir de ces photographies.

L'intérêt est de pouvoir replacer les chantiers de fouilles anciens avec une meilleure précision et de déterminer une altitude de surface de ces chantiers, jusqu'alors inconnue.

b. Géoréférencement d'anciens plans :

Concernant les informations des campagnes de fouilles, les fouilleurs qui sont intervenus sur le site principal durant les campagnes de fouilles passées ont laissé des descriptions textuelles, des photographies et des plans. Malheureusement, pour les fouilles de 1853-1854 et 1946-1949, nous ne sommes pas parvenus à mettre la main sur des photographies aériennes. Les données les plus parlantes étaient donc les plans topographiques, qu'il a fallu géoréférencer en renseignant des points homologues avec les orthophotographies de 2018 ou 1926. Ces plans étant d'une précision faible, il est important de réaliser un recalage le plus rigoureux possible afin de limiter une erreur finale déraisonnable. Selon le cas, la transformation choisie est soit une transformation polynomiale de premier ordre, également appelée affine, soit une transformation d'Helmert. Cette dernière introduit une translation, une rotation et un facteur d'échelle unique (homothétie), tandis que la transformation affine permet d'introduire des facteurs d'échelle différents selon l'axe x et y , ainsi le document source est légèrement déformé contrairement à la méthode Helmert. Les erreurs moyennes quadratiques calculées à partir des résidus sur les points d'appui sont très proches avec ces deux méthodes (différence systématiquement inférieure à 12%). Le détail de ces EMQ est à consulter dans le mémoire.

c. Localisation des anciens chantiers de fouilles :

Il est dans l'intérêt des archéologues actuels de pouvoir repérer ces zones anciennement fouillées afin de les éviter si elles doivent être évitées ou au contraire d'y refaire un chantier si cela semble pertinent.

Mise à part pour les fouilles de 1918 et 1919, pour lesquels il est possible de s'appuyer sur les photographies aériennes de 1926, les autres chantiers ne sont localisables que grâce aux descriptions et plans topographiques. La précision de la localisation des chantiers de fouilles est donc moins bonne que pour les chantiers de 1918 et 1919.

Une fois les plans géoréférencés, les emprises des chantiers du XIX^{ème} siècle et des années 1940 seront matérialisées par des polygones 3D. Pour déterminer une altitude des surfaces des chantiers, les références altimétriques sont les MNT de 2018 et de 1926.

Les différentes exactitudes de la localisation des chantiers de fouilles sont disponibles dans le mémoire.

d. Estimation des erreurs :

Il convient de rappeler qu'une erreur moyenne quadratique (ou EMQ) correspond à l'exactitude d'une donnée et est calculée à partir des résidus par rapport à une valeur considérée comme « valeur vraie ». Il est important de renseigner une exactitude aux données insérées dans le système d'information géographique, pour que les archéologues qui se servent de cet outil gardent en tête que les éléments qui y sont représentés disposent d'une certaine erreur non négligeable.

Des méthodes de calculs d'exactitudes ont été mises en place pour estimer ces valeurs.

Elles s'inspirent des cours de calculs d'erreurs suivis à l'INSA de Strasbourg et également de la littérature à ce sujet. Les logiciels ne communiquant pas les paramètres intermédiaires des calculs mais uniquement le résultat sous forme d'EMQ, les méthodes mises en place ne peuvent pas s'appuyer sur la transmission d'erreurs mais plutôt sur un procédé simplifié, utilisant les EMQ communiqués par les logiciels, préalablement vérifiés si possible.

e. Réduction de la taille des données :

Pour une meilleure intégration des données graphiques telles que les orthophotographies ou modèles numériques de terrain en trois dimensions, ainsi que pour bénéficier d'une meilleure fluidité au sein du SIG, il était nécessaire de réduire la taille de ces données. Pour les sites archéologiques 1, 3, 4 et 5, les orthophotos ont été réduites jusqu'à 97%, leur poids est alors compris entre 50 et 170 Mo. La résolution des images a été réduite, la taille des pixels sur l'objet passant de 1cm/pixel minimum à 10cm/pixel maximum, ce qui a pour conséquence une image moins détaillée. Les modèles 3D ont été réduits jusqu'à 85%, leur poids est dorénavant compris entre 250 et 340 Mo. Dans ce cas, c'est le nombre de facettes qui a été réduit, de 22 à 2.5 millions pour le site 4 par exemple. En réduisant le nombre de facettes, le modèle perd des détails, il y a une plus grande part d'interpolation, ce qui peut avoir pour conséquences de ne plus percevoir les points hauts/bas et certains reliefs du terrain.

3. Base de données.

a. Choix du système de gestion de base de données (SGBD) :

Les archéologues avaient pour souhait de pouvoir utiliser la base de données sur le terrain pour y saisir les enregistrements directement. Ainsi, il était nécessaire de mettre en place un outil simple à utiliser pour les fouilleurs et utilisable en local (sans connexion internet). Le logiciel de SIG avait été choisi assez rapidement, il fallait donc que le SGBD puisse être connecté à ArcGIS Pro.

La première piste explorée était PostgreSQL qui est un système largement utilisé, qui a fait ses preuves et dont les connecteurs à ArcGIS sont déjà intégrés dans le logiciel. Malheureusement, il n'est pas simple d'utilisation et aurait nécessité un informaticien en soutien pour maintenir l'outil et corriger les problèmes imprévus.

Par la suite, le choix s'est porté vers Heurist, qui est un outil OpenSource peu connu, disposant d'une structure MySQL. Un avantage de cette solution est que l'outil est directement en ligne, ce qui permettrait un accès par les différents intervenants internationaux de la mission. Malheureusement, l'organisation des tables et des enregistrements ne convenait pas aux archéologues, puisque l'utilisateur ne pouvait visualiser ni les relations entre les tables ni les enregistrements au sein des tables puisque ceux-ci sont simplement affichés à la suite les uns des autres.

Enfin, le choix final correspond au système de gestion de base de données de Microsoft : Access. C'est la solution qui se rapproche le plus du cahier des charges des archéologues quant à l'outil de saisie des données de terrain. Access a pu être connecté à ArcGIS Pro via une connexion OLE DB.

b. Gestion des données textuelles et graphiques :

Les données textuelles sont facilement intégrables et organisables dans la base de données, ce qui n'est pas le cas des données graphiques (images, emprises des chantiers de fouilles, plans, modèles 3D, etc). En effet, concernant ces éléments, il n'est pas possible de les intégrer directement dans la base de données qui n'est pas prévue pour, et qui s'alourdirait considérablement.

La solution est d'importer les données graphiques dans le SIG directement, puis de réaliser les jointures une par une vers l'enregistrement de la table qui correspond à l'image ou au modèle 3D.

4. Système d'Information Géographique / Archéologique.

Le SIG créé est un système d'information archéologique en trois dimensions, avec une base de données connectée. Il permet la visualisation et l'analyse des données, la navigation au sein des sites, chantiers et reconstitutions 3D des bâtiments.

Les tables et les relations permettront d'obtenir des informations sur les éléments que l'utilisateur sélectionne, et la recherche par attributs facilitera le questionnement du système. Une capture d'écran (figure 2) permet de voir un exemple d'affichage du SIG, avec le modèle numérique de terrain en trois dimensions du site principal et un exemple d'affichage des chantiers de fouilles datant de 1918 et 1919.

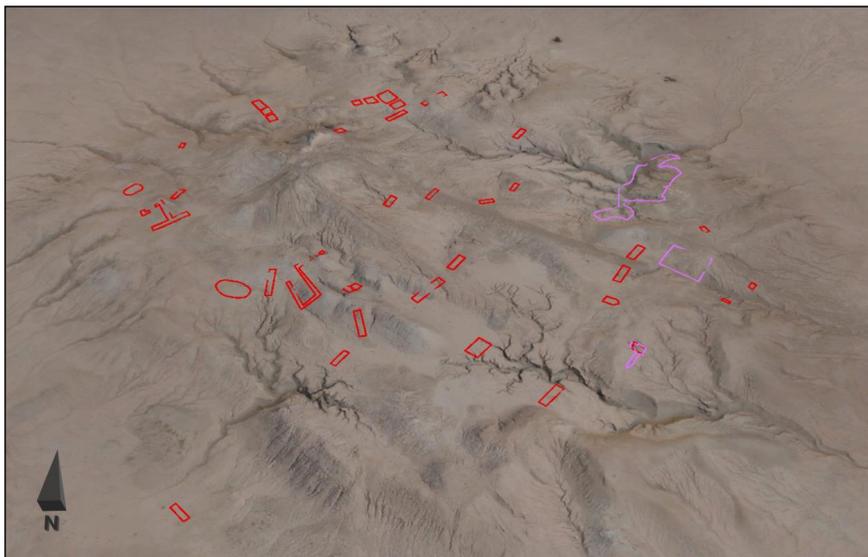


Figure 2 : Modèle numérique de terrain du site 1, chantiers de 1918 en rouge et 1919 en rose.

ArcGIS Pro permet l'intégration de données 3D au sein de l'outil et donne la possibilité à l'utilisateur de se déplacer autour d'un gyroscope pour se rapprocher des éléments ciblés très librement.

4. Conclusion et perspectives.

L'accomplissement de ce projet va permettre aux archéologues de tirer un maximum d'informations des campagnes de fouilles passées grâce à l'homogénéisation des données rassemblées sur un même outil. Les fonctionnalités du logiciel de SIG connecté à la base de données permettront d'effectuer des recherches ciblées et rapides pour trouver l'information nécessaire et les métadonnées associées.

De plus, la visualisation en trois dimensions du site avec les bâtiments reconstitués par Yasmine Idam serait facilement accessible au public.

Concernant la précision des données, c'est-à-dire la localisation des éléments dans le système géodésique, il sera difficile d'améliorer le degré d'incertitude quant aux objets provenant d'anciennes fouilles. En effet, les méthodes de géoréférencement ne pourront pas être améliorées considérablement puisque le potentiel d'information contenu dans ces documents a été puisé au maximum. En revanche, il serait pertinent pour les campagnes de fouilles suivantes de mettre en place un réseau de points de référence pérenne, mis en place avec une bonne précision (méthode GNSS du pivot et de l'antenne mobile par exemple).

Ce projet permet également la mise en place de l'outil d'enregistrement des données sur le terrain par les fouilleurs, puisque la base de données Access sera alimentée directement sur place, via des formulaires de saisie prévus à cet effet.

La prochaine campagne de fouilles devrait se dérouler au printemps 2022. Selon les données qui seront rapportées du terrain, un projet de recherche technologique pourrait éventuellement voir le jour pour qu'un étudiant topographe produise des nouveaux éléments à intégrer dans le SIG et la base de données.

Une autre ouverture possible concernant ce projet, serait la mise en ligne d'une partie des données pour proposer une visualisation au public, lorsqu'il sera question de publier ces informations. Il serait alors pertinent d'utiliser le SGBD Heurist en ligne et la plateforme Nakala développée par Huma-Num pour le stockage des éléments graphiques sur serveur sécurisé.

Création et mise en place d'un process qualité au sein d'un cabinet de géomètre-expert

PFE présenté par : **Aurélien SIMONET**
Société d'accueil : **Marie SIMLER et associés**
Directeur de PFE : **Marie SIMLER**
Correcteur : **M. Jacques LEDIG**



1. Contexte et objectifs de l'étude

L'évolution de la société actuelle est un fait et le domaine du géomètre-expert s'ancre dans ce processus. Son environnement ne cesse de se diversifier, avec des technologies de plus en plus innovantes et ergonomiques, permettant de répondre à des missions encore plus variées. Depuis plusieurs années, de nombreuses normes ont vu le jour afin d'améliorer la performance ou encore l'organisation d'une entreprise, notamment avec des documents permettant aux collaborateurs de suivre un procédé précis. Aristote disait : « La qualité n'est pas une action, c'est une habitude », ce qui démontre l'importance de la qualité, introduite depuis l'Antiquité.

La plupart des normes sont établies par l'organisation internationale de normalisation (ISO). La définition de la qualité donnée par le ministère de l'Economie et des Finances est : « la capacité à satisfaire les besoins des clients à travers son organisation et ses prestations ». Être certifié selon les normes ISO démontre donc l'investissement total du cabinet dans une démarche qualité dans le but de satisfaire ses clients, et renforce sa crédibilité auprès de ces derniers.

Fort de son expérience, la société Marie SIMLER et associés, dans laquelle j'ai effectué mon Projet de Fin d'Etudes, cherche continuellement à s'améliorer et à innover. La satisfaction client et la qualité des prestations sont des valeurs importantes pour le cabinet. L'organisation et la mise en place d'un process qualité permettra à l'avenir de répondre à ces attentes. La démarche qualité est une suite logique pour le cabinet de géomètres-experts Marie SIMLER pour répondre aux attentes de ses clients et en vue d'une potentielle certification ISO 9001. Cette norme, bien connue du grand public, représente un gage de confiance pour les clients.

Cette étude consiste donc à créer et mettre en place un process qualité au sein du logiciel de gestion Moduleo, utilisé par le cabinet depuis 2018, permettant de répondre à une satisfaction client toujours plus accentuée, d'améliorer la qualité des prestations et également augmenter la rentabilité de l'entreprise.

2. Intérêt d'une telle démarche pour la profession de géomètre-expert

La profession de géomètre-expert est très encadrée ; en effet tous les professionnels doivent être inscrits à l'Ordre des Géomètres-Experts (OGE), fondé le 7 mai 1946. De nombreuses missions lui sont confiées, telles que l'établissement du règlement intérieur et des codes des devoirs de la profession, assurer le respect de ses lois ou encore surveiller l'activité des professionnels.

L'accès à la profession doit être justifié par des compétences juridiques, analytiques et techniques. Les principales demandes sont les travaux fonciers et topographiques mais ces demandes ne cessent d'évoluer, avec des missions de plus en plus variées qui s'éloignent de sa formation initiale. Les cabinets de géomètres-experts peuvent ainsi se diversifier vers de nouveaux marchés. Cela entraîne une gestion plus complexe avec le recrutement et la formation de nouveaux collaborateurs sur ces méthodes. La structuration de procédures qualités adéquates est la clé pour disposer d'un cabinet à la fois polyvalent et spécialiste.

L'objectif primaire d'une démarche qualité est d'améliorer le fonctionnement et le savoir-faire de la structure, en prenant en compte deux points de vue : les attentes clients et l'amélioration des conditions de travail des collaborateurs. Selon une étude menée par l'ISO (GASIOROWSKI-DENIS, 2014), les entreprises qui considèrent une normalisation de la qualité ont des répercussions positives, représentant entre 0.15 et 5% du chiffre d'affaires annuel. Dans son document, l'auteur cite les principaux avantages de la mise en place de process qualité, comme le gain de temps sur la préparation, l'interprétation des plans ou encore l'économie résultant du traitement des données.

Pour encore renforcer la valeur de la qualité au sein d'un cabinet de géomètre-expert, l'Ordre des Géomètres-Experts s'implique directement dans ces objectifs, qui se doivent d'être de plus en plus large. Depuis plusieurs années, l'ordre établit des visions stratégiques sur des intervalles de 2 ans. La vision 2017-2019 présente les objectifs généraux et les sept valeurs autour de l'éthique professionnelle.

DES VALEURS

LES 7 VALEURS DE L'ORDRE S'ARTICULENT AUTOUR DE L'ÉTHIQUE PROFESSIONNELLE

ÉQUITÉ	Savoir être juste en prenant en compte les droits de chacun
TRANSPARENCE	Partager l'information et la connaissance
HUMANISME	Mettre l'Homme au centre de ses actions
INDÉPENDANCE	Liberté de faire en conscience et sans pression extérieure
QUALITÉ	Garantir un haut niveau de prestation répondant aux besoins des parties prenantes
UNITÉ	Garantir la cohésion de la profession
EXCELLENCE	S'inscrire dans un processus d'amélioration continue

Figure 1 : Définition des sept valeurs exprimées par le conseil supérieur de l'OGE (Vision 2017-2019, OGE)

La figure 1 indique les valeurs de la profession, parmi lesquelles nous pouvons distinguer la valeur de la **Qualité** définie par la garantie d'un niveau de prestations élevées permettant de répondre aux besoins des parties intéressées. La valeur de l'**Excellence**, traduit par un processus d'amélioration continue, intègre également notre sujet d'étude.

3. Etude de la norme ISO 9001

L'ISO est une organisation indépendante qui établit et publie des normes internationales. Plus de 23 000 normes ont été créées dans de nombreux domaines.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à la famille ISO 9000 régissant le management de la qualité. Elles regroupent plusieurs normes qui permettent aux entreprises d'être agréées en termes de qualité des services fournis aux clients. La norme ISO 9001:2015 est la seule qui permette d'être certifiée ; c'est également la norme la plus utilisée dans le monde. Son but est d'aider les entreprises à gagner en efficacité et d'accroître la satisfaction client.

Le Système de Management de la Qualité (SMQ) qu'est l'ISO 9001 est structuré en fonction de deux applications : les sept principes étiquetés par la norme et le cycle de la Roue de Deming PDCA. Les sept principes articulés sont : l'Orientation client, le Leadership, l'Implication du personnel, l'Approche processus, l'Amélioration, la Prise de décision et le Management. Ces principes définis selon l'ISO sont la clé pour aboutir à une certification qualité.

Comme l'indique l'ouvrage de GIESEN (2013), la seconde application est la Roue de Deming. La norme ISO 9001 repose sur le fonctionnement de cette roue, divisée en quatre étapes, entraînée par l'amélioration continue et soutenue par le Système de Management de la Qualité comme présentée sur la figure 2.

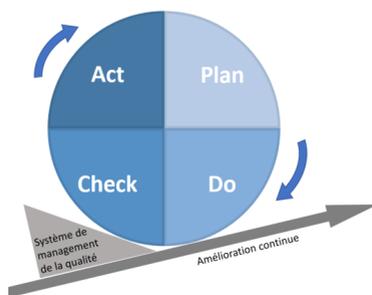


Figure 2 : Roue de Deming PDCA

Le cycle PDCA signifie Plan – Do – Check – Act :

- Plan pour Planifier : fixer les objectifs et définir l'organisation
- Do pour Exécuter : réaliser les activités prévues (à l'aide des procédures qualités)
- Check pour Contrôler : mesurer la satisfaction client, apprécier l'atteinte des objectifs et évaluer la qualité des prestations fournies
- Act pour Améliorer : capacité de décider et d'entreprendre des actions d'améliorations si les résultats ne sont pas satisfaisants et d'analyser les chiffres

A chaque étape, la roue évolue d'un quart de tour, représentant le progrès. Le système de management de la qualité est présent dans le but de maintenir cette progression, sans régression possible. La roue de Deming est donc basée sur l'amélioration perpétuelle, pilier de la certification ISO 9001, et permet de renforcer les exigences de celle-ci.

4. Gain d'une mise en place d'un process qualité au sein de la société

La vision du cabinet est de réaliser des travaux en prenant en compte un cahier des charges tout en assurant le respect des règles de l'art de la profession. Ses intérêts sont de conseiller, de valoriser les biens et de garantir un travail de qualité. Marie SIMLER, géomètre-expert, est très attentive au compte-rendu du chantier ou encore aux plans finis, toujours dans le but de s'inscrire dans cette démarche qualité où la satisfaction client prime.

Un des objectifs d'une procédure qualité sera de ménager le travail du géomètre-expert quant à la vérification des plans. En effet, les éléments à figurer seront exposés dans ces procédures, les présentations des plans seront modernisées et adaptées en fonction du type d'intervention. Ce travail procédural est d'autant plus intéressant quand une nouvelle recrue intègre la société. Effectivement, son adaptation sera facilitée à travers ces procédures et son travail sera guidé qualitativement. Cette mise en place permettra une autonomie plus rapide et un gain en rentabilité pour la société.

Pour une telle mise en place de cette démarche, la transmission du savoir-faire est indispensable, guidée par les procédures qualités. Comme l'indique le guide proposé par l'Observatoire de la Métallurgie (2018), trois acteurs interviennent dans la transmission du savoir. Le dirigeant, ici le géomètre expert, qui définit et pilote le projet. Le sachant qui est la personne qui possède le savoir-faire à transmettre, c'est le rôle qui m'est attribué pour ce projet. Et enfin, les apprenants, dans notre situation les techniciens et le secrétariat, qui sont ceux qui vont profiter du savoir-faire du sachant.

Les procédures permettent de réduire les erreurs humaines et les divers manquements et solidifient l'organisation du cabinet. La figure 3 (OBSERVATOIRE DE LA METALLURGIE, 2018) représente les risques engagés par le cabinet en cas de non-transmission du savoir, défini comme l'absence de procédures.

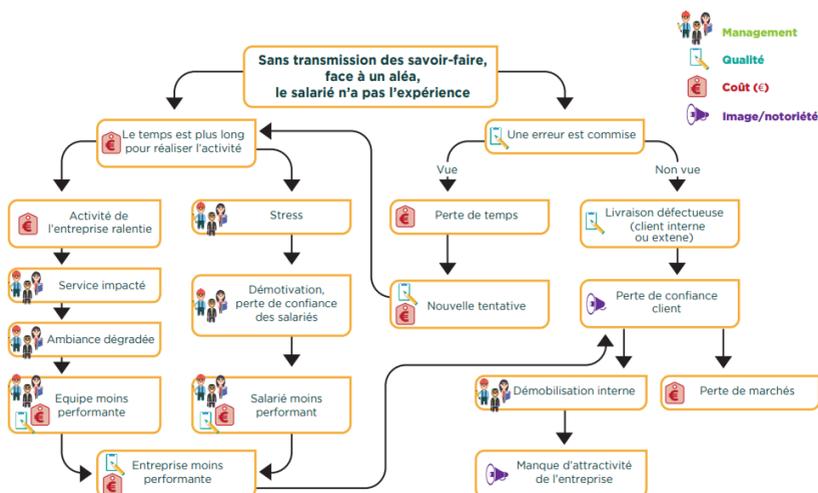


Figure 3 : Guide méthodologique : Transmission des savoirs et savoirs faire (Observatoire de la Métallurgie, 2018)

En effet, lors de l'absence de procédures, les pertes peuvent être ressenties sur quatre points : la qualité du travail, le coût (et donc la rentabilité), le management d'équipe et/ou l'image de la société comme le résume la figure 3.

Lorsqu'aucune procédure qualité n'est mise en place, les premiers impacts sont soit la présence d'une erreur sur le livrable, soit une perte de temps pour le réaliser. À la suite de cela, les impacts sont plus ou moins importants en fonction de l'erreur ou encore si celle-ci a été détectée avant le rendu final. Les conséquences peuvent être importantes et aller jusqu'à la perte de confiance client et donc la perte de certains marchés.

En outre, avec la mise en place de process qualité, les bénéfices désirés seront premièrement la sauvegarde et le support des méthodes (savoirs et savoir-faire) ; deuxièmement la performance de l'équipe, grâce à un apprentissage et une transmission beaucoup plus rapide pour un collaborateur nouveau ; dernièrement, un développement continu des compétences. Tous ces bénéfices auront à terme une augmentation de la rentabilité (cabinet plus performant).

5. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de mettre en place des procédures qualités sur l'ensemble des opérations du domaine du géomètre-expert, tels les travaux fonciers, levés topographiques, copropriété ou encore documents d'urbanisme. Une modernisation des gabarits de plan AutoCAD a également été effectuée. L'aboutissement de cette étude a généré un réel bénéfice sur le court terme sur laquelle elle a pu être testée et analysée.

L'objectif futur de la société sera de faire des démarches en vue d'une certification ISO 9001 et le maintien à jour de ces procédures et l'évolution de celles-ci.

6. Bibliographie

- ORDRE DES GEOMETRES-EXPERTS, 2017. Vision stratégique 2017 – 2019. *Présentation*, 20 pages.
 OBSERVATOIRE DE LA METALLURGIE, 2018. Guide méthodologique : Transmission des savoirs et savoir-faire, *Présentation*, 90pages
 GASIOROWSKI-DENIS, E. 2014. Combien rapportent les normes ? *Article de presse*, iso.org.
 GIESEN, E. 2013. Démarche qualité et norme ISO 9001 : Une culture managériale appliquée à la recherche. IRD Edition, Collection Actiques, 149 pages.

Adaptation d'un système de monitoring ; analyses techniques et économiques d'électro-nivelles pour le contrôle de voies ferrées

PFE présenté par : **Alexandre Calay**
Société d'accueil : **MAP Géomatique SA**
Directeur de PFE : **M. Fabrice Marullaz**
Correcteur : **M. Gilbert Ferhat**
Encadrant : **M. Nicolas Peter**



1. Présentation de l'étude

Contexte

L'essor démographique mondial représente beaucoup d'enjeux. Parmi ceux-ci la problématique de permettre à chacun de posséder une habitation et de fournir des solutions de mobilité. Ainsi, les états tentent d'accompagner cette explosion démographique par la construction d'infrastructures et de voies ferrées et routières. En Suisse, ce phénomène est contraint par une pression immobilière déjà forte en ville et une topographie très irrégulière en campagne (grands lacs, montagnes). De ce fait, de nombreuses constructions sont implantées au sein de quartiers résidentiels, augmentant considérablement les risques humains, économiques, culturels et financiers d'un accident. Ainsi, la demande de surveillance de déformations du bâti existant, des infrastructures et des ouvrages d'art est importante. Dans ce contexte, MAP Géomatique intervient depuis plus de 20 ans sur des mandats de surveillance automatique d'ouvrages.

Objectifs

Ce PFE s'inscrit dans la démarche de développement du pôle monitoring du bureau et traite de deux problématiques distinctes, bien que liées. La première facette de l'étude vise à adapter un logiciel de monitoring aux contraintes de MAP Géomatique. En effet, le logiciel utilisé par le bureau jusqu'à maintenant n'est supporté que par Windows XP. Or, suite à l'abandon du système d'exploitation par Microsoft en 2014, il est envisageable que Windows XP et plus particulièrement les logiciels annexes (contrôle à distance, envoi FTP, etc.) ne soient plus utilisables d'un jour à l'autre. MAP Géomatique a décidé d'anticiper ce risque en acquérant un nouveau logiciel de monitoring. Cependant, aucune application présente sur le marché n'est capable de répondre aux besoins précis du bureau. C'est pourquoi ce projet a pour but de développer une solution convenant parfaitement aux processus, attentes et demandes de MAP Géomatique sur la base d'un logiciel Open Source existant.

La seconde facette du projet vise quant à elle à optimiser certaines surveillances. Actuellement, MAP Géomatique intervient sur des surveillances de gauchissements de voies ferrées. Mais le matériel utilisé (station totale + prismes) montre certaines limites : nettoyage régulier des prismes à cause de la poussière de freins, flamboiement de l'air près des rails, impossibilité de mesurer lors du passage d'un train, etc. Le bureau veut donc se tourner vers des méthodes moins contraignantes grâce à des électro-nivelles. Une étude approfondie du marché des électro-nivelles sera donc menée dans le but de conseiller l'achat d'un produit par la direction. Cette recherche débouchera donc sur une solution capable de résister aux difficultés du terrain, d'endurer une utilisation régulière voire intensive, de proposer une robustesse aux problèmes souvent rencontrés et de proposer une plus-value importante par rapport à l'utilisation d'une station totale et de prismes.

2. Travaux antérieurs

A la vue des besoins du bureau en matière de surveillance automatique et des solutions disponibles sur le marché, MAP Géomatique a décidé de se tourner vers un logiciel atypique : OpenADMS¹. Cette solution est développée par l'université de Neubrandenburg dans le cadre du projet DABAMOS, sous la direction de Monsieur Philipp Engel. Cet applicatif, bien que toujours en développement, représente

¹ Automatic Deformation Monitoring System, système de surveillance automatique de déformations

une solution OpenSource de pilotage d'appareils, d'acquisition des données, de stockage et de visualisation de celles-ci. OpenADMS se décline en trois entités : OpenADMS Node, OpenADMS Server et OpenADMS UI². OpenADMS Node a pour but de configurer les projets, piloter automatiquement les appareils géotechniques ou de topographie, intégrer les données retournées par l'appareil, les analyser sommairement pour enfin les envoyer à un serveur distant. OpenADMS Server est originellement prévu pour gérer le stockage de ces données et leur accès par OpenADMS UI qui, quant à lui, permet au gestionnaire du projet, ainsi qu'au client de visualiser et de traiter les données, à travers une gestion des droits notamment.

Grâce à la licence OpenSource commerciale d'OpenADMS, MAP Géomatique a téléchargé les codes sources afin de développer MAPADMS. Les développements sur les applicatifs OpenADMS Server (devenu Serveur Visuweb) et OpenADMS UI (devenu Visuweb) ont été réalisés en amont de ce PFE. Il convient de citer la création de Visuweb, la plateforme de visualisation et traitement de la donnée. L'hébergement de cette plateforme au sein du bureau (grâce au Serveur Visuweb) permet un contrôle total des données et donc une sécurité accrue. Visuweb permet notamment de consulter les mesures et les logs, créer et gérer des graphiques, des alarmes et des vues, mettre en place des filtres, des calculs automatiques. Il est en outre possible pour le gestionnaire de générer des rapports, connaître la « santé » du serveur et créer et/ou configurer des projets. Après une prise en main poussée de la plateforme et quelques tests, des bugs sont apparus. L'objet de ce PFE est, dans une moindre mesure, de corriger ces bugs.

3. Equipement matériel

Afin de pouvoir commencer les développements, l'achat des composants matériels permettant l'échange des données de l'appareil au PC, le branchement de tous les composants entre eux, l'envoi des données à un serveur distant et l'alimentation de l'ensemble a été réalisé. Pour ce faire, une étude approfondie a été menée, tout en gardant pour contrainte la réutilisation du matériel possédé par MAP

Géomatique. Les principaux paramètres retenus sont résumés via le tableau 1. Ainsi, il en est ressorti par exemple l'utilisation d'un PC monocrarte, d'un transformateur 12V, d'un capteur de température/pression et d'un modem 4G. Dans un premier temps, tous les éléments ont été branchés entre eux par simple vissage, à l'aide de connexion adéquates. La mise en marche de MAPADMS pour le contrôle d'une station totale, du capteur météo et de l'envoi des données a conduit à une implantation définitive des composants au sein d'un boîtier ainsi qu'à une robustification des entités fragiles : soudure des connexions, utilisation de gaines thermo-rétractables étanches, étanchéification des ouvertures du boîtier. Ces étapes successives permettent aujourd'hui le déploiement de la solution, peu importe la localisation de la surveillance.

Dimension	Paramètres à considérer
Matérielle	Section des fils électriques Dimensions de chaque composant Intégration dans un boîtier Étanchéité de l'ensemble
Electrique	Alimentation des composants selon la tension nécessaire Acheminement de l'énergie Mise à terre
Electronique	Nombre de torons selon le protocole d'échange de données Connecteurs informatiques

Tableau 1 : Exemples de contraintes à respecter pour le choix du matériel

4. Développements

Purement nécessaires à une télésurveillance

Au fil des améliorations matérielles apportées, les optimisations informatiques se sont concrétisées. Après la prise de connaissance très approfondie de la littérature et des notices traitant d'OpenADMS, une configuration la plus proche des besoins de MAP Géomatique a été effectuée. Néanmoins, le logiciel présente dans sa version la plus récente présente quelques défauts qui ont été minimisés voire supprimés durant ce stage.

Il a tout d'abord été question d'installer la distribution Linux la plus à même de convenir. En effet, après quelques tests, il en est ressorti que la solution était plus robuste sous Linux que sous Windows. De plus, les développements futurs n'allaient en être que simplifiés. Le système d'exploitation choisi a été Raspbian, car parfaitement adapté au PC monocrarte et ayant Python3.6 pré-installé.

² User Interface, interface utilisateur

Il a ensuite été question de l'installation et la mise en place d'un système de contrôle à distance. Pour cela, un logiciel VNC³ été installé, permettant de contrôler un PC Linux sur un serveur distant à partir d'un PC Windows ou d'un smartphone Android.

Puis, une routine en langage Shell d'envoi des données acquises a été écrite. Cette routine utilise le protocole FTP⁴, adéquat pour l'envoi de données CSV⁵. Dans les faits, les développements auparavant réalisés par MAP Géomatique ont été optimisés pour un envoi FTP. Cependant, OpenADMS ne considérait pas ce protocole. Cette routine est liée à un planificateur automatique afin d'être lancée toutes les cinq minutes. Les données sont alors envoyées sur le serveur Visuweb, dans un dossier dont le chemin d'accès contient automatiquement le numéro du mandat et le nom du PC qui a envoyé les données. Ces données transitent donc d'un répertoire « salle d'attente » au répertoire cible du serveur. De plus, une copie en local est réalisée sur une autre partition du disque système à chaque envoi réussi des données sur le serveur.

Il a également été nécessaire d'ajouter des modules à MAPADMS, notamment pour intégrer les capteurs météorologiques, non programmés par l'équipe de Philipp Engel. Aussi, la fonction de double retournement a été repensée. A l'origine, les mesures ne se faisaient pas en série, c'est-à-dire que pour chaque prisme, la position 1 était levée, puis la position 2. Cependant, cela n'économise pas les moteurs. Actuellement, le système est capable de lever les prismes en position 1 par un tour d'horizon, puis en position 2. De plus, cette méthode peut se faire indépendamment sur les références ou sur les points à contrôler, ce qui n'était pas possible au début.

Le module de détermination des coordonnées de la station a aussi été optimisé puisque le logiciel ne détectait pas des mesures aberrantes sur les références de manière autonome. Le repérage spatial de la station se fait par recalage Helmert, associé à une translation verticale. Actuellement, le logiciel ne réalise l'Helmert que si trois références sont effectivement mesurées et si les résidus des coordonnées de la station sont inférieurs à un certain seuil (1 mm par défaut).

Améliorant l'expérience utilisateur

Une étape primordiale a été de mettre en place une méthode simple de configuration de projet. En effet, la configuration d'un nouveau projet de monitoring se fait par langage JSON⁶. Or, l'utilisation de lignes de code n'est pas adaptée à tous les collaborateurs et à un paramétrage sur le terrain. La solution a donc été de créer une routine Shell. Cette routine a pour objet d'être lancée pour configurer un nouveau projet. De manière implicite, elle crée une arborescence de dossiers de gestion du nouveau projet, selon les paramètres de l'utilisateur, puis ouvre un tableur formaté dans lequel le collaborateur n'a plus qu'à remplir naturellement les cases. Après enregistrement et fermeture du tableur par l'utilisateur, la routine exporte ce document en fichier CSV, qui est ensuite lu par un script Python afin d'en extraire les saisies de l'utilisateur. Ce script Python écrit automatiquement la configuration du projet en format JSON. Une fois le script Python terminé (et donc la configuration écrite), la routine Shell reprend le travail et démarre le monitoring par ligne de commande. Cette démarche informatique est présentée graphiquement en figure 1. De la même manière, cette routine a par la suite été améliorée par une seconde, dont le but est de modifier très facilement un ou plusieurs paramètre(s) du projet.



Enfin, d'autres routines Shell ont été écrites afin de lancer et arrêter le programme de monitoring. En plus de décharger l'utilisateur de la contrainte des lignes de commande, ces routines permettent de stopper la télésurveillance après avoir orienté l'objectif de la station totale vers le bas, le protégeant ainsi des intempéries.

Parallèlement à tout cela, des améliorations mineures ont été apportées : débogage de la plateforme web de visualisation des données Visuweb, correction d'erreurs du code source issu d'OpenADMS, création et gestion des fichiers logs, optimisation des méthodes, utilisation d'alias et de liens symboliques ... ainsi que des processus de sauvegarde des développements : versionnage sur un Git⁷ interne au bureau et copie automatique du disque système sur des stockages amovibles.

³ Virtual Network Computing, informatique virtuel en réseau, permet le contrôle à distance

⁴ File Transfer Protocol, protocole de transfert de fichiers

⁵ Comma-Separated Values, données avec séparateur

⁶ JavaScript Object Notation

⁷ Système de contrôle de versions facilitant la sauvegarde et la gestion des développements

5. Recherches sur les électro-nivelles

A partir de la prise de connaissance du marché des instruments de mesure de pente (tiltmètres, inclinomètres) et des normes particulières imposées par les CFF (Chemins de Fer Fédéraux) notamment, il a été possible de dresser une liste de critères qui permettront de mettre en lumière les instruments qui intéresseront la direction. Ces critères sont résumés dans le tableau 2.

Enjeu	Critère
Données techniques	Plage de mesure
	Résolution des données mesurées
	Précision des données mesurées
	Exactitude des données mesurées
	Paramètres d'alimentation (mode, tension)
	Températures de fonctionnement
	Présence d'un capteur de température (et son exactitude)
	Systématisation de la mesure provoqué par la température
	Temps de mesure
	Dérive de la mesure en fonction de la vie de l'instrument
Intégration à MAPADMS	Technologie employée
	Possibilité de générer des mesures sur demande (capteur esclave)
	Interface (protocole d'échange de données et branchement à l'ordinateur maître)
	Nombre maximal d'instruments à connecter à l'ordinateur maître
	Portée maximale de l'instrument à l'ordinateur maître
Type de branchement entre chaque instrument	

Tableau 2 : Critères de sélection des nivelles

A cela s'ajoutent d'autres contraintes absolues telles que les dimensions de l'objet ou la technologie de partage de données utilisée. Le but étant de le fixer aux traverses d'une voie ferrée, il est primordial que l'instrument ne soit ni impacté par les vibrations engendrées par le passage d'un train, ni par le champ magnétique généré par le courant électrique très haute tension circulant dans la ligne caténaire. Finalement, la première sélection d'un petit ensemble d'instruments, dont les caractéristiques techniques conviennent aux besoins du bureau et des CFF, a permis de continuer les démarches de conseil pour la direction. En effet, des contacts ont été entrepris auprès des fournisseurs afin d'obtenir des devis sur l'achat de capteurs.

6. Conclusion et perspectives



Figure 2 : déploiement du système informatique MAPADMS et du matériel nécessaire pour un chantier réel de surveillance automatique de tunnel

Au cours du mois d'avril, les développements et améliorations ont permis de déployer le système MAPADMS sur un chantier réel. Il s'agissait d'effectuer des mesures de convergence d'un tunnel. Bien que le système était encore en phase de développement, il était toutefois fonctionnel et a pu être expérimenté en conditions réelles (voir figure 2).

Aujourd'hui, le système est opérationnel et robuste aux incidents fréquents d'une télésurveillance (prismes non visibles, bug informatique, objectif masqué, etc) et peut être utilisé sur un nouveau chantier. MAP Géomatique a pu, de cette manière, résoudre les contraintes importantes de son ancien logiciel : temps de configuration trop élevé, prise en main difficile, données stockées chez le fournisseur de la solution.

Malgré tout, des améliorations sont encore à prévoir. Il est par exemple planifié de construire une interface graphique permettant de simplifier l'expérience utilisateur et permettre à chaque collaborateur d'intervenir. La possibilité de calculer les erreurs de collimation sur un seul point, à fréquence régulière afin de compenser les mesures permettra de réduire le temps de levé de la télésurveillance, et donc d'augmenter la fréquence pour des situations très sensibles.

Enfin, les recherches réalisées à propos des instruments de mesure de pente pour la surveillance de chemins de fer a permis de choisir un panel de solutions adéquates à la direction. Cette pré-sélection argumentée a permis l'achat de matériels afin d'obtenir de nouveaux mandats. Ce matériel doit maintenant être intégré à MAPADMS afin de fonctionner en autonomie.

Mise en place d'un système qualité encadrant l'ensemble des méthodes de levés 3D de la démarche commerciale jusqu'au produit fini

PFE présenté par : **Joseph LALOUX**
Société d'accueil : **TPLM-3D**
Directeur de PFE : **M. David DESBUISSON**
Correcteurs : **M. Jacques LEDIG**
M. Gilbert FERHAT



1. Contexte et objectifs de l'étude

Durant ses 17 ans d'activité dans le domaine du relevé 3D et de l'exploitation de données tridimensionnelles, TPLM-3D s'est progressivement doté d'un système qualité encadrant l'ensemble de ses opérations. Cependant, les évolutions numériques et technologiques importantes des dernières années (ex : consolidation sur le terrain, scanner à main, drone...) ont fait naître beaucoup de nouveaux usages qui sont encore mal structurés au sein de l'entreprise, à la fois commercialement, techniquement et d'un point de vue qualité (ex : procédure et fiche de contrôle).

Désireux de réorganiser et d'optimiser ses procédures, TPLM-3D souhaite aujourd'hui revoir globalement son système qualité. Le PRT lancé au mois d'octobre 2020 est la première étape de cette remise à plat : il permet de classer les différentes méthodes de lever 3D en fonction des contextes de relevés et ainsi aider dans l'élaboration de l'offre commerciale.

Le travail demandé étant très dense, il a été convenu de diviser le sujet en deux domaines. Hamza BOUCH, étudiant en dernière année à l'ESGT, se chargera d'étudier les techniques de photogrammétrie et de scanner laser aéroporté. De mon côté, je développerai mes recherches sur les méthodes de lasergrammétrie terrestre. La partie restructuration du système qualité actuel sera effectué en duo de façon à étudier le champ des possibles concernant les outils à utiliser.

Ce projet de fin d'étude repose sur trois objectifs distincts :

- La **rédaction d'une documentation** nécessaire au bon usage des appareils (ex : modes d'emploi) et au bon suivi **des méthodes** (ex : fiches de contrôles et modes opératoires d'acquisition et de traitement) **lasergrammétriques terrestres de chez TPLM-3D**. Les documents rédigés à ce sujet permettront aux membres de l'entreprise d'avoir un fil conducteur à respecter sur les chantiers faisant appel à ce type de technologie, qui met en avant la qualité et l'optimisation du temps.
- L'**implémentation du système d'aide à la décision**, réalisé pendant le PRT, permettant l'élaboration de l'offre commerciale.
- La **mise en place de la nouvelle structure générale du système qualité de TPLM-3D**. Ce travail s'articulera en quatre grandes parties présentées dans la figure n°1. Pour y arriver, on s'intéressera aux outils numériques existants de façon à gagner en efficacité et en productivité sur certaines tâches d'un lever 3D.



Figure 1 : Étapes clés du système qualité à mettre en place pour ce PFE

2. Étude des méthodes lasergrammétrique terrestres de chez TPLM-3D

Pour les deux méthodes présentées ci-dessous, il a fallu rédiger les trois documents suivants :

- Un **mode d'emploi**, qui présente l'utilisation et le rangement de l'appareil en question ainsi que l'éventuelle mise à jour du *software* associé à cet instrument.
- Un **mode opératoire**, qui décrit une suite d'étapes à effectuer pour mener à bien une opération définie (ex : phase d'acquisition et de traitement des données).
- Une **fiche de contrôle**, qui permet de lister les différentes étapes à effectuer pour mener à bien un projet et pour contrôler les tâches. Elle permet le bon suivi d'un dossier.

Pour y arriver, il a été indispensable de s'appropriier ces méthodes au travers de formations internes. En mettant en pratique ces acquis sur des chantiers et en profitant des retours d'expérience des membres de l'entreprise, il a été possible de tirer les résultats et les conclusions qui serviront à l'élaboration de ces documents.



2.1 Scanner dynamique : BLK2GO

L'entreprise a récemment fait l'acquisition d'un scanner à main, le BLK2GO. Cet appareil, très maniable, permet d'atteindre des zones parfois difficiles d'accès pour les scanners laser statiques. Néanmoins, du fait de sa précision relative élevée (1.5 cm) et de la présence de dérives dans le nuage de points obtenu, il est souvent utilisé pour compléter les levés effectués avec les scanners laser statiques.

Figure 2 : BLK2GO

Les chantiers faisant appel au BLK2GO ont été mis à profit pour effectuer une série d'expériences avec le BLK2GO : la précision relative, l'analyse de la vitesse de déplacement, le champ de vision de l'appareil, le nombre de « *walks* » (parcours effectué durant le lancement d'une numérisation 3D au BLK2GO) réalisés en moyen sur une journée de terrain ainsi que l'usage d'un filtre sur le nuage de points. Les résultats obtenus sur ces tests permettront d'appuyer les éléments présents dans le mode opératoire. Le but de ce document est d'optimiser le temps de travail de l'opérateur et de limiter au maximum les problèmes qui surviennent avec le scanner dynamique (ex : dérive du nuage de points).

2.2 Méthode de pré-consolidation : Z+F IMAGER 5010X & 5016

La méthode de pré-consolidation se base sur le même principe que la méthode statique du scanner laser terrestre (TLS). La différence est que l'appareil est directement lié à une tablette ou à un ordinateur portable via un réseau wifi. L'opérateur a la possibilité de piloter l'appareil à distance, de collecter, de visualiser en temps réel et de gérer l'acquisition des données par un assemblage rapide des nuages de points (voir figure n°3). Cette méthode augmente la rentabilité du chantier en offrant un gain de productivité et d'efficacité non-négligeable à son utilisateur. Ce gain est d'autant plus sensible que le projet est de taille conséquente (ex : lever de la cathédrale de Sens durant le PFE).

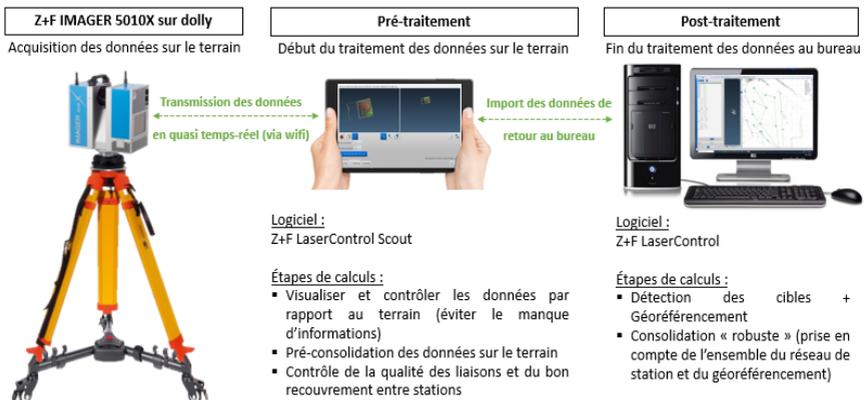


Figure 3 : Principe de la méthode de pré-consolidation

Instauré il y a un an, au sein du process de l'entreprise, TPLM-3D dispose de deux scanners laser ainsi que les licences associées pour appliquer cette méthode. Toutefois, quelques problèmes persistent lors de l'acquisition ou durant le traitement. Mon rôle est donc de comprendre leur cause et de fournir une documentation optimisant la chaîne de traitement.

3. Implémentation du système d'aide à la décision

Lors de l'élaboration de l'offre commerciale, il devient fondamental de ne pas se tromper sur le choix du mode opératoire, car les temps d'acquisition et de traitement sont très différents d'une méthode à l'autre. Or, la décision à prendre n'est pas toujours évidente puisque de nombreux critères sont à prendre en compte. L'outil mis en place durant le PRT intervient entre la phase d'analyse du cahier des charges et celle de l'élaboration du devis. Après avoir renseigné certains éléments caractéristiques au projet, le système d'aide à la décision (acronyme SAD) propose un classement des méthodes d'acquisitions 3D (sous forme de score) en fonction du caractère plus ou moins optimal de leur utilisation dans le cadre du chantier. Lors de sa création, ce fichier Excel se reposait exclusivement sur des retours d'expériences. Ne disposant d'aucun moyen de contrôle concret, il était encore trop tôt pour s'assurer de son bon fonctionnement et de la pertinence des résultats fournis.

Durant le PFE, nous avons pu vérifier le fonctionnement du SAD en multipliant son utilisation lors de la réalisation de devis. En fonction des retours d'expériences, positifs comme négatifs, nous pourrions en tirer les conclusions qui s'imposent. Nous avons donc entrepris de tester le fichier Excel par rapport à sept cas de figure offerts par les chantiers et les offres réalisés par TPLM-3D. L'étude que nous comptons mener consiste à comparer le choix des méthodes fournies par le SAD avec celles sélectionnées par le responsable commercial.

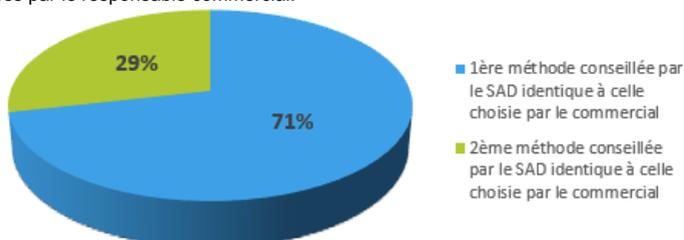


Figure 4 : Comparaison entre les méthodes fournies par le SAD et celle choisies par le commercial, selon une classification de sept méthodes sur un échantillon de sept chantiers

Sur les sept cas de figure, cinq ont fourni une méthode identique à celle que le commercial souhaitait mettre en application sur le chantier. Concernant les deux derniers tests, la méthode appliquée par le commercial se trouvait en deuxième position dans la classification générée par le SAD. Bien que certains ajustements fussent apportés au fichier Excel, il ressort de cette étude que l'outil ne sera jamais 100% opérationnel. En effet, cet outil ne peut pas prévoir tous les cas de figure. C'est pourquoi son utilisateur devra toujours être vigilant face aux résultats fournis. De nouveaux tests devraient s'ajouter à cette étude d'ici la fin du PFE de manière à disposer d'un échantillon plus représentatif sur les résultats fournis.

4. Mise en place de la structure du nouveau système qualité de l'entreprise

4.1 Détermination des attentes

Cette restructuration va apporter de nombreux changements concernant la manière dont travaillent les membres de l'entreprise. Or, le risque dans ce type de projet, est de créer un système avec beaucoup de promesses, mais qui, par la lourdeur des étapes et la densité d'informations, ne prend pas en considération les besoins et les recommandations du personnel. Pour que ce système qualité soit opérationnel et durable, il doit être adapté, approuvé et utilisé par les principaux concernés, à savoir les salariés de TPLM-3D. Avec Hamza, nous avons donc rédigé un questionnaire envoyé à chacun d'entre eux de façon à nous rendre compte des éléments sur lesquels une remise en question et/ou d'éventuels changements doivent être apportés au système qualité actuel.

4.2 Espace cloud choisi

Après plusieurs recherches concernant l'espace cloud le plus adapté pour mettre en place la structure générale du nouveau système qualité, il a été décidé de partir sur l'outil SharePoint de la suite Office 365. Concernant la sécurité des données, le document restera stocké dans un serveur Microsoft. Il ne part donc pas sur un serveur Google où la politique de confidentialité pose un problème quant à la divulgation des données (ex : droit de transmettre nos données aux autorités américaines si un mandat est délivré, droit d'utiliser nos contenus privés pour améliorer les services Google).

4.3 Approche mise en place

Le site SharePoint créé pour l'entreprise TPLM-3D se divise en 3 grandes bibliothèques :

Nom de la bibliothèque	Contenu	Utilisation de la bibliothèque
00_Source	Dernière version des documents QSSERP ¹ au format Word	- Ajouter de nouveaux documents dans le site QSSERP - Remettre à jour le contenu des documents existants
01_Diffusion	Dernière version des documents présents dans la bibliothèque « 00_Source » au format PDF (PDF non interactif ou formulaire)	- Consultation des documents par les salariés - Création des QR Codes à partir des documents de cette bibliothèque - Documents pouvant être copiés dans la bibliothèque « 02_Dossiers » pour modification selon le chantier dans lequel ils interviennent
02_Dossiers	Espace de stockage des documents QSSERP propre à un chantier en cours. Il permet d'accéder à ces éléments sur le terrain	- Documents à compléter durant le chantier - Le dossier de chaque chantier est à transférer sur le serveur « Data » à la fin du chantier pour archivage des données

Tableau 1 : Présentation des bibliothèques qui constituent le site SharePoint de l'entreprise

SharePoint possède un lien interne vers OneNote, qui est une application permettant de faire des croquis terrain, des pense-bêtes ou une prise de notes rapide. Il est également possible de consulter des dwg présents dans SharePoint via le logiciel Autocad, pouvant être disponible sur smartphone. On fera la distinction entre les deux types de documents qui seront rédigés durant ce PFE :

→ Les documents que l'utilisateur ne modifiera pas seront sur un format PDF (ex : mode d'emploi, mode opératoire). L'accès à ces éléments pourra se faire via un QR Code sécurisé présent sur la caisse de l'appareil topographique en question.

→ Les documents que l'utilisateur devra compléter seront des formulaires, c'est-à-dire des PDF interactifs (ex : fiche de contrôle). Ils pourront être remplis depuis l'application Adobe Acrobat dont le lien d'accès depuis SharePoint est possible.

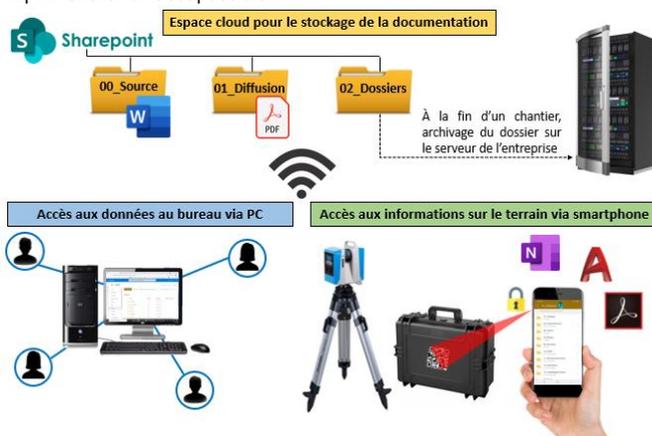


Figure 5 : Présentation synthétique du processus du système qualité mis en place

5. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'étude aura permis d'instaurer et de mettre en place les grandes lignes de la mise à jour du système qualité de l'entreprise TPLM-3D. En se basant sur les attentes et les expériences de chacun, il a été possible de monter ce projet fédérateur. Au vu de l'enthousiasme des membres de l'entreprise sur ce travail et de la prise en main de SharePoint par chacun, ce projet a de grandes chances de perdurer dans le temps. Néanmoins, il conviendra de rester vigilant face aux potentielles mauvaises habitudes de travail et d'organisation des données qui pourraient dégrader ce projet. En outre, de nombreux documents de l'entreprise sont encore à remettre à jour et à intégrer dans le système QSSERP de l'entreprise. Le travail restant étant conséquent, il pourrait bien déboucher sur des stages ou d'autres PFE dans les années à venir...

¹Qualité, Sécurité, Santé, Environnement et RadioProtection

Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition par lasergrammétrie en milieu difficile et couvert forestier en vue de la construction d'un parc éolien

PFE présenté par : **Jean-Baptiste MYOTTE-DUQUET**
Société d'accueil : **SARL Cabinet COQUARD,**
Cabinet de Géomètres-Experts
Directeur de PFE : **M. Vincent FIGUET**
Correcteurs : **Mme Tania LANDES**
M. Pierre GRUSSENMEYER
Encadrant : **M. Vincent FIGUET**



1. Contexte de l'étude

Au cours des dernières années, la profession de géomètre n'a cessé d'évoluer. Nous avons constaté que les méthodes traditionnelles (levé tachéométrique) ne sont plus au centre des activités du géomètre. Cette évolution est engendrée par la demande croissante de données tridimensionnelles précises et acquises rapidement. Le développement de nouveaux moyens de numérisation par mesure laser permet aujourd'hui d'acquérir rapidement une grande quantité de données. Les outils de mesure lasergrammétriques sont maintenant utilisables dans toute situation : en mode statique, mobile ou aéroporté.

L'objectif de ce PFE est de tester et comparer ces nouvelles technologies pour augmenter la productivité de l'entreprise lors de relevés topographiques dans des zones difficiles d'accès et/ou zones boisées. Pour l'heure, le cabinet COQUARD n'est pas équipé de scanner laser ni de drone couplé à un appareil photo ou à un système LiDAR. Les dirigeants remarquent que lors de relevés de grande envergure, le bureau n'arrive pas à être concurrentiel en utilisant les méthodes de levé traditionnelles.

L'objectif final est de trouver l'instrument le mieux adapté pour des relevés topographiques en milieu difficile et forestier en vue d'un futur investissement. Ces relevés consistent à faire un état des lieux faisant figurer les lignes de ruptures (talus), les limites apparentes (clôture, chemin, barrière...) et un maillage altimétrique permettant de modéliser l'allure du terrain naturel.

Afin d'avoir un point de comparaison, ces nouveaux relevés s'appuieront sur un projet de parc éolien où un premier relevé terrestre traditionnel a été effectué en juin 2019. La zone d'étude se situe sur les montagnes du Lomont dans le Doubs, à proximité des communes de Vellerot-lès-Belvoir, Vyt-lès-Belvoir et Valonne. L'acquisition planimétrique et altimétrique de 2019 a été réalisée par cheminement tachéométrique et relevé GNSS.

Pour ces nouveaux relevés, les acquisitions ont été réalisées dans le cadre de démonstrations avec différents fournisseurs d'instruments topographiques. Pour cette raison, nous n'avons pas pu relever toutes les zones désirées, mais seulement celles qui nous ont semblé opportunes pour l'étude et les comparaisons.

Cette étude nous permettra de confronter les différents systèmes lasergrammétriques utilisés aux méthodes actuelles du cabinet. Les critères d'examen seront les suivants : l'estimation du bruit de mesure généré par chaque appareil, les écarts en distance entre les nuages et une comparaison qualitative des données et du rendu final.

Pour chaque appareil, nous pourrions comparer leurs efficacités terrain et bureau ainsi que les logiciels associés et les prix. Sachant que ces relevés ne sont pas fréquents, il sera aussi important de réfléchir aux autres possibilités d'utilisations des appareils pour optimiser l'investissement.

Cette étude débute par un état de l'art des relevés réalisés dans des zones forestières et traite les différents aspects de la lasergrammétrie terrestre et aéroportée. Ensuite, après une succincte étude des logiciels de traitement 3D, nous analyserons les données recueillies lors des différentes acquisitions, puis nous ferons état des phases de traitement associées à chaque appareil. Nous pourrions alors mettre en adéquation ces données de manière quantitative puis qualitative ce qui nous donnera une comparaison sur les rendus possibles selon le mode d'acquisition. Pour finir, nous terminerons par une étude de rendement des appareils utilisés.

2. État de l'art

Concernant les relevés en milieux boisés et dans des secteurs où la végétation est dense, la littérature traite essentiellement de relevés par lasergrammétrie aéroportée et notamment lorsque le but de l'acquisition est d'en extraire un MNT. Les articles de Floor et al. (2018) et Valee (2019) en font mention. Ces dernières années, la technologie LiDAR aéroportée a fait des progrès significatifs, notamment au travers de l'émergence de nouvelles technologies d'acquisition telles que décrites par Okyay et al. (2019) et des drones capables d'emporter le système LiDAR complet. Il n'est plus nécessaire d'utiliser des avions ou hélicoptères pour transporter ces systèmes d'acquisitions.

La lasergrammétrie aéroportée n'étant pas la seule possibilité, nous nous sommes aussi intéressés à la lasergrammétrie terrestre et notamment les systèmes dynamiques utilisant la technologie SLAM. L'avantage de la technologie SLAM est qu'elle fonctionne dans des endroits où la réception GPS est faible ou absente, alors que de nombreux autres systèmes cartographiques s'appuient sur ces signaux. L'article de Balenović et al. (2021), nous expose les différentes études et instruments utilisés pour l'acquisition dynamique de données en milieu boisé. On retrouve principalement les appareils de la marque Geoslam, notamment le Zeb Revo RT et Zeb Horizon.

D'après la littérature étudiée, nous concluons donc que la lasergrammétrie est l'outil privilégié pour les relevés en zone forestière, notamment les relevés à l'aide de scanners dynamiques terrestres et aéroportés.

3. Acquisition des données

L'acquisition des données s'est concentrée sur deux zones présentes sur la figure 1. La zone 1 s'étend sur environ 200 m de longueur et 40 m de largeur, ce qui correspond au relevé d'un chemin de services et de ses abords. La seconde zone comprend une partie chemin et une partie zone boisée sur une surface d'environ 60 ares.



Figure 1 : Situation des zones relevées

Les différents appareils utilisés lors des acquisitions sont reportés dans le tableau 1.

Instruments	Scanner laser statique Trimble X7	Scanner laser à main Geoslam Zeb Horizon	Capteur LiAir V70 GreenValley International monté sur drone DJI Matrice 300 RTK
Principe de mesure	Scanner à impulsions	Technologie SLAM	Scanner à impulsions avec 3 échos
Portée	0.6 - 80 m	0.5 - 100 m	450 m
Vitesse d'acquisition	500 000 pts / s	300 000 pts / s	720 000 pts / s
Bruit de mesure	2.5 mm à 30 m	1 cm à 10m	-
Poids	5.8 kg sans trépied	1.3 kg	1.1 kg
Caméra	Oui	Oui	Oui
Précision relative	1 cm	1 - 3 cm	5 cm

Tableau 1 : Appareils utilisés pour l'étude

4. Comparaison quantitative des données

L'évaluation des données lasergrammétriques porte sur l'estimation du bruit de chaque appareil et sur des comparaisons mathématiques nuage à nuage. Pour la comparaison mathématique des nuages, nous ne pourrions pas utiliser les données issues du levé de 2019 comme référence, car le jeu de données est trop réduit et la comparaison obtenue serait grossière. Nous avons alors comparé les coordonnées de points caractéristiques entre le relevé tachéométrique de 2019 et le nuage de points relevé à l'aide du scanner X7, ce qui nous a donné un écart moyen en distance de 35 mm sur un échantillon de 12 points caractéristiques. Cet écart étant de l'ordre du rapport de géoréférencement du X7, les données du X7 ont donc été utilisées comme données de référence pour la suite des comparaisons.

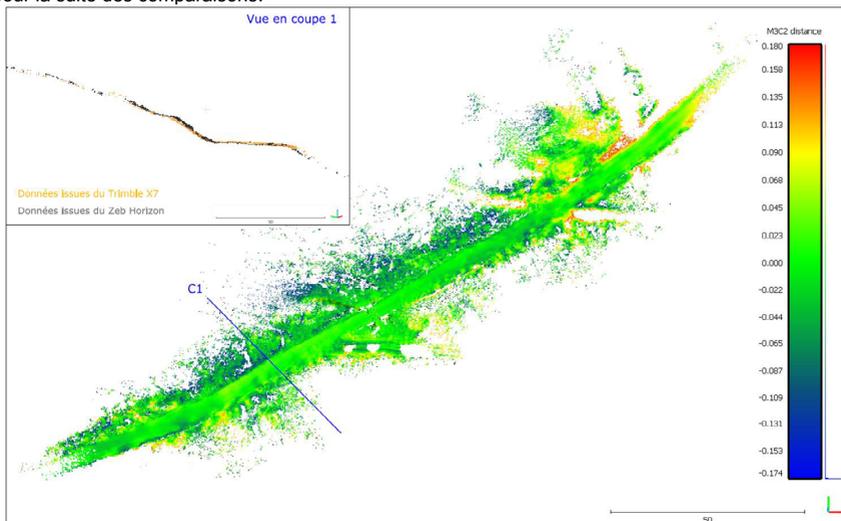


Figure 2 : Visualisation des écarts entre les nuages issus du X7 et du Zeb Horizon pour la zone 1 - (unités : mètre)

Suite à l'échantillonnage, à la segmentation et à l'alignement des nuages, nous avons pu comparer les écarts en distance présents entre les différentes acquisitions. Pour le nuage issu du scanner laser à main Zeb Horizon dans la zone 1, on obtient une distribution normale des distances avec pour paramètres l'espérance $\mu = -0.002$ m et l'écart type $\sigma = 0.040$ m. Ces écarts sont représentés par une échelle de couleur sur la figure 2. L'écart type est de l'ordre du bruit de mesure du Zeb Horizon estimé à partir des données relevées. On remarque sur la figure 2 que les écarts les plus importants sont situés sur les extrémités du nuage ainsi qu'au niveau des talus. A contrario, les écarts au niveau du passage avec le scanner à main sont quant à eux minimes. La comparaison de la zone 2 présente des écarts quelque peu supérieurs qui seront présentés au sein du mémoire.

Les comparaisons avec les données issues du capteur LiDAR aéroporté n'ont pas encore été réalisées.

5. Comparaison qualitative des livrables

Pour l'étude qualitative, il s'agit de comparer les plans topographiques générés à partir de données lasergrammétriques à ceux réalisés à l'aide d'un relevé tachéométrique. Le rendu final du relevé de 2019 était constitué de plusieurs plans topographiques du chemin d'accès aux éoliennes ainsi que les MNT de certaines zones. Cette comparaison est essentiellement visuelle. Après génération des plans topographiques des deux zones relevées avec le X7 sous TBC, les rendus obtenus sont conformes à ceux de 2019. Ces plans ne se superposent pas parfaitement, comme nous pouvons le distinguer sur la figure 3, mais cela provient de l'interprétation du technicien quant à la définition des bords de chemin, talus... Par contre, les limites bien définies telles que les clôtures et murs sont identiques d'un plan à l'autre. Les relevés à l'aide du X7 ou du Zeb Horizon nous permettent de réaliser le même rendu qu'avec un relevé tachéométrique codifié. Cependant, certains détails peuvent ne pas être détectés dans le nuage de points si la densité n'est pas assez importante ou si le nuage n'est pas colorisé (regard, grille, borne, clou...).

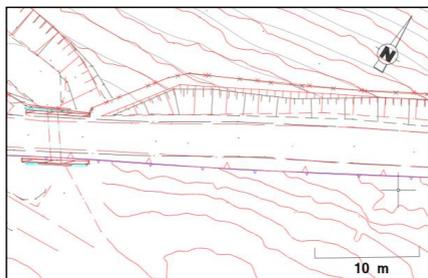


Figure 3 : Extrait de la superposition des plans topographiques de la zone 1 (trait rouge : plan topo réalisé à l'aide du X7)

6. Conclusion et perspectives

À ce jour, je ne suis pas en mesure d'apporter une conclusion, car je dois encore analyser les dernières données acquises à l'aide du LiDAR aéroporté. L'utilisation du Zeb Horizon semble opportune pour les relevés de chemin et de ses abords comme vus dans la zone 1, en revanche dans des zones où la végétation est plus dense, sa précision est réduite. Cependant, cette solution peut être retenue selon le degré de précision désiré par le client.

Le but de l'étude était de tester et comparer de nouvelles technologies de lasergrammétrie en milieu forestier et difficile d'accès afin d'améliorer la productivité du cabinet COQUARD et guider une future acquisition. Pour conclure quant à l'utilisation des instruments testés, un récapitulatif des appareils et une étude du rendement seront présents au sein du mémoire de ce projet de fin d'études.

7. Références

Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković, A. et Kukko, A. (2021) 'Hand-Held Personal Laser Scanning : Current Status and Perspectives for Forest Inventory Application', *Croatian journal of forest engineering*, vol 42, numéro 1, p. 165–183. doi: [10.5552/crojfe.2021.858](https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.858).

Floors, R. et al. (2018) 'From lidar scans to roughness maps for wind resource modelling in forested areas', *Wind Energy Science*, vol. 3, numéro 1, p. 353–370. doi: [10.5194/wes-3-353-2018](https://doi.org/10.5194/wes-3-353-2018).

Okyay, U., Telling, J., Glennie, C., et Dietrich, W. (2019) 'Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications', *Earth-Science Reviews*, vol. 198, article 102929. doi: [10.1016/j.earscirev.2019.102929](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102929).

Valee, J. (2019) *Using airborne laser scans to model roughness length and forecast energy production of wind farms*. Available at: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-393953> (Accessed: 10 May 2021).

Optimisation et développement des solutions photogrammétriques pour la réalisation des relevés de façade au sein du cabinet ELLIPSE Géomètres-Experts

PFE présenté par : **Guillaume Jeannin**
Société d'accueil : **ELLIPSE Géomètres Experts**
Directeur de PFE : **Wilfried Maduli**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**
Encadrant : **Bastien Lopes**



1. Plan de façade au sein du cabinet ELLIPSE

La réalisation de plans de façade est une activité proposée par le cabinet ELLIPSE Géomètres Experts. Il positionne tous les éléments de celle-ci (ouvertures, faîtages, acrotères, bandeaux, ...) à prendre en compte lors d'un projet de restructuration d'un bâtiment.

Historiquement ces plans de façade étaient réalisés en levant un à un les points caractéristiques de la façade à l'aide d'un tachéomètre. Ces points constitueront les sommets des formes de la façade dessinée sur un logiciel de DAO. En 2015, le cabinet ELLIPSE a réalisé l'acquisition d'un scanner laser terrestre (SLT) Faro X330. L'utilisation de ce SLT a permis de gagner en temps d'acquisition. En effet le SLT balaye la totalité de la façade en quelques minutes. Néanmoins le temps de dessin s'en trouva augmenté du fait du surplus d'informations par rapport à ce qui est nécessaire.

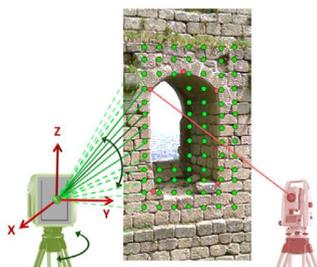


Figure 1 : Comparaison entre un levé lasergrammétrique et un levé tachéométrique pour une ouverture. [LANDES et al. (2011)]

En 2016, le cabinet ELLIPSE investi dans un drone DJI Matrice 200 et un logiciel de photogrammétrie (PIX4D) afin notamment de développer son activité de levé de carrière. Aujourd'hui les relevés de façade sont réalisés à l'aide du scanner laser terrestre Faro X330 et le dessin réalisé en deux dimensions à partir du nuage de points. Ce travail peut être assez fastidieux selon les détails des façades. Le cabinet souhaite que ce Projet de Fin d'Etudes permette d'une part de réaliser des rendus d'orthophotographie de façade et de développer son activité photogrammétrique d'autre part.

Ce Projet de Fin d'Etudes vise donc à étudier les possibilités de relevé par photogrammétrie de façade. Pour ce faire le cabinet possède un drone DJI Matrice 200, un appareil photographique Canon EOS 6D, un scanner laser Faro X330 ainsi que le logiciel de photogrammétrie PIX4D.

2. Premiers résultats d'orthophotographies

Acquisition

L'acquisition des photographies est la première étape dans la chaîne de production d'une orthophotographie. Cette acquisition peut être réalisée à l'aide de capteurs terrestres et/ou de capteurs aériens.

	Canon EOS 6D Mark II	DJI Matrice 200- Zenmuse X5S
Distance focale (mm)	17-40	15
Résolution (MP)	26.2	20.9
Taille des pixels (micromètres)	5.8	3.4

Table 1 : Capteurs aérien et terrestre utilisés durant le PFE

Les prises de vues doivent respecter la complexité de la façade. Dans cet objectif des prises de vues obliques sont nécessaires. De plus pour les prises de vues terrestres il faut respecter un certain éloignement afin de ne pas être gêné par les avancées de la façade telles que les balcons.

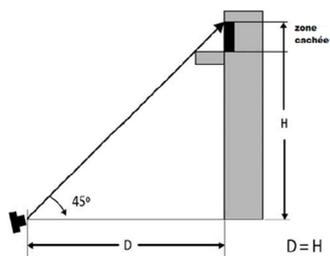


Figure 2 : Illustration d'une zone cachée provoquée par l'avancement d'un élément [PEÑA-VILLASENIN et al. (2017)]

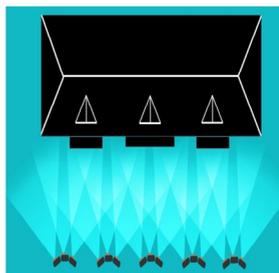


Figure 3 : Prises de vues d'une façade [Guide d'acquisition Context Capture]

La mise à l'échelle des projets photogrammétriques s'effectue à l'aide de points de calage. Ces points doivent encadrer la zone de relevé et être répartis de manière assez homogène. Ces points peuvent être acquis de deux manières différentes. La première, la plus automatique, consiste à utiliser des cibles qui seront placées de manière régulière sur la façade. Ces cibles devront alors être levées au tachéomètre. Lors de la phase de calcul elles seront reconnues automatiquement par le logiciel. La seconde manière de mettre à l'échelle un nuage de points photogrammétrique est de collecter des points de calage dans un nuage de points lasergrammétrique de la façade.

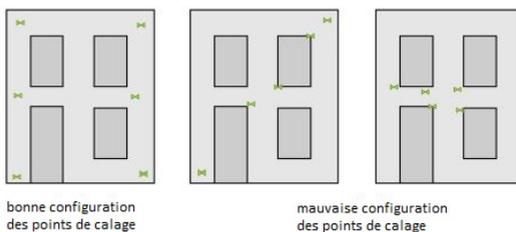
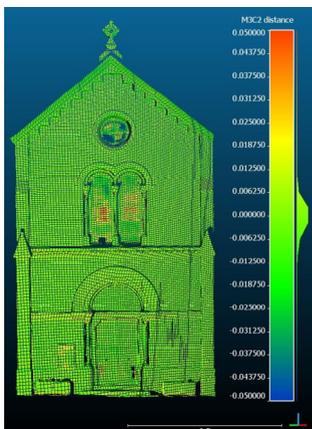


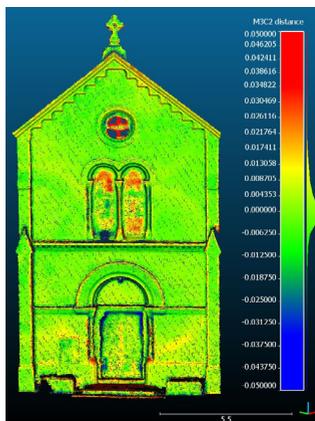
Figure 4 : Bonne et mauvaises distributions des points de calage sur une façade [Historic (England 2017)]

Traitements

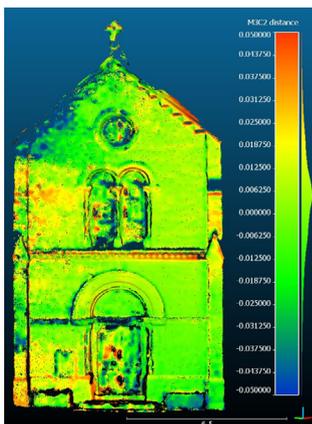
La première étape de création d'une orthophotographie est l'orientation externe des photographies. Cette étape se réalise à l'aide de la détection de points homologues entre les différentes images. Ces points homologues sont détectés à l'aide de la correspondance d'image par région semi-globale (Semi Global Matching). Cette méthode de correspondance qui utilise les paires d'images stéréoscopiques est très utilisée dans les logiciels commerciaux de photogrammétrie tels que PIX4D ou Agisoft Metashape. La seconde étape est l'orientation absolue qui permet la mise à l'échelle du projet. Celle-ci est réalisée à l'aide de points de calage cliqués sur des cibles ou directement sur la façade. La troisième étape est la densification du nuage de point calculé à l'étape une. Ce nuage de points servira à créer le Modèle Numérique de Surface (MNS) de la façade. Ce MNS sera utilisé dans la quatrième étape pour rectifier géométriquement les images lors de la création de l'orthophotographie.



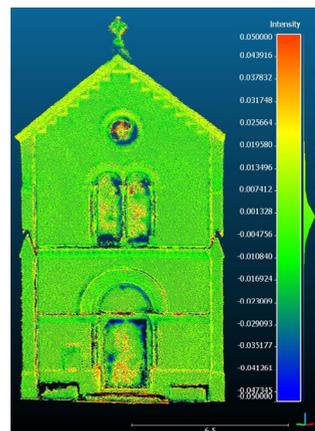
a) Images drones traitées sous PIX4D, $s = 2,5$ cm



b) Images drones traitées sous Metashape, $s = 2,4$ cm



c) Images terrestres traitées sous PIX4D, $s = 3,5$ cm



d) Images terrestres traitées sous Metashape, $s = 3,4$ cm

Figure 5 : Analyse des résultats d'appariement dense en utilisant les données du scanner laser terrestre comme référence pour la façade avant de l'église de Curtin (toutes les données sont en m)

	Nombre d'images	Nbre de points générés	Emq points de calage
Drone/PIX4D	38	2,5 Millions	1 cm
Drone/Metashape	38	1,3 Millions	0,9 cm
Terrestre/PIX4D	40	2,1 Millions	1.4 cm
Terrestre/Metashape	40	0,5 Million	1,5 cm

Table 2 : Statistiques des différents calculs

La première analyse que l'on peut faire de ces résultats est que les nuages denses des prises de vues aériennes sont plus précis que les nuages denses des prises de vues terrestres. Ces résultats semblent logiques car le drone permet la multiplicité des prises de vues. Le drone permet d'atteindre des zones non-accessibles. Pour les images aériennes, les zones les moins précises se situent au niveau des zones vitrées et de la porte. En effet ces zones ont des textures monotones qui perturbent les logiciels lors des calculs de correspondance d'images. Le reste de la façade a une précision homogène. Pour les prises de vues terrestres, les zones les plus imprécises se situent au sommet de la façade et aux zones non-couvertes par le capteur. Ces zones sont soit les plus éloignées du centre de l'objectif, soient cachées par l'avancement d'un élément de façade. Pour comparer les logiciels entre eux, le logiciel Metashape est légèrement plus précis que le logiciel PIX4D. En ce qui concerne les emq des GCP, elles sont meilleures (5 mm) pour les prises de vues du drone.

3. Amélioration et automatisation

Le but du PFE étant d'écrire un protocole d'acquisition et de traitement des photographies dans le but de la création d'orthophotographies de façade. Ce protocole permettra de guider la phase terrain ainsi que la phase de traitement pour les futurs levés photogrammétriques de façade du cabinet. Ce protocole décrit la manière de réaliser l'acquisition ainsi que le nombre de prises de vues à réaliser. En effet, plus il y a d'images et plus les temps de calcul sont longs. Ce PFE doit permettre de trouver le compromis précision/temps de calcul. L'objectif étant de minimiser le temps de traitement afin de gagner du temps pour calculer un autre projet par exemple. Les calculs sous PIX4D et Metashape étant déjà bien optimisés mis à part quelques étapes de pointage (si des cibles ne sont pas utilisées), de nettoyage des nuages et de création de plan de projection. L'objectif est de faire enchaîner les étapes de calcul aux logiciels (orientation relative, construction du nuage dense, orientation absolue et génération de l'orthophotographie) sans intervention extérieure toujours dans un souci de gain de temps. L'utilisation de cibles évite un travail chronophage de pointage sur le nuage de point lasergrammétrique (si les points de calage sont issus de ce dernier) ainsi que sur les photographies. Sous Metashape il est possible d'automatiser les étapes de calculs à l'aide d'un script python ou à l'aide de batch néanmoins il faut toujours indiquer au logiciel un plan de projection. Sous PIX4D, il est possible d'utiliser la ligne de commande pour créer et traiter des projets. Cependant toutes les options ne peuvent pas être modifiées.

4. Développement de l'activité photogrammétrie au sein du cabinet

Une partie du sujet du Projet de Fin d'Etudes concerne le développement de l'activité photogrammétrie au sein du cabinet ELLIPSE. Le cabinet possède deux capteurs photographiques (l'un terrestre et l'autre aérien) ainsi qu'un logiciel de photogrammétrie et souhaite développer ses secteurs d'activité dans le domaine de la photogrammétrie. En effet le capteur drone est principalement utilisé pour des missions de relevés de carrière et le capteur terrestre est principalement utilisé pour les levés de façade. Néanmoins au vu des investissements réalisés, il est judicieux de chercher d'autres secteurs d'études pour ces technologies afin de ne pas prendre de retard par rapport aux autres concurrents (confrères). La première étape consiste à réaliser des plaquettes de présentation de la photogrammétrie qui seront destinés aux différents clients potentiels du cabinet (collectivités territoriales, entreprises de TP, carrières). La seconde étape consiste à rechercher les marchés publics présents dans la région Auvergne-Rhône-Alpes notamment pour la réalisation de Plan de Corps de Rue Simplifié (PCRS) vecteur issu d'un PCRS raster. Pour l'appareil photographique réflex, la plaquette de présentation expose les différents projets qui peuvent être réalisés à l'aide de la photogrammétrie terrestre. La photogrammétrie terrestre permet un meilleur texturage du modèle 3D qu'un modèle 3D lasergrammétrique issu du scanner laser présent au cabinet car celui-ci ne possède pas un bon appareil photographique.

Amélioration et adaptation du protocole de mesure d'empreintes d'abrasion par photogrammétrie

PFE présenté par : **Hiba SAYEH**
Société d'accueil : **Compagnie Nationale du Rhône**
Directeur de PFE : **M. Paul-Henri FAURE**
Correcteur : **M. Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte et objectifs

Le projet de fin d'études a été proposé dans le cadre d'optimisation du procédé photogrammétrique élaboré pour le calcul de volume d'empreintes d'abrasion d'échantillons de matériaux. En effet, le banc d'abrasion conçu et utilisé par la CNR génère une empreinte sur les échantillons. Le volume de celle-ci doit être mesuré et comparé à une empreinte sur un matériau de référence (verre) pour calculer l'indice d'abrasion.

Après une utilisation historique de mercure pour calculer les volumes abrasés, l'entreprise a déployé en 2013 une méthode de mesure par photogrammétrie. Les photographies sont traitées par une suite d'opérations sur deux logiciels différents.

La solution actuellement déployée a été proposée par l'Institut National de l'information Géographique et Forestière (IGN) et est constituée d'un script à lancer sur le logiciel MicMac qui génère un modèle numérique. Le calcul de volume se fait ensuite à partir d'un maillage établi sur 3DReshaper. Cette deuxième partie a été améliorée par l'élaboration d'un script lors d'un PFE de l'INSA de Strasbourg en 2016. L'ensemble des 2 logiciels permet à un opérateur, sans compétences techniques particulières en photogrammétrie ou topographie, de lancer le calcul de manière autonome et intuitive. Ces manipulations, quoique satisfaisantes au niveau de la précision de l'indice d'abrasion, représentent plusieurs contraintes :

- ✓ La solution via Micmac nécessite la mise en place d'un poste spécialement dédié à ce processus.
- ✓ Les deux étapes, opérées sur deux logiciels et systèmes d'exploitation différents, sont lentes.
- ✓ Le script sur Micmac est complexe à déchiffrer en cas de modification des conditions de prises de vue, de mise à jour ou panne logicielle.

La démocratisation des outils de photogrammétrie a permis d'envisager une alternative aux moyens déjà implantés pour le calcul de volume. L'objectif principal de ce projet de fin d'études est la mise en œuvre d'un système utilisant des solutions logicielles 'industrielles', fonctionnant sur le système d'exploitation Windows et exploitable sans connaissance approfondie des logiciels photogrammétriques ou de programmation.

Les connaissances très réduites en photogrammétrie des techniciens manipulant les empreintes d'abrasion nous engagent à viser une automatisation maximale du processus, et anticiper les failles éventuelles de la nouvelle procédure. Les enjeux du procédé photogrammétrique pour ces essais résident principalement sur la précision finale à atteindre sur le volume (tolérance de 2%) et la problématique de corrélation du matériau du verre.

Les objectifs principaux du PFE sont :

- ✓ Recherche sur l'appariement sur MicMac et les différentes étapes de traitement pour générer le

MNT.

- ✓ Trouver l'équivalent de ces paramètres sur le logiciel Metashape.
- ✓ Répondre aux questions de calibration et de géoréférencement.
- ✓ Optimiser le temps de traitement et d'acquisition.
- ✓ Contourner la problématique de texture défavorable du verre et de béton granuleux.
- ✓ Atteindre la précision de l'ancien protocole.
- ✓ Automatiser le processus et limiter au maximum l'intervention manuelle du technicien.
- ✓ Valider la méthode Metashape sur un nombre important d'empreintes.
- ✓ Anticiper les éventuelles erreurs du script et failles de la méthode proposée.

2. Protocole actuel

Pour estimer le volume du matériau retiré par abrasion, la suite logicielle MicMac, développée à l'IGN, est bien adaptée à ce type de travaux car elle permet de calculer de façon automatique un nuage de points dense de la surface d'un objet.

Elle propose une méthode photogrammétrique s'appuyant sur une interface intuitive appelée COUSCOUS. Celle-ci permet de calculer un modèle numérique de surface (MNS) de l'échantillon avant et après essai. La comparaison de ces deux MNS donne le volume de matériau abrasé.

Les empreintes prises en photo sont traitées en premier lieu sur MicMac. Il génère le nuage de point, supprime le bruit et masque l'environnement externe. Après avoir récupéré le MNT, le calcul de volume se fait sous 3DReshaper.

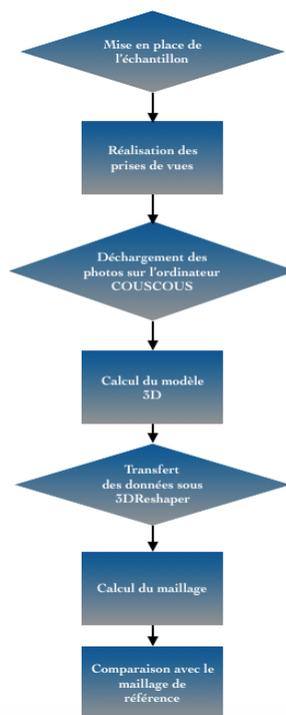


Figure 1 : ensemble des traitements réalisés

3. Protocole de substitution

L'enjeu de ce projet de fin d'études est de remplacer la méthode actuelle qui s'avère robuste et précise par une solution maîtrisable en interne par la CNR. Notre choix s'oriente vers le logiciel Metashape pour l'interface simple et la multitude d'options qu'il propose d'une part, et d'une autre en raison de la possession de l'entreprise d'une licence professionnelle.

Les axes de recherche pour cette étude seront les suivants :

- **problématique de texture** : En effet, l'indice d'abrasion de référence est calculé sur une empreinte de verre. Les caractéristiques de réflexion et réfraction rendent la restitution du nuage de point très contraignante. Le logiciel Metashape doit s'affranchir de cette problématique en estimant la bonne profondeur de l'excavation d'abrasion. Nous améliorons la reconnaissance des points homologues en étalant une poudre qui va donner plus de texture à l'échantillon et assurer que la corrélation se calcule en fonction des zones recouvertes. Quant au béton, la plupart des matériaux présentent une surface assez lisse ce qui donne des résultats satisfaisants à l'exception du BFUP. Sa formulation fait appel à

des adjuvants superplastifiants, des compositions granulaires spécifiques et des fibres métalliques ou organiques. La reconnaissance et la modélisation de ces derniers peut impacter grandement le calcul du volume final.

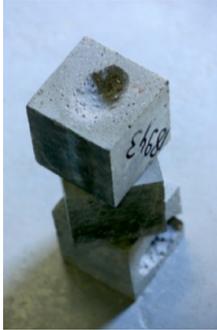


Figure 2 : empreinte de béton Figure 3 : empreinte de BFUP Figure 4 : empreinte de verre

- **garantir la précision des modèles** : Une précision de 2% du modèle actuel est requise pour valider la méthode alternative proposée. Afin de répondre à cette contrainte et générer un nuage de point qui concorde avec celui de référence, il est essentiel de faire un travail rigoureux de calibration et de géoréférencement. Comme le logiciel Metashape propose différentes solutions de calibration, nous allons tester différentes méthodes et analyser les résultats pour choisir celle qui est la plus adaptée. À savoir que notre référence est le nuage de point calcul sur MicMac. Nous opterons pour :

- l'utilisation d'un objet reconnu systématiquement pour calibration: le damier avec la commande Lens
- en auto-calibration de la scène du projet suite à un grand nombre de photos.

Les résultats les plus concluants sont obtenus par le biais de l'autocalibration. En effet, le logiciel propose des algorithmes d'extraction des éléments intrinsèques très puissants à partir de la corrélation de points homologues.

Le géoréférencement est une partie essentielle dans la chaîne de traitement. La plus grande source d'imprécision sur le volume est la mise à l'échelle. Si la distance entre les cibles n'est pas bien connue ou que les cibles sont mal saisies, un facteur d'échelle apparaît et perturbe les résultats. Par exemple pour une erreur de 1% sur les distances, les volumes seront erronés de 3%. Il faudrait que l'échelle soit correcte à 1‰ pour obtenir une précision de 3‰ en volume. Nous pouvons utiliser le pointage manuel sur les croix déjà implantées. La reconnaissance automatique de la cible garantit une précision subpixelaire alors que la première dépendra de la taille de cible, les pixels du centre, de la qualité photo, et par conséquent une grande partie de subjectivité optique de l'opérateur qui peut induire en erreur.

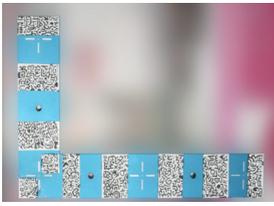


Figure 5 : cibles MicMac

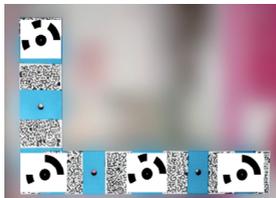


Figure 6 : cibles Metashape d'un rayon de 2cm



Figure 7 : cibles Metashape d'un rayon de 0,5cm

En effet, nous optons pour des cibles Metashape 12 bits à poser sur l'équerre qui sert au géoréférencement MicMac. Cette dualité de cibles permettra un calcul avec le protocole d'origine en cas de doute ou de défaut de mise à jour logicielle Metashape. Une première approche fut calculée avec 4 cibles d'un rayon de 2 cm. Afin d'affiner les résultats, nous optons pour 8 cibles réparties autour de l'équerre de façon homogène avec la même taille. Plus tard dans l'étude, nous testerons des cibles d'une taille de 0,5cm de rayon, afin d'améliorer les précisions encore plus vigoureusement.

Ci dessous, les résultats et les écarts calculés avec 8 cibles dont on affecte une précision a priori de 2mm sur chacune des coordonnées.

épreuve	Volume	volume MicMac	Tolérance 2%		Volume Metashape	Écart
			min	max		
21502	V1	15,273	14,9675	15,5784	15,2364	0,24 %
	V2	14,785	14,4893	15,0807	14,8379	-0,36 %
21498	V1	14,785	14,4893	15,0807	14,8379	-0,36 %
	V2	13,205	12,9409	13,4691	13,4427	-1,80 %
21497	V1	13,205	12,9409	13,4691	13,4427	-1,80 %
	V2	12,569	12,3176	12,8203	12,7804	-1,68 %
21504	V1	24,503	24,0129	24,9930	24,2291	1,12 %
	V2	22,576	22,1244	23,0275	22,9638	-1,72 %

Tableau 1 : comparaison volume calculé avec le protocole actuel et le script Metashape

4. Automatisation

Un des objectifs principaux de notre projet de fin d'études est l'automatisation des calculs. Metashape permet le lancement de scripts personnalisés et intègre des fonctionnalités qui ne sont pas disponibles via les commandes sur l'interface. L'optimisation des caméras qui réitère les calculs, l'option de résolution qui détermine la qualité et le filtrage qui fixe des seuils d'élimination de bruit vont nous permettre d'atteindre la précision millimétrique recherchée. De la récupération du dossier image, passant par l'import de la précalibration et la génération du modèle d'élévation, tout est calculé de manière autonome une fois le script lancé. L'opérateur n'interviendra que dans le choix du dossier source images et le pointage du polygone autour de l'empreinte d'abrasion.

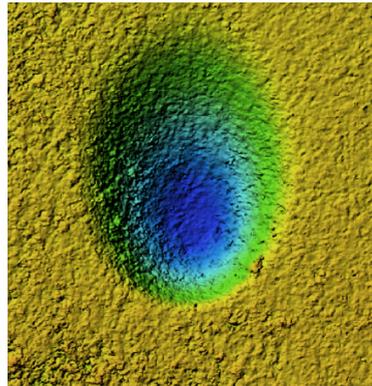


Figure 8 : modèle d'élévation d'une empreinte

5. Conclusion et perspectives

Les objectifs initialement fixés du projet sont remplis. En effet, les résultats sur les volumes calculés sont dans la tolérance des 2% fixée en début de projet et lors du passage du mercure à la photogrammétrie. Metashape offre une plateforme qui génère le MNT et le calcul de volume sans devoir passer par deux logiciels et systèmes d'exploitation différents. D'autres améliorations ont été développées : l'opérateur réduira le temps d'intervention de 30 à 5 minutes avec les outils implantés pour l'optimisation du temps. En ce qui concerne les perspectives, il serait intéressant de tester d'autres outils d'acquisitions d'images (caméra d'un téléphone portable, scanner laser) et comparer la précision atteinte en fonction du capteur.

Mise en place et développement d'un service de Webmapping 3D

PFE présenté par : **Thomas Petit**
Société d'accueil : **Syslor**
Directeur de PFE : **M. Semin**
Correcteur : **M. Koehl et M. Grussenmeyer**
Encadrant : **M. Mangin**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de fin d'études fait suite à un projet de recherche technologique effectué au premier semestre de cette année scolaire. Il est réalisé dans le cadre de la formation ingénieur topographe parcours IRIV topographie. Ce projet vise à mettre en place un service de Webmapping 3D pour Syslor, une jeune société messine proposant des solutions technologiques pour faciliter la gestion des infrastructures souterraines.

À l'heure actuelle Syslor propose trois grands services. Syslor Récolement, un service permettant de modéliser et de cartographier les réseaux enterrés, à partir d'une vidéo. Les livrables sont un jumeau numérique sous forme de nuage de points géoréférencés en 3D, une orthophoto en 2D et un plan de récolement. Syslor Réalité Augmentée, un service permettant de visualiser en réalité augmentée les infrastructures souterraines, des projets et d'entretenir le marquage au sol. Et finalement, Syslor Implantation, un carnet de terrain sur smartphone, il permet d'implanter des bordures en fonction de points/polygones identifiés, de relever des points au sol et de créer des décalages pour l'implantation.

Syslor propose des livrables avec des formats divers et variés. Cette société manipule un grand nombre de données hétérogènes et emploie de nombreux logiciels de traitement. Syslor développe ses propres outils et innove constamment. Aujourd'hui, elle souhaite permettre en interne et pour ses clients la visualisation simultanée de plusieurs types de données via un service de Webmapping 3D. En d'autres termes, l'idée serait de permettre à une entreprise de pouvoir visualiser sur un chantier un certain type de données et en seulement quelques clics pouvoir en visualiser un autre sans changer d'application.

Le service de Webmapping 3D permettra d'interagir avec des données topographiques tels que les orthophotos, les nuages de points, les maillages 3D et les modèles 3D. De plus, des outils topographiques et des fonctionnalités SIG seront mis à disposition pour allouer une expérience utilisateur optimale.



Figure 1: Exemple de rendu sur la plateforme développée

On retrouve sur la *Figure 1* les données topographiques citées dans le paragraphe précédent. De gauche à droite, se trouvent respectivement : un nuage de points associé à un modèle 3D avec l'utilisation de l'outil de mesure de distance, une orthophoto et finalement un maillage 3D.

2. Qu'est-ce que le Webmapping 3D ?

De nos jours, la visualisation 3D sur le Web devient très populaire et est utilisée dans des domaines très différents (Franke et Haehn, 2020). Elle est une aide à la prise de décision et à la gestion du territoire qui tend à devenir indispensable. De nombreuses collectivités travaillent sur ce besoin naissant, dont l'Eurométropole de Strasbourg (Bernhard, 2019), un grand nombre de métropoles françaises (IGO, 2019) ainsi qu'à l'international dans des villes comme Prague (VTS, 2021). De même que de grandes entreprises dans le secteur économique du bâtiment et des travaux publics s'intéressent de près à la thématique pour encadrer leurs chantiers, notamment au niveau de la gestion des réseaux enterrés (Hu et al., 2020).

L'Open Geospatial Consortium (OGC) définit le Webmapping comme «Dynamic query, access, processing, combination and portrayal of different types of spatial information over the Web.» (OGC, 2017). Ce qui se traduit en français par des requêtes dynamiques, l'accès, l'exploitation, la combinaison et la représentation de données spatiales sur le Web. Un tel service est englobé dans un Web SIG 3D. Il est possible de définir ce qu'est un Web SIG 3D sur la base d'un triptyque centré sur la donnée. Une telle entité permet de réaliser les trois actions suivantes : préparer, stocker/héberger et visualiser/exploiter la donnée.



Figure 2 : Triptyque centré sur la donnée

La préparation traite essentiellement du formatage et de l'écriture de la donnée mais également des différentes opérations permettant une visualisation optimale. Le stockage et l'hébergement doivent être faits de manière structurée pour fournir un environnement dans lequel le service de Webmapping 3D peut exister. Les derniers éléments sont la visualisation et l'exploitation de la donnée, résultats finaux du processus créatif, ils sont assimilés au terme Webmapping 3D. Pour développer un service de Webmapping 3D il faut donc mettre en place un Web SIG 3D au préalable.

3. Étude de l'existant

Une étude de l'existant a été réalisée sur les trois éléments du triptyque composant un Web SIG 3D. Ainsi un état de l'art sur la préparation, le stockage et l'hébergement ainsi que la visualisation et l'exploitation a été réalisé. Cet état de l'art est à la base du processus créatif de la plateforme de Webmapping 3D.

Il ressort de l'étude bibliographique que la gestion des différents types de formats de données est essentielle. Effectivement, en fonction des solutions choisies, le champ des possibles au niveau des types de formats de données est plus ou moins restreint. Des conversions de formats de données semblent inévitables. Deux voies existent : la création de script de conversion et l'utilisation de logiciels dédiés. D'autre part, la gestion des systèmes de coordonnées et le géoréférencement de la donnée sont tout aussi importants. Deux approches se distinguent de l'étude, la première est de développer des scripts comme ceux que Syslor a pu développer pour ses applications. La deuxième consiste quant à elle à exploiter des bibliothèques open sources. Finalement, le tuilage de la donnée est aujourd'hui essentiel. Il permet la gestion de modèle volumineux et alloue une visualisation de même qu'une exploitation plus efficace et efficiente. Pour tuiler les données 2D, deux spécifications sont majoritairement utilisées. La spécification Tile Map Service (TMS) et Web Map Tile Service (WMTS) un standard de l'OGC. De même, le tuilage de la donnée 3D est particulièrement apprécié et plébiscité. Et plus particulièrement le tuilage développé en 2015 par Cesium, reconnu en 2019 par l'OGC (Open Geospatial Consortium), le 3D Tiles.

Le rapport bibliographique permet de mettre en évidence que le stockage et l'hébergement de la donnée sont importants dans la création d'un Web SIG 3D. L'étude montre que l'architecture réseau à utiliser peut-être complexe. Lors du développement du Web SIG 3D chez Syslor, un travail conséquent sera à réaliser pour obtenir un service de Webmapping 3D fonctionnel.

Pour la visualisation et l'exploitation, deux approches créatives sont proposées par le rapport. À savoir une approche se basant sur l'utilisation de logiciels et l'autre sur l'utilisation de bibliothèques de Webmapping 3D. La première approche est un processus créatif se basant sur l'utilisation de logiciels pour réaliser des scènes 3D. Puis, consiste à les publier sur le Web via un service pourvu par le logiciel. Le second choix possible est de créer son propre service à partir d'une bibliothèque de Webmapping 3D qui se base le plus souvent sur la technologie HTML5 et la librairie JavaScript WebGL.

L'état de l'art des logiciels de Webmapping 3D a permis de présenter quatre solutions : ArcGIS Online, Global Mapper, 3DM Publisher et TerraExplorer for Web. ArcGIS Online, développé par ESRI, paraît être le logiciel le plus mature et le plus documenté. Il présente une interopérabilité totale avec la suite ESRI ainsi qu'avec de nombreux éléments externes. Il est le logiciel le plus utilisé sur les projets de Webmapping 3D réalisés avec l'approche logiciel. Global Mapper est une belle alternative aux solutions de la suite ESRI pour l'exploitation de données 2D. Il propose des services moins onéreux que son compatriote ESRI mais ne dispose pas encore d'outils Web 3D. 3DM Publisher, développé par Bentley System avec une grande interopérabilité ainsi qu'un certain nombre de fonctionnalités apparaît comme une solution solide et ergonomique. Finalement, TerraExplorer for Web, un service se basant sur une bibliothèque de Webmapping 3D open source, CesiumJS. La démarche créative de ce logiciel suit la deuxième approche proposée dans l'étude bibliographique.

L'état de l'art sur les bibliothèques de Webmapping 3D porte sur quatre bibliothèques JavaScript open source : CesiumJS, iTowns, Potree et VTS 3D. La majorité de ces bibliothèques sont basées sur la technologie HTML5 et la librairie JavaScript WebGL. CesiumJS est la bibliothèque numéro un sur le marché, c'est la bibliothèque plébiscitée dans les projets de recherche et développement. Elle dispose d'un grand nombre de fonctionnalités, en partie développées par sa communauté. La bibliothèque d'origine française iTowns se basant sur three.js est aujourd'hui majoritairement portée par Oslandia et AtoLCD. Elle se distingue par le grand nombre de types de données qu'elle intègre. De son côté, Potree est aujourd'hui utilisée par Syslor pour fournir une visualisation des livrables aux clients. Le point fort de la bibliothèque est la gestion des nuages de points de gros volumes pour laquelle elle a été conçue. Finalement, VTS 3D est plutôt tournée autour de l'aménagement du territoire. Elle a été mise en œuvre pour promouvoir le tourisme dans la ville de Prague.

4. Mise en place de la plateforme

Aux vues de l'étude de l'existant, l'utilisation d'une bibliothèque de Webmapping 3D a été privilégiée. La bibliothèque CesiumJS a été choisie comme base dans le processus créatif de la plateforme conçue lors du PFE. À cette dernière, seront associées un certain nombre d'opérations précédant le Webmapping 3D. Et plus particulièrement, un large travail de conversion ainsi qu'une réflexion sur la mise en place du stockage et de la base de données optimales.

Dans un premier temps, l'objectif est de répondre aux besoins internes. À savoir, permettre la visualisation et l'exploitation de la donnée issue des productions de Syslor. D'autre part, pour définir le besoin externe une campagne de prospection de données a été opérée. Notamment via des publications LinkedIn et des envois de mails. Elle a abouti à l'obtention de plus de sept jeux de données différents. La donnée récupérée a permis d'identifier les besoins des clients potentiels et sera traitée dans un second temps, après les données issues de la production interne, pendant ou à l'issue du PFE.

Des chantiers types de Syslor ont été sélectionnés pour mettre en place une preuve de concept. La préparation de la donnée s'est orientée sur les différentes solutions de conversion mis en lumière par l'étude de l'existant. Des scripts avec des langages divers et variés ont été utilisés ainsi que plusieurs logiciels. Pour ce qui est du stockage et de l'hébergement, ils se font localement dans un premier temps en exploitant un serveur express. Finalement, une base de données a été mise en place pour exploiter la donnée.

La plateforme de Webmapping 3D se constitue d'une multitude de scripts. Les langages de programmation principalement utilisés sont le JavaScript, l'HTML5 et le CSS3. La plateforme se décompose en deux entités. Une première page de connexion où l'utilisateur rentrera son identifiant et son mot de passe. Puis, une fois enregistré, l'utilisateur sera redirigé vers une interface qui lui sera propre où il pourra interagir avec sa donnée.

L'interface utilisateur se décompose en deux parties. Un menu qui permet de gérer les données de la scène souhaitée. Le choix de ces données se fait selon le schéma suivant. Le chantier d'intérêt est sélectionné puis les données qui lui sont associées sont mises à disposition pour le choix de la scène en fonction du mode sélectionné. L'utilisateur peut définir quelle donnée il souhaite afficher. Il est possible de les combiner, peu importe le type de la donnée en entrée. C'est sur cette partie de l'interface que l'on retrouvera les fonctionnalités SIG.

À ce menu est associée une interface de visualisation qui se base sur CesiumJS. Elle se décline en deux modes. Un mode 2D permettant de visualiser et d'exploiter les orthophotos et géométries CAD, ainsi qu'un Mode 3D permettant la visualisation et l'exploitation des nuages de points, maillages 3D et modèles 3D. Sur cette interface visuelle se trouve l'ensemble des fonctionnalités topographiques mis à disposition par la plateforme.

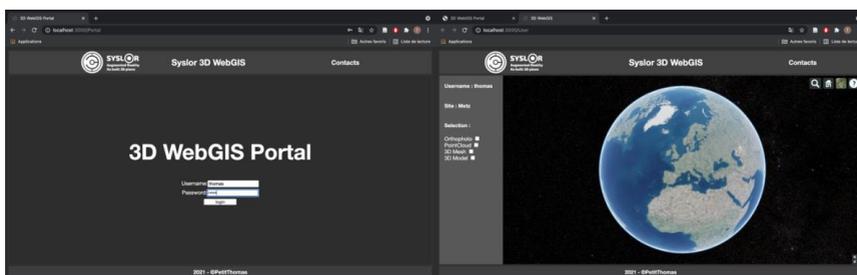


Figure 3 : Plateforme de Webmapping 3D

L'idée du PFE est de mettre en place un service de Webmapping 3D avec une approche scientifique. Ainsi, la mise en place de la plateforme est associée à une étude critique et analytique des différentes solutions utilisées et/ou choisies. Et, plus particulièrement sur la pièce angulaire de la plateforme, la bibliothèque de Webmapping 3D CesiumJS. En effet, ce PFE propose de mettre en lumière les points forts et faiblesses de la librairie. Et ce, en s'intéressant à ses performances de rendus, sa précision et à son panel de fonctionnalités.

La plateforme présentée dans la Figure 3 est la version de la plateforme de Webmapping 3D courant juin 2021. Depuis elle a connue de multiples avancées, visuelles et topographiques. Pour voir l'état actuel de la plateforme de Webmapping 3D vous pourrez assister à ma soutenance de PFE le jeudi 23 septembre à 8h30 ou suivre son avancée sur LinkedIn.

5. Conclusion et perspectives

À l'issue du PFE, la plateforme de Webmapping 3D répondra aux besoins internes de Syslor. L'idée par la suite est de permettre aux entités externes d'exploiter la plateforme. Et cela, en déposant simplement leurs données sur un portail dédié qui les enverra ensuite en production pour permettre leur intégration sur la plateforme.

Cette version de la plateforme de Webmapping 3D développée lors du PFE sera le socle sur lequel s'appuiera la production du produit final que commercialisera SYSLOR. Ce produit sera à l'avenir en perpétuel évolution, de nouvelles fonctionnalités verront le jour ainsi que des nouveaux formats d'entrée seront régulièrement ajoutés.

Les avancées scientifiques actuelles sur les Web SIG sont très intéressantes et laissent à penser qu'une complémentarité entre la plateforme et les différentes applications Syslor est possible. L'avenir de la plateforme semble très prometteur.

Relevé et modélisation 3D du tunnel du tram entre Rotonde et Halles (Strasbourg)



PFE présenté par : **Delphine SCHUELLER**
Société d'accueil : **CTS**
Directeur de PFE : **Olivier BARROT**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Mathieu KOEHL**

1. Contexte et objectifs de l'étude

Le tunnel du tramway à Strasbourg reliant les stations « Les Halles » et « Rotonde », long de 1400m et construit en 1994 permet l'exploitation des lignes A entre « Parc des Sports » et « Illkirch-Graffenstaden » et D entre « Poteries » et « Kehl-Rathaus ». Il abrite la station « Gare centrale », seule station sous-terrainne du réseau strasbourgeois et constitue l'unique tunnel exploité par la CTS (Compagnie des Transports Strasbourgeois).

En raison de nouvelles directives celle-ci souhaite connaître la position planimétrique et altimétrique du tunnel. Ces directives ont fait suite à l'article R. 554-29 du Code de l'Environnement qui par un décret du 5 Octobre 2011 stipulent que tous les réseaux enterrés devront être géoréférencés d'ici à 2032. Des échéances antérieures sont fixées selon l'emplacement du réseau et sa sensibilité. Ainsi les réseaux sensibles situés en zone urbaine devraient être géoréférencés depuis le premier janvier 2020. Tous les réseaux enterrés urbains ainsi que tous les réseaux sensibles en zone rurale doivent être géoréférencés à l'horizon 2026. Le restant des réseaux devant être connu en coordonnées d'ici 2032. Les réseaux de transport de personnes étant considérés comme des réseaux sensibles, le tunnel entre dans cette catégorie et est donc concerné par cette obligation depuis janvier 2020. La CTS présente déjà un retard sur le planning prévu par la réglementation. Il est donc nécessaire de régulariser la situation du tunnel. En plus d'une exigence au sujet de l'échéance, cette réglementation fixe également un critère de précision. En effet, les réseaux urbains sensibles doivent être géoréférencés en classe A, ce qui représente une précision inférieure ou égale à 40 cm qui est amenée à 80cm pour les ouvrages ferroviaires souterrains.

Ce projet pour le compte de la CTS et en partenariat avec cette dernière a pour objectif de mettre en place une méthode permettant le relevé 3D du tunnel en tenant compte des contraintes spécifiques aux réseaux de transport urbain puis de proposer différents livrables 2D ou 3D permettant à la CTS de situer précisément le tunnel. Un plan de récolement permettant de référencer tous les éléments présents au sein du tunnel a également été réalisé afin de fournir un inventaire précis de l'infrastructure à l'entreprise. Pour finir, une portion du tunnel a été modélisée en 3D afin d'offrir des perspectives d'ouverture vers les nouveaux modes de représentation à la société de transport.

2. Campagne de levé

Le but de ce projet étant l'extraction des lignes directrices du tunnel ainsi que la modélisation de l'ouvrage d'art, la réalisation d'un relevé lasergrammétrique terrestre est rapidement apparue comme une évidence. Un scanner statique FARO focus 3D X330 a été utilisé. Celui-ci ne permettant pas la géolocalisation directe et l'ouvrage à relever étant enterré, il a fallu préparer le géoréférencement du nuage de points en amont du relevé 3D par la réalisation d'un cheminement polygonal le long du tunnel rattaché au GNSS à ses deux extrémités et par la mise en place puis le relevé de cibles planes réparties tout au long du tunnel.

La campagne de relevé initiée au cours du PRT (Projet de Recherche Technologique) et poursuivie dans le cadre de ce PFE a permis la mise en place du cheminement polygonal sur l'ensemble de l'ouvrage. Les contraintes liées à la circulation du tram dans le tunnel ont impliqué que les opérations sur le terrain se déroulent pendant l'arrêt de l'exploitation. La plage horaire accessible s'est située entre

1h et 4h30 du matin, ce qui a nécessité une bonne préparation en amont afin d'éviter les pertes de temps lors de chaque étape et de limiter le nombre de sorties.

Pour la polygonation, vingt-quatre stations ont été placées à environ 100m d'intervalle, dont deux à l'extérieur du tunnel à chaque extrémité. Le cheminement de 1.7km a été réalisé d'une traite en une seule intervention au tachéomètre Trimble S9 en procédant par centrage forcé. Il a ensuite été calculé au bureau à l'aide de Covadis. Du fait de la longueur, des corrections ont été appliquées pour finalement obtenir une fermeture planimétrique de 4.3 cm et une fermeture altimétrique de 2.2 cm. Ce cheminement a, par la suite, également été réalisé par le cabinet de géomètre-expert Vincent FREY afin de valider et d'assurer ces résultats.



Figure 1 : Acquisition scanner laser terrestre

Le levé au scanner laser terrestre a été réalisé avec le scanner Faro Focus 3D x330. La résolution utilisée pour les scans a été fixée à 1 point tous les 6mm à 10m. Les scans ont été complétés par des prises de vue couleur. La première station de scanner a été positionnée au niveau d'une station de cheminement polygonal afin d'avoir une visibilité optimale sur les quatre cibles damier mesurées au tachéomètre depuis cette station. Les damiers ont servi au géoréférencement du nuage et ont permis de faire le lien entre les deux parties de la campagne d'acquisition scanner. Une station au scanner a été réalisée tous les 30m environ. Entre les différentes stations, des cibles sphériques ont été positionnées afin de permettre la consolidation des nuages de points de deux stations consécutives. En effet, les sphères étaient indispensables au vu de la géométrie du tunnel : un ouvrage linéaire, lisse et de section circulaire. Pour la première étape du levé, deux nuits d'acquisition ont été nécessaires. Vingt-neuf scans ont été effectués permettant l'acquisition complète de la portion située entre les arrêts « Halles » et « Gare centrale », de la station « Gare centrale » ainsi que d'une petite partie de la portion entre les arrêts « Gare centrale » et « Rotonde ». La deuxième partie du levé, effectuée au cours du PFE, a elle nécessité 3 nuits d'acquisition, pour un nombre de trente-huit nouvelles stations de scanner, en partant du dernier endroit scanné pendant le PRT. Ainsi, un total de soixante-sept scans a dû être réalisé pour compléter l'acquisition du tunnel.

L'étape suivante a consisté dans le traitement de ces données comprenant une succession d'étapes amenant à l'obtention d'un nuage de points unique, nettoyé et géoréférencé. La première étape a été la consolidation des nuages de points. Les nuages de points bruts extraits du scanner laser ont été importés dans le logiciel Faro SCENE. Le levé ayant été réalisé sur plusieurs nuits, une consolidation automatique basée sur les sphères de la totalité du projet n'était pas envisageable. Les quinze scans réalisés durant la première nuit d'acquisition, ont été consolidés de façon automatique. Le premier scan de la deuxième nuit d'acquisition a été assemblé au groupe consolidé grâce à une consolidation par plans et par points en cliquant des plans et des points caractéristiques en commun avec le scan précédent. Les scans restants ont été ajoutés un à un au groupe consolidé, de nouveau par une consolidation à partir des sphères. Le même procédé a été appliqué pour ajouter les scans des nuits suivantes. Deux « clusters » ont toutefois dû être créés afin de permettre une consolidation complète du projet. Le géoréférencement a également permis de faciliter la consolidation. Ce dernier a été réalisé à l'aide des coordonnées des damiers mesurés lors de la polygonation. Le nuage de points consolidé présente une erreur moyenne quadratique sur le nuage consolidé de 6.8 mm. Cette valeur semble tout à fait acceptable et cohérente au vu de la géométrie linéaire du nuage de points qui est propice à une



Figure 2 : Nuage final du tunnel

dérive des erreurs. Le nuage a ensuite été nettoyé et rééchantillonné en conservant un point tous les centimètres pour permettre une meilleure manipulation lors de la modélisation. (Figure 2)

3. Modélisation du tunnel

Le travail d'assemblage, de nettoyage et de ré-échantillonnage une fois terminé, il a pu être procédé à la modélisation. Comme il a été convenu avec la CTS, pour ce projet la modélisation a tout d'abord pris la forme des lignes directrices du tunnel, ce qui correspond aux lignes tangentes aux points de plus haute altitude et aux points les plus à l'extérieur du tunnel, le long de l'axe du tunnel, comme présentés sur la Figure 3. Dans un second temps, un plan 2D reprenant tous les éléments présents dans le tunnel (extincteurs, lumières, panneaux, etc.) a été réalisé, ainsi qu'une modélisation 3D d'un tronçon de l'infrastructure.

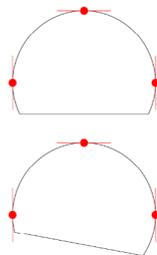


Figure 3 : Vues en coupe simplifiées du tunnel (ligne droite et virage) et points de tangence

a. Lignes directrices

Afin de pouvoir réaliser la modélisation de chacune des parties au mieux, le nuage a été subdivisé en sous nuages. Deux méthodes ont été utilisées pour extraire les lignes directrices du tunnel. La première a utilisé le logiciel 3D Reshaper et sa fonction de contour d'entités. La seconde a correspondu au développement d'un programme en langage Python et qui à, partir d'un nuage de points au format ASCII et d'un axe du tunnel, extrait directement les points extrêmes d'une coupe. Seule cette deuxième méthode permet de réaliser la ligne directrice qui correspond à la tangente sommitale du tunnel.

Pour la première méthode le logiciel 3D Reshaper a été utilisé. Il a tout d'abord fallu réaliser un maillage de l'intégralité du tunnel. Il a ensuite été possible d'utiliser la fonction du logiciel d'extraction de contour externe. Comme le but était d'obtenir la position planimétrique du tunnel, il était suffisant d'extraire un contour 2D. Il a ensuite fallu définir la direction de projection du nuage qui était ici l'axe Z. Les contours des différentes sous-parties ont été assemblés, puis le contour obtenu a ensuite dû être simplifié à l'aide de Covadis

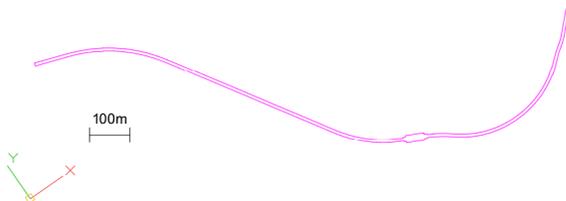


Figure 4 : Contour 2D final issu de 3D Reshaper

La deuxième méthode a consisté en la rédaction d'un script Python utilisant en entrée un nuage au format ASCII et une ligne directionnelle suivant le tunnel. Il a permis de réaliser des coupes successives du nuage de points afin d'extraire de chacune d'entre elles le point d'altitude maximale, et les deux points situés les plus à l'extérieur du tunnel soit les points de tangence définis plus haut. La ligne directionnelle utilisée a été générée avec 3D Reshaper et son extraction d'axe neutre. Les coupes ont été définies par des vecteurs normaux calculés à partir des coordonnées des points composant l'axe neutre du tunnel. Le plan de coupe était alors le plan normal à ce vecteur. Pour chaque point la distance entre ce point et le plan a été calculée, si elle était inférieure à la tolérance fixée par l'utilisateur (dans ce cas fixée à 10cm), le point était conservé. Les points conservés ont ensuite été comparés pour déterminer les points ayant la valeur minimale en X, minimale en Y, maximale en X ou maximale en Y en fonction de la configuration ainsi que la valeur maximale en Z. Les 3 points extraits ont été compilés dans 3 fichiers texte, un pour chaque ligne de tangence. Une fois les nuages des lignes de toutes les portions obtenus et lissés, les polygones ont été créés sur Covadis et reliés entre elles.

b. Plan 2D

Le deuxième mode de modélisation a consisté en un plan 2D. Ce plan avait pour but de reporter tous les éléments présents dans le tunnel, à savoir : les sorties de secours, les détecteurs de fumée,

les tampons d'assainissement, les extracteurs d'air, les panneaux indiquant les sorties de secours, les panneaux indiquant les détecteurs de fumée, les lumières, les feux de signalisation, les barrières optiques de sécurité, les postes d'appel d'urgence, les panneaux de vitesse, les commandes d'éclairage, les lumières de sécurité (rectangulaires), les coffrets électriques.

L'objectif ici a été d'automatiser au maximum la production de ce plan à partir des données à disposition. La première étape a donc été de segmenter chaque élément du tunnel manuellement en effectuant une recherche visuelle des différentes occurrences à l'aide du logiciel 3D Reshaper. En parallèle de cela, une symbologie a dû être mise en place afin de pouvoir représenter les éléments et une table de codification a dû être élaborée. Un nouveau script python a permis de faire le lien entre les nuages segmentés et la codification en calculant pour chaque élément le point moyen du nuage et en y affectant le code du symbole associé. Le script a donc fourni un listing de points codifiés qui a pu être traité grâce à Covadis. Le dessin des symboles a ensuite pu être généré automatiquement et superposé au contour du tunnel. Des séries de plans par thématiques ont ensuite été réalisées pour éviter la superposition de plusieurs symboles. Les coffrets électriques ont été dessinés sur un plan à part et matérialisés avec un code couleur permettant de différencier les coffrets en fonction de leur utilité.

c. Tronçon 3D

Afin de proposer à la CTS une perspective d'exploitation de la donnée numérique 3D, un tronçon du tunnel de 80m environ a été modélisé plus finement en 3D. Cette modélisation a été effectuée sur le logiciel 3D Reshaper. Tout d'abord l'enveloppe du tunnel a été modélisée. Pour cela, une section du tronçon a été extraite et lissée. Elle a ensuite été extrudée le long de l'axe neutre du tronçon calculé précédemment. Pour les éléments du tunnel, deux propositions ont été réalisées : la première était de réaliser des maillages 3D de chaque élément, la deuxième de modéliser ces éléments par des primitives géométriques. Le rendu simplifié utilisant les primitives géométriques a été retenu. Les nuages des éléments ont pour certains été décomposés afin de pouvoir les modéliser au mieux à l'aide des primitives géométriques. Le logiciel Trimble Realworks a également été utilisé, en complément de 3D Reshaper, pour modéliser les primitives cubiques. La colonne sèche présente dans le tronçon a été modélisée de la même manière que l'enveloppe du tunnel, à savoir en extrayant son axe neutre, puis en extrudant le contour d'une de ses sections le long de celui-ci. Tous les éléments ont été texturés avec des couleurs unies afin de bien faire ressortir les éléments. Une visualisation en couleurs réelles n'était pas prévue dans le cahier des charges initial et aurait demandé un mode opératoire et un éclairage adapté. Le modèle final est visible Figure 5.

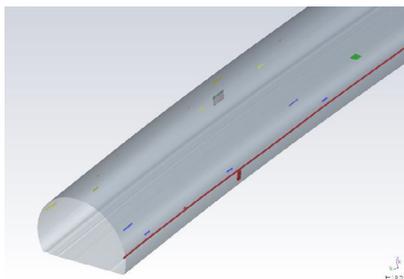


Figure 5 : Modèle 3D final du tronçon

4. Conclusion et perspectives

L'article R. 554-29 du Code de l'Environnement stipule que tous les réseaux enterrés devront être géoréférencés d'ici à 2032. Pour respecter ce cadre réglementaire, la CTS a sollicité l'INSA de Strasbourg avec pour problématique au sens large : « Relever et modéliser le tunnel du tram entre les Halles et Rotonde ». Une méthodologie a donc été mise en place afin d'acquérir un nuage de points géoréférencé. La contrainte de l'ouvrage d'art enterré a nécessité la réalisation d'un cheminement polygonal encadré de part et d'autre du tunnel.

Suite aux mesures terrain, la réflexion s'est portée sur le type de rendu à proposer à la CTS. En complément des contours 3D indispensables au positionnement du tunnel, un plan 2D et un modèle d'un tronçon de tunnel en 3D ont été réalisés.

Cette dernière modélisation a permis à la CTS de mettre un pied dans la 3D avec une simple maquette. A l'avenir des modèles 3D plus poussés ou encore des maquettes BIM pourraient être envisagés. Il faudrait pour cela obtenir des informations concernant la structure des parois, les matériaux les composant ou encore les liens entre les différents éléments.

Un projet de relevé et de modélisation du silo de la gare permettra à l'avenir de parfaire l'acquisition et la connaissance des infrastructures enterrées appartenant à la compagnie de transport.

Modélisation et reconstitution 3D de vestiges du Struthof en relation avec le PCR (Programme Collectif de Recherche) à partir d'éléments historiques



PFE présenté par : **SEDDIK Yassine**
Société d'accueil : *Archéologie Alsace*
Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,
Equipe TRIO, INSA Strasbourg PAGE
Directeur de PFE : *M. Philippe KUCHLER*
Correcteurs : *M. Emmanuel ALBY*
Encadrant : *M. Mathieu KOEHL*



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le camp de Natzweiler est situé dans le massif des Vosges à environ 50 km au sud-ouest de Strasbourg. Il a été construit sur un site à forte dénivellée sur la commune de Natzwiller (France, Bas-Rhin) au lieu-dit "Struthof". Cette localisation à plus de 710 m d'altitude et les conditions climatiques particulières ont mis à rude épreuve les prisonniers et les installations du camp. D'abord utilisée comme zone agricole, la fonction touristique du camp se développe à la fin du 19ème siècle par l'installation d'une pension de famille à proximité des pistes de ski et des départs de randonnée. Après l'annexion de l'Alsace au Reich allemand, la création du camp de concentration, décidée par les nazis en septembre 1940, débute en mai 1941 suite à des explorations géologiques ayant permis la découverte de veines de granit rose.

Les déportés effectuent les importants travaux de terrassement permettant l'installation d'une route d'accès, de terrasses et de baraques. Ils sont également affectés à divers autres travaux tels que l'extraction du granit dans la carrière ou le démontage des moteurs d'avion pour l'entreprise *Junkers*. Au total, 52 000 prisonniers de près de 30 nations différentes sont déportés vers le camp central du "Struthof" ou l'un de ses camps annexes. Environ 22 000 d'entre eux perdent la vie dans ce complexe, ce qui porte le taux de mortalité à près de 40%, taux très élevé compte tenu de la civilité du camp et de son existence tardive. Le camp central compte environ 3 000 déportés en période normale et jusqu'à 6 000 en période d'affluence. En septembre 1944, le camp est évacué. À partir de décembre 1944, un camp d'internement administratif ouvre très rapidement ses portes, sous la responsabilité du ministère français de l'Intérieur, pour enfermer les civils allemands de l'administration d'occupation nazie, les Alsaciens accusés de collaboration ou les miliciens faits prisonniers. La gestion du camp est placée sous la direction du ministère de la Justice de novembre 1945 à sa fermeture en janvier 1949. L'objectif est de "rééduquer" les jeunes adultes condamnés à de longues peines.

Parallèlement, il existe une volonté très rapide de transformer le site en un espace de mémoire, même si elle ne s'accompagne pas toujours du souci de préserver l'ensemble des vestiges du camp. Certaines zones sont sauvegardées tandis que d'autres sont détruites ou profondément transformées. Depuis le début des années 2000, le camp fait l'objet de lourdes campagnes de réaménagement et de restauration. Dans la continuité des problématiques de recherche développées à l'étranger dans plusieurs camps de concentration nazis, principalement depuis les années 1990 et du Programme national de recherche archéologique publié par le Conseil national de l'archéologie en 2016, la première opération d'archéologie préventive est réalisée au "Struthof" en 2018. Conjointement aux opérations d'archéologie préventive, les travaux universitaires menés depuis 2019 ont permis d'établir un inventaire complet de l'aménagement du camp avec l'ensemble de la documentation photographique et cartographique. Chaque aménagement a ainsi pu faire l'objet d'une description et d'une étude critique mise en perspective avec plus de 450 documents iconographiques. Les interprétations et évolutions liées aux différentes phases d'occupation du camp ont ainsi pu être appréhendées. Depuis 2021, l'ensemble de ces études est intégré dans un programme collectif de recherche pluridisciplinaire et les

fouilles archéologiques programmées seront développées dans les années à venir. Ce PFE, qui fait suite à un Projet de Recherche Technologique, vient s'inscrire dans ce programme en vue d'approfondir l'étude de la carrière et plus particulièrement de trois baraquas ainsi que de trois galeries souterraines. Les objectifs principaux pour ce projet sont les suivants :

- Modéliser l'ensemble des infrastructures de la carrière.
- Réaliser une reconstitution des vestiges à partir d'éléments historiques (Maya Autodesk).

Pour réaliser ces objectifs, un certain nombre de sous-objectifs sont à atteindre en amont :

- Lever les bâtiments et galeries au scanner laser terrestre,
- Calculer et générer les nuages de points résultants (FARO Scene),
- Réaliser une campagne photogrammétrique pour texturer les trois galeries (Metashape),
- Compléter la cartographie de la carrière en mettant à jour le MNT entamé durant le PRT,
- Construire un modèle hybride 3D unifiant le MNT, les galeries texturées et les bâtiments avec leur reconstitution (3DReshaper),
- Géoréférencer l'ensemble du projet.

2. Acquisitions et traitement des données

Les acquisitions de données ont commencé durant le PRT avec un levé photogrammétrique au drone de toute la carrière qui a permis de construire un premier MNT de la zone. Les trois bâtiments en ruines (réfectoire, forge et hangar) ont aussi été levés au scanner laser terrestre. Pendant les premiers mois du PFE, certaines parties manquantes des bâtiments ont été scannées et s'est ajouté à cela un scan de la zone d'entrée des galeries pour affiner le MNT ainsi qu'un scan intérieur des trois galeries sans couleur. Tous les levés au scanner laser terrestre sont d'une précision centimétrique voire millimétrique. Toutes les acquisitions ont été levées dans le système Lambert RGF-93.

Ayant besoin de la texture des galeries pour analyser les graffitis, traces d'outils et méthodes d'excavation, le levé lasergrammétrique a été complété par une campagne photogrammétrique à l'intérieur des galeries à l'aide d'un appareil photo sur trépied. Cette campagne a été fastidieuse étant donné les conditions assez complexes de levé en intérieur de grotte : humidité et zones inondées, boue, froid, obscurité, mise au point ardue étant donné l'exiguïté des tunnels... Nous avons donc utilisé des projecteurs en prenant bien le soin d'homogénéiser la lumière pour acquérir la véritable texture des parois des galeries.

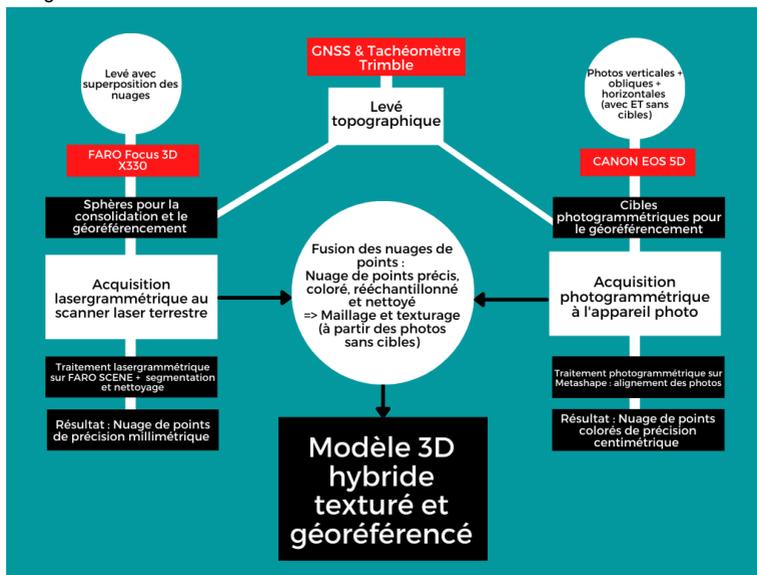


Figure 1 : Méthodologie de modélisation des galeries par fusion de données

Ensuite, le traitement pour les différents levés lasergrammétriques des bâtiments ou de la carrière consistait à consolider et géoréférencer les nuages de points obtenus grâce au relevé des sphères. En revanche, la modélisation des galeries a été plus fastidieuse et la Figure 1 retrace la méthodologie utilisée pour utiliser toutes les données acquises de manière optimale pour obtenir d'une part une géométrie 3D fidèle grâce au levé lasergrammétrique et d'une autre part, une texture réaliste grâce au levé photogrammétrique. La Figure 2 montre une comparaison entre deux photos du fond de la première galerie : une photographie réelle capturée pendant la campagne photogrammétrique à gauche et une capture d'écran à l'intérieur de la modélisation finale de cette même galerie. Le cadrage est à peu près le même pour pouvoir comparer zone par zone les différences qui les séparent, autant sur la géométrie que sur la texture.



Figure 2 : Comparaison entre une photo (à gauche) du fond de la première galerie et sa modélisation (à droite)

3. Reconstitution 3D

L'étape suivante du projet consiste à modéliser les bâtiments tels qu'ils sont aujourd'hui et à reconstituer leur aspect d'antan. La campagne au scanner laser terrestre a permis d'obtenir un nuage dense et détaillé des fondations des bâtiments. Pour la forge, nous disposons d'un étage complet fermé avec cinq pièces et un toit. Cependant, tous ces bâtiments avaient initialement un plancher préfabriqué en bois au-dessus des fondations en béton. Ces planchers ont été démantelés après la guerre et nous disposons aujourd'hui de peu de photos et donc de peu d'informations sur leur architecture détaillée. Notre objectif est donc d'assembler les différentes données archéologiques dont nous disposons, pour en modéliser une version la plus fidèle possible.

La méthodologie de la reconstruction numérique des bâtiments consiste à assembler les techniques basées sur la réalité (balayage laser, photogrammétrie, levé topographique) avec les méthodes de conception architecturale assistée par ordinateur, en utilisant ici Autodesk Maya. Les parties encore existantes peuvent être plus facilement modélisées à l'aide du maillage des nuages denses. En effet, nous disposons de dimensions exactes des fondations et nous pouvons soit digitaliser sur les mailles, soit mesurer puis dessiner directement. Le dessin sur le logiciel de modélisation 3D Maya nécessite l'utilisation de boucles d'arêtes (« edge loops »). Il s'agit d'un logiciel de modélisation utilisant comme entité de référence des polygones qui sont préférentiellement des quadrilatères 3D. Pour les informations manquantes telles que les textures, les hauteurs des étages, les toits, les aspects des fenêtres et des portes, nous nous référons aux images d'archives dont nous disposons ou aux archéologues qui ont travaillé sur ce site pendant quelques années. Étant peu nombreuses, les seules données que nous avons pu obtenir sur les images étaient le nombre et la position des fenêtres, des portes et des cheminées, et nous avons également pu voir le changement de matériaux entre les étages sur les deux plus grands bâtiments (hangar et forge). Sur PhotoModeler, nous avons pu déterminer la hauteur des façades détruites ou incomplètes. Nous avons utilisé des points de contrôle avec des coordonnées connues à partir des nuages de points pour traiter le projet photogrammétrique.

Il y a cependant beaucoup d'informations qui ne sont pas disponibles sur les photos. Par exemple, nous ne pouvons pas voir certaines faces des bâtiments. Les données manquantes ont donc été coordonnées avec les archéologues en se basant sur les bâtiments subsistants ou par un raisonnement logique et, dans certains cas, par interprétation. Un code couleur est appliqué sur les modèles pour montrer les différentes sources de modélisation avec leurs niveaux de connaissance respectifs (Landes et al., 2019). Premièrement, nous avons les données fiables provenant des enquêtes existantes, des différentes acquisitions et des photos telles que les diverses dimensions, les fondations, le nombre de fenêtres, de portes et de cheminées que nous pouvons voir ; les déductions logiques des archéologues (la texture des bâtiments et la conception des portes, des fenêtres et des cheminées par exemple) ; et enfin, l'interprétation / l'hypothèse pour les données manquantes. La méthodologie suivie pour les étapes de reconstruction a été : la modélisation du plus simple au plus complexe, de l'aspect volumétrique aux détails architecturaux, en terminant par les textures (Guidi et al., 2014).

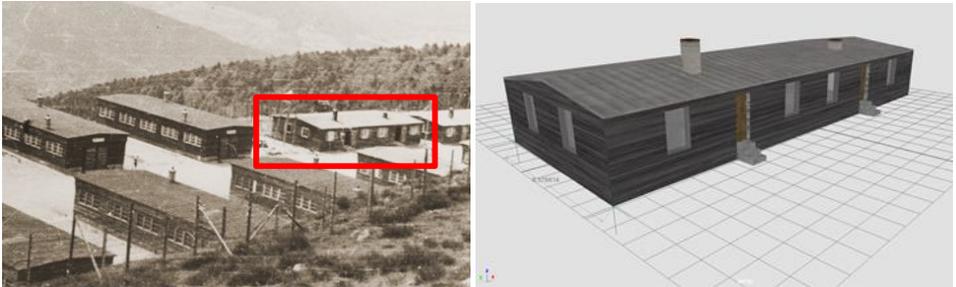


Figure 3 : Comparaison entre la reconstitution avec texture du réfectoire et l'unique photo nette de ce même bâtiment

4. Conclusion et perspectives

Les études archéologiques qui se développent depuis 2018 au camp de concentration de Natzweiler-Struthof montrent ce que cette discipline peut apporter à la connaissance de sites pour lesquels les archives restent parfois muettes ou peu claires. Les bâtiments de la carrière sont un parfait exemple de cette lacune. Il existe actuellement un faible nombre de photographies contemporaines de la période concentrationnaire pour cette partie du camp. De plus, les témoignages de déportés affectés à la carrière et aux ateliers Junkers qui nous sont parvenus sont très rares et peu précis. Enfin, les archives relatives à l'exploitation de la carrière, son aménagement et son utilisation pour l'entreprise Junkers sont peu nombreuses.

Les études archéologiques menées depuis 2020 au sein de la carrière permettent donc de mieux comprendre l'organisation à travers les différentes carrières de roches et les activités industrielles qui y étaient menées pendant la période concentrationnaire. La modélisation des bâtiments et des galeries est importante pour la connaissance de ces installations.

Les modèles 3D fournissent une documentation précise qui peut être utilisée dans des études et des publications scientifiques. Le relevé des galeries permet de mieux comprendre leurs fonctions par l'étude de la répartition des traces d'outils et des marquages peints. Ces maquettes sont également un outil pour proposer des hypothèses de restitution des élévations des bâtiments telles qu'elles étaient pendant la période concentrationnaire. Outre l'aspect scientifique, elles recouvrent également un aspect pédagogique. Elles peuvent être utilisées dans le cadre de projets de valorisation (expositions, visites virtuelles et autres outils pédagogiques) afin que les visiteurs du mémorial du camp de Natzweiler-Struthof (CERD) ou les internautes puissent voir les bâtiments et les galeries qui se trouvent actuellement en dehors du circuit de visite officiel du site ou qui sont inaccessibles pour des raisons de sécurité. La restauration des élévations perdues des bâtiments permettra également une meilleure compréhension des vestiges par le public. En outre, les modélisations offrent une large palette de possibilités d'analyse telles que des coupes, sections, et calculs de pente, et permettent potentiellement d'aboutir sur des vidéos ou des visites en réalité virtuelle. De plus, les bâtiments pourront être décortiqués en découvrant d'une part l'extérieur mais aussi les sous-sols, et pourquoi pas le mobilier ?

Détection et reconstruction 3D d'arbres urbains par segmentation de nuages de points : apport de l'apprentissage profond



PFE présenté par : **Victor Alteirac**
Société d'accueil : **Laboratoire ICube UMR – 7357, équipe TRIO**
Directeur de PFE : **Pierre Kastendeuch**
Correctrice : **Hélène Macher**
Encadrante : **Tania Landes**



1. Définition et objectif de l'étude

Depuis maintenant plusieurs années, les équipes TRIO du laboratoire ICube de Strasbourg et l'équipe PIAF de Clermont Ferrant effectuent des travaux de recherche sur le climat au sein de la ville de Strasbourg. L'objectif de ces travaux est de comprendre les impacts de la végétation en milieu urbain. Alors que l'équipe PIAF se concentre principalement sur l'étude individuelle d'un arbre et son processus de photosynthèse, l'équipe TRIO, a pour objectif de démontrer l'impact de la végétation sur le climat urbain. Pour évaluer ces impacts, un modèle nommé LASER/F a été développé par M. Pierre Kastendeuch, permettant la simulation des échanges radiatifs des objets d'un environnement à plusieurs échelles (rue, quartier, ville) et ainsi prédire les températures. Pour faire ces prédictions d'échanges thermiques, le modèle a besoin de plusieurs informations : les modèles 3D des bâtiments, du sol et des arbres, mais également les informations atmosphériques. L'objectif final de ce projet est d'être capable de réaliser un véritable TIM (Tree Information Modeling) qui viendra enrichir le BIM de la ville, apportant un enjeu écologique supplémentaire.

L'étude de ce PFE s'articule dans un premier temps autour de plusieurs recherches faites précédemment, qui avaient toutes pour objectifs de développer et d'optimiser des algorithmes de squelettisation et reconstruction 3D d'arbres. Par la suite, la thèse de Bournez, (2018) avait pour objectif d'utiliser les modèles de prédictions thermiques et d'évaluer leurs performances. Au cours de cette thèse, plusieurs perspectives d'amélioration ont été évoquées, notamment d'être capable d'augmenter la rapidité de la modélisation et de la reconstruction 3D tout en améliorant les interactions entre les objets environnants. Jusqu'à présent les arbres étaient segmentés manuellement. L'objectif de cette étude est donc d'automatiser cette segmentation, qui facilitera également la modélisation.

Depuis ces dernières années, l'apprentissage profond occupe une place importante dans le domaine de la classification ou de la segmentation automatique. Cette technique d'intelligence artificielle a déjà fourni des résultats plus que satisfaisants pour le traitement d'images 2D. Il s'agit à présent d'appliquer cette même technique sur des nuages de points 3D.

Le déroulement de cette étude se fera en plusieurs parties. Dans un premier temps, il s'agit d'effectuer des recherches sur les techniques d'apprentissages profonds et notamment sur les réseaux de neurones. Dans un second temps, il faut trouver le réseau qui sera le mieux adapté pour résoudre la problématique de cette étude. Puis, pour finir, il faut être capable d'utiliser et d'analyser le réseau afin de fournir un protocole d'acquisition et de traitement des données 3D pour une utilisation future du réseau ou d'éventuelles perspectives d'amélioration.



2. Étude bibliographique

L'utilisation d'un réseau de neurones est la partie clé de notre étude. En effet, bien qu'il s'agisse d'un projet visant à faire avancer le projet COOLTREES dans la quantification d'îlots de chaleur urbains, il permet également de mettre en exergue les performances des méthodes d'apprentissages profonds sur des données 3D telles que les nuages de points.

La classification et la segmentation de nuages de points sont deux processus très similaires. Alors que la classification se concentre sur l'ensemble du nuage de points, la segmentation va chercher à isoler chaque point individuellement. La documentation se concentre majoritairement sur la classification, mais les méthodes de segmentation sont de plus en plus nombreuses.

Jusqu'à présent, on peut différencier deux types d'algorithmes, le premier type fait appel aux réseaux de neurones et le second type à des méthodes « traditionnelles ». Parmi celles-ci, on retrouve principalement des algorithmes basés sur la détection de caractéristiques mathématiques comme les normales ou alors les méthodes d'apprentissage par arbre de décision. Ces méthodes, bien que très contrôlées, sont parfois difficiles à mettre en place et nécessitent souvent l'intervention d'un expert pour être développées.

Les secondes méthodes basées sur les réseaux neuronaux sont bien plus délicates. En effet, ce genre de méthode a déjà fait ses preuves sur des problèmes de classification ou de segmentation d'images 2D. Or la segmentation d'objets 3D est bien plus complexe et les algorithmes n'ont pas encore atteint un degré de maturité satisfaisant. On peut diviser ces méthodes en deux catégories, les méthodes indirectes (plus anciennes) et les méthodes directes (nouvelles). Les méthodes indirectes consistent simplement à effectuer des opérations préalables au traitement du nuage de points, comme une voxelisation ou des simulations photo autour du nuage étudié. L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent d'avoir accès aux outils de traitement d'images 2D (Convolutions, opérateurs morphologiques, etc.). Cependant, l'ajout d'étapes de traitement occasionne une perte d'informations des données et donc une perte de précision de segmentation. Depuis 2017, un nouveau réseau est apparu : *PointNet* (Qi *et al.*, 2017). Ce dernier introduit le concept des méthodes directes, visant à utiliser directement le nuage de points brut sans traitement préalable. Pour créer ce nouveau genre de réseau, trois problèmes sont identifiés :

- Invariance de transformation : les prédictions du réseau doivent être insensibles aux transformations géométriques (rotation, translation).
- Invariance de permutation : un nuage de points possède des données non ordonnées, pour N points, N! permutations sont possibles.
- Interaction ponctuelle : l'interaction entre les points et leur voisinage est une information importante, un seul point ne peut pas être traité individuellement.

Ces trois problèmes principaux permettent de définir une base de travail sur les méthodes directes. *PointNet* est le premier réseau proposant cette nouvelle approche novatrice, il possède un défaut principal : son manque d'efficacité à capturer les structures locales de points. Ce défaut l'empêche donc de fournir de bons résultats sur les opérations de segmentation et des résultats corrects pour la classification.

Depuis 2017 jusqu'à aujourd'hui, de nombreux réseaux font leur apparition pour pallier le problème de structure locale. On peut citer *DGCNN*, *PointCNN*, *GSNet* ou encore *PointNet ++*. Il faut à présent choisir le bon réseau pour répondre à notre problématique. Pour cela de nombreuses études ont été faites. Dans un premier temps l'étude de Guo *et al.*, (2020) effectue un récapitulatif des réseaux existants et différents tests sur ces derniers pour évaluer leurs performances. *PointNet ++* et *DGCNN* semblent être les plus performants. Pour choisir parmi ces deux réseaux une dernière étude, à savoir Chai, Stenzel and Jost, (2020) est examinée. Sur une même base de données, les deux réseaux sont évalués et *PointNet ++* offre de meilleurs résultats. Nous allons donc choisir ce réseau pour répondre à la problématique de ce PFE.

3. Base de données et entraînement

Le réseau de neurones apprend grâce à l'erreur qu'il commet. Admettons que nous avons un nuage de points dont nous connaissons la vérité terrain. Ce dernier est passé à travers le réseau et un résultat est annoncé : la prédiction. Cette prédiction est comparée avec la vérité terrain, ce qui donne l'erreur de prédiction du réseau. Cette erreur est par la suite rétro propagée dans l'ensemble des neurones du

réseau afin d'ajuster les paramètres et ainsi alimenter la phase d'apprentissage pour permettre ensuite une meilleure prédiction.

Le choix des données d'entrée est donc important, il nous faut des bases de données dont la vérité terrain est connue et qui soient en lien avec notre problématique.

3.1) Base de données Dublin City 3D

La première base de données utilisée est Dublin City 3D (Zolanvari *et al.*, 2019). Contenant 12 nuages de points de la ville de 250 x 250m chacun, classifiée en 4 classes (sol, végétation, bâtiments et autre). Cette première base de données nous permet d'ajuster les hyperparamètres du réseau afin de l'adapter à une problématique de données urbaine. Sur les premiers tests, avec le paramétrage d'origine de PointNet ++, nous arrivions à un taux de bonne classification sur un nuage de 60%. Après les premiers ajustements, un taux de 86% est atteint, un exemple de segmentation est présenté dans la figure 1 :

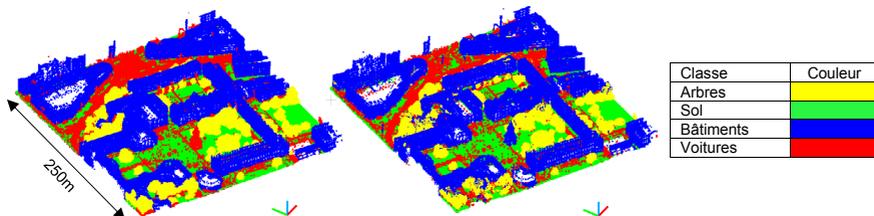


Figure 1 : Premiers résultats de segmentation obtenus, vérité terrain à gauche et la prédiction à droite

Cette première segmentation offre de bonnes perspectives. Cela nous indique dans un premier temps que les solutions d'apprentissage profond pour la segmentation de nuage de points peuvent être efficaces. De plus, les modifications que nous avons apportées au réseau rendent ce dernier plutôt polyvalent, selon la problématique, ce dernier peut être ajusté pour des segmentations d'intérieur ou d'extérieur.

3.2) Bases de données personnelles

Bien que les données de DublinCity soient conséquentes et représentent des données extérieures, elles ne permettent pas de répondre concrètement à la problématique, car il s'agit de données LiDAR aéroportées. Or cette étude vise à travailler avec de la donnée LIDAR terrestre mobile ou statique. C'est pour cela que nous décidons de faire l'acquisition de nos propres données.

Deux campagnes de mesures ont été réalisées avec le scanner laser statique 3D : FARO FOCUS X330. La première se situe Boulevard de la Victoire et la seconde avenue Jean Jaurès à Strasbourg. L'avantage de ces données est la variété d'arbres présents : 3 essences différentes, platanes feuillus / taillés, ainsi que les tilleuls argentés. Cela permet d'évaluer la précision du réseau sur des données similaires et ainsi voir s'il est capable de faire une différence. Avant d'arriver jusqu'à cette étape, nous devons quantifier les données qui seront nécessaires pour l'entraînement du réseau. Le scanner laser utilise nous permet d'avoir l'information de couleur en plus des coordonnées des points. De plus, des caractéristiques peuvent être ajoutées au nuage comme les normales des points, la rugosité ou encore les rayons de courbure. Les différents types de données sont donc analysés via plusieurs entraînements et fournissent les résultats suivants présentés dans le tableau suivant :

Données en entrées	Précision (%)	mIoU Validation (%)	mIoU Test (%)
XYZ + N	97	72	65
XYZ + RVB	96	70	61
XYZ + N + RVB	97	84	64
XYZ + R	96	74	68
XYZ + R + C	96	76	38
XYZ + N + RVB + R + C	97	82	81

Tableau 1 : Résultats d'entraînement suivant différentes caractéristiques. Avec : XYZ = Cordonnées, RVB = Couleurs, N = Normales, R = Rugosité, C = Rayon de courbure

IoU (Intersection Over Union) : Représente le taux de bonne segmentation du nuage.

Cela nous donne un premier aperçu des données en entrée idéales pour optimiser l'apprentissage du réseau. Globalement les meilleurs résultats sont offerts lorsque toutes les caractéristiques sont prises en compte en même temps, en particulier sur le mIoU de données tests. Nous avons une perte de précision allant de 10 à 40% entre la segmentation de validation et de test.

Le meilleur résultat est atteint sur toutes les caractéristiques et le résultat visuel est présenté sur la figure 2 :

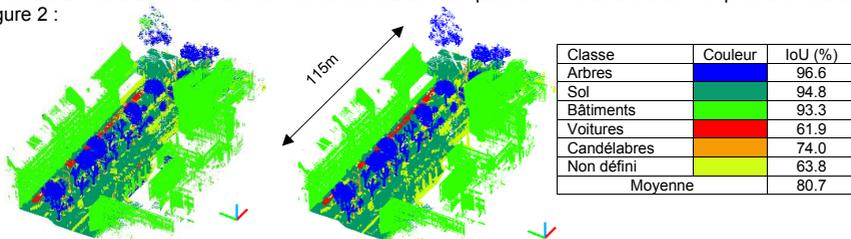


Figure 2 : Premiers résultats de segmentation visant à séparer les arbres du reste de l'environnement. Prédiction à gauche et vérité à droite

Sur cette première segmentation, l'ensemble des arbres est correctement segmenté, de plus le sol et les bâtiments sont bien séparés sans résidu entre les classes. Cela induit donc que ce premier protocole fonctionne correctement. Ce même protocole est réappliqué pour la segmentation de différentes phénologies d'arbres, présenté sur la figure 3 :

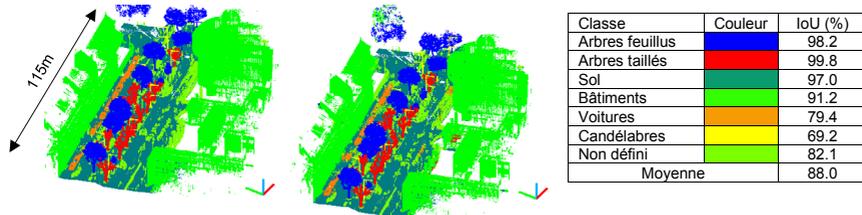


Figure 3 : Résultats de la segmentation final cherchant à différencier les différentes phénologies. Prédiction à gauche et vérité à droite

Cette segmentation finale apporte la preuve que notre réseau est capable de faire la différence entre plusieurs types d'arbres, dans le cas présent entre des arbres taillés et non taillés (rouge et bleu).

4. Conclusion

Nous pouvons conclure sur cette étude que la solution d'apprentissage profond semble plutôt efficace avec des taux de bonne classification approchant les 80-85% selon les données. Par la suite, on peut définir un premier protocole d'acquisition de données. Pour ce qui est de l'acquisition, un scanner laser statique est idéal. L'apport de l'information RGB permet d'ajouter des caractéristiques, mais également une simplification de la création des données d'entraînement. La densité minimale des nuages de points doit être de 2cm. Pour ce qui est de la préparation des données, une première segmentation manuelle doit être faite afin de créer nos données d'entraînement. Sept classes sont conseillées : arbres feuillus, arbres taillés, sol, bâtiments, voitures, candélabres et non défini. Lors de ces premiers essais, les données sont tirées de 50 mètres linéaires de voirie pour les données d'entraînement et 20 mètres pour les données de validation. Par manque de temps et de moyens, aucun test n'a pu être fait sur une acquisition au scanner laser dynamique.

Pour la suite de ce PFE, les perspectives d'amélioration vont consister dans un premier temps d'évaluer les limites de segmentation du réseau et de déterminer plus précisément les données nécessaires via l'ajout de l'intensité ou de l'infrarouge thermique. Le réseau *PointNet++* est ancien, de nouveaux réseaux plus performants sont créés chaque année, utiliser l'un de ces réseaux permettrait d'augmenter les résultats obtenus voire d'être capable de différencier les essences d'arbres.

5. Références

- Bournez, E. (2018) Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains: approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles. Université de Strasbourg.
- Chai, K. Y., Stenzel, J. and Jost, J. (2020) 'Generation, Classification and Segmentation of Point Clouds in Logistic Context with PointNet++ and DGCNN', in 2020 3rd International Conference on Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE), Oxford, United Kingdom: IEEE, pp. 31–36. doi: 10.1109/IRCE50905.2020.9199248.
- Guo, Y., Wang, H., Hu, Q., Liu, H., Liu, L. and Bennamoun, M. (2020) 'Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey', IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, p. 27. doi: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- Qi, C. R., Su, H., Mo, K. and Guibas, L. J. (2017) 'PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation', in Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., pp. 652–660. doi: 10.1109/CVPR.2017.16.
- Zolanvari, S. M. I., Ruano, S., Rana, A., Cummins, A., da Silva, R. E., Rahbar, M. and Smolic, A. (2019) 'DublinCity: Annotated LiDAR Point Cloud and its Applications', arXiv:1909.03613 [cs]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1909.03613>.

Acquisition lasergrammétrique d'ouvrages d'art pour l'interopérabilité BIM-SIG, cas pratique du syndicat mixte "Route de Guadeloupe"

PFE présenté par : **Sonia Sermanson**
Société d'accueil : **SL TOPO SARL**
Directeur de PFE : **Louis Caudrelier**
Correctrice : **Hélène Macher**
Encadrant : **Louis Caudrelier**

SLTOPO S.A.R.L.

1. Contexte et objectifs

Le présent projet de fin d'études (PFE) émane de la volonté d'approfondir l'utilisation de maquettes numériques modélisées selon le processus BIM (Building Information Modeling).

Ce souhait provient à la fois du client, ici « Route de Guadeloupe » mais aussi de l'entreprise. D'une part, les géomètre-topographes ont conscience des multiples potentialités des modèles BIM, et sont souvent confrontés aux difficultés des clients quant à l'utilisation de ces supports. D'autre part, les clients se rendent compte de l'exhaustivité liée à ce type de maquettes mais se heurtent à de multiples obstacles pour en user pleinement. « Route de Guadeloupe », destinataire de cette étude, est régi par le Département et la Région. Cet établissement créé sous forme d'un syndicat mixte, a en charge la gestion des routes départementales et nationales de l'île.

La tendance actuelle induit la démocratisation des maquettes numériques enrichies d'informations. Elle invite fortement à inscrire le BIM dans toutes les étapes de vie d'une infrastructure. De prime abord, la maquette BIM rend compte des éléments structurels de l'ouvrage, et offre de surcroît la possibilité de renseigner pleinement le modèle numérique. Les détails allant jusqu'à la nature ou la référence des matériaux employés sont identifiables dans la maquette. Il est donc possible de modéliser divers éléments avec un maximum d'indications. Malgré ces multiples potentialités, la maquette BIM reste focalisée sur l'élément modélisé, rendant ainsi compte des informations intrinsèques à l'ouvrage.

Parallèlement, le SIG (Système d'Information Géographique) vise à contextualiser chaque élément. Le positionnement cartographique permet de géolocaliser les objets à gérer, donnant à la fois une vision individuelle et une perception globale sur l'ensemble des ouvrages. Dans une optique de gestion courante ou de gestion d'urgence, cette double compétence apporte des informations extrinsèques à l'ouvrage modélisé.

L'association du BIM et du SIG se profile ainsi comme un atout pour le gestionnaire des infrastructures. Ce support vise à être exploité pour du suivi d'ouvrage, et ouvre la voie vers d'autres aspects plus larges tels que l'archivage de données, l'historique d'intervention, l'analyse statistique etc. Toutes ces actions de gestion possibles à partir d'un SIG seront jumelées à la maquette BIM, montrant de ce fait, la complémentarité de ces deux domaines.

Cette étude vise donc à corréler le suivi d'ouvrage d'art avec la coopération des domaines du BIM et du SIG. Dans un premier temps, l'objectif pour ce cas pratique de "Route de Guadeloupe" est de recenser les ouvrages d'art sous la gestion de cet organisme via un SIG. Ceci en s'appuyant sur les modèles numériques BIM de ces infrastructures. La première partie du projet consiste donc à l'acquisition des données par lasergrammétrie terrestre, puis le traitement de nuages de points pour la restitution de maquette BIM.

Dans un second temps, le but sera de proposer des solutions permettant d'approfondir l'usage du modèle BIM avec une perspective technique telle que la maintenance d'ouvrages, et une perspective gestionnaire telle que la qualification et la quantification des interventions.

2. Acquisitions et traitements de données

Relevé des ouvrages d'arts par lasergrammétrie terrestre

Le relevé lasergrammétrique est réalisé avec un scanner laser statique Leica RTC 360. La méthode d'acquisition consiste à effectuer un cheminement au-dessus et au-dessous du tablier de l'ouvrage, afin de mesurer un maximum d'éléments composant l'infrastructure.

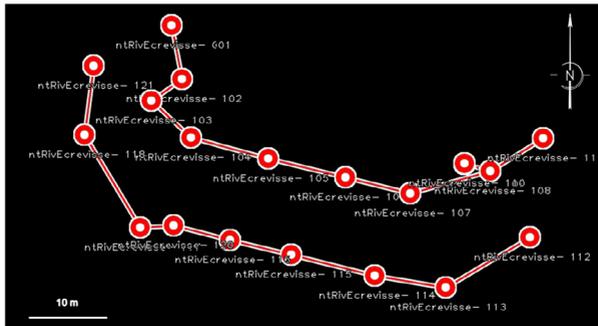


Figure 1 Cheminement au laser scanner statique

Consolidation des nuages de points

La consolidation des nuages de points est réalisée via le logiciel Cyclone Register de Leica. La technique utilisée pour ce traitement repose sur l'application de contraintes nuage-nuage, basée sur la recherche de points homologues entre deux nuages de points. La méthode est appliquée à chaque position du scanner en vue d'obtenir un recalage relatif des nuages de points. Ce calcul itératif aboutit à l'assemblage d'un unique nuage de points, qui révèle la géométrie d'ensemble de l'infrastructure mesurée.

Le géoréférencement indirect est mis en place via des cibles disposées sur des points spécifiques lors du balayage laser. Ces points de référence sont physiquement matérialisés et leurs coordonnées sont mesurées par relevé topographique ou au GPS par la technique de positionnement satellitaire.

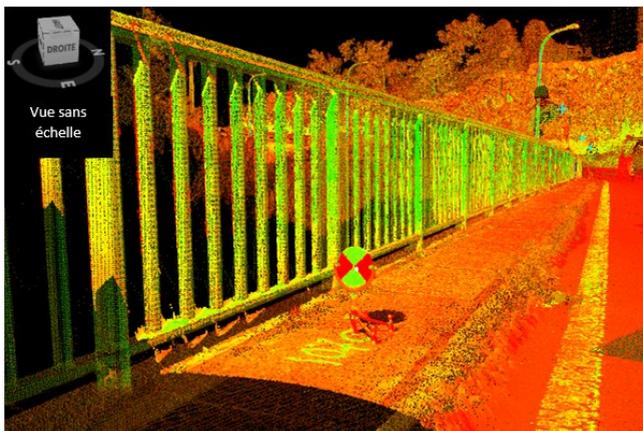


Figure 2 Visualisation du géoréférencement

Modélisation des maquettes BIM

Les maquettes BIM sont réalisées sur la base de nuages de points consolidés et géoréférencés. La méthode de modélisation peut être complétée par des plans topographiques, ou encore des plans d'exécution dans le but d'obtenir une maquette la plus complète possible. Cependant, afin de correspondre aux attentes dans le SIG, les méthodes de modélisation et l'organisation des éléments constituant le modèle doivent être établies au préalable.

3. Les maquettes BIM et le SIG

L'interopérabilité et la convergence BIM-SIG

L'interopérabilité peut être définie comme la capacité d'un système (logiciel, programme informatique...) à garantir l'interprétation cohérente, par d'autres systèmes, des données qu'il a générées. L'intérêt de ce process est de faciliter la diffusion, la disponibilité, l'utilisation et la réutilisation des données par un grand nombre d'acteurs.

La question de l'interopérabilité entre les maquettes numériques issues d'un processus BIM et les systèmes d'information géographique est incontournable dans notre domaine. Elle s'impose pour l'intégration de ces numérisations dans leur contexte géographique, avec l'incorporation des données sémantiques et géométriques. La convergence BIM-SIG se traduit donc par la capacité d'utiliser ces deux supports conjointement, en conservant la cohérence, la qualité et la quantité de données. Ici réside un avantage conséquent de l'association du BIM et du SIG, qui permettra de croiser l'utilisation de modèles tridimensionnels et de contenus SIG.

Les modèles numériques 3D intégrés au sein du SIG

Notre cas pratique s'appuie sur la solution logicielle Arcgis Pro, qui permet d'importer directement des maquettes BIM. Le logiciel supporte à la fois les formats .rvt (Revit) et .ifc (Industry Feature Class). De cette manière, la géométrie des modèles est traitée sous forme d'objets multipatch, et la sémantique est organisée sous forme de tables attributaires. Le format multipatch est un objet SIG qui stocke un ensemble de faces pour représenter un objet 3D dans une base de données. Les faces contiennent des informations relatives à la texture, la couleur, la transparence et la géométrie. Ce format offre une visualisation fidèle de l'objet modélisé et géolocalisé, dont chaque sommet de la géométrie multipatch est liée à des coordonnées.

Néanmoins l'import des modèles numériques doit satisfaire les utilisations projetées. La maquette peut être un élément visuel inséré dans le SIG. Toutefois, les volontés de suivi d'ouvrages, d'archivage, d'estimatifs et de quantitatifs impliquent la présence de données spécifiques à importer de la maquette vers le SIG. Ceci impose des contraintes à prendre en compte lors de la modélisation et des manipulations à mettre en place lors de l'intégration des données.

L'objectif par la suite est de proposer à « Route de Guadeloupe » des solutions pratiques, facilement malléables et quelque peu automatisées pour mettre en corrélation leurs suivis d'ouvrages et les maquettes BIM des infrastructures au sein de leur SIG. Avec la solution logicielle Arcgis Pro mise à disposition pour ce projet, il devient possible d'importer et de lier ces différentes sources de données. Le module « Data interoperability » sera néanmoins le socle de cette interactivité entre ces divers standards et formats. Les données modélisant l'environnement des ouvrages seront un élément supplémentaire mais non superflu. La situation spatiale de l'ouvrage sera appréciée pour un rendu visuel et pourra surtout contextualiser la maquette, pour faciliter sa compréhension par les décisionnaires.

La maquette numérique au sein du SIG pourra héberger un ensemble d'informations avec l'avantage d'une interface cartographique. Elle fera le lien entre les caractéristiques internes et externes à l'ouvrage. La démarche d'interopérabilité pourra faire du SIG une source d'information unique en liant à la maquette des documents relatifs aux ouvrages tels que les plans topographiques, plans de réseaux, ou encore les plans d'exécution.



Figure 3 Vue d'un modèle BIM dans Arcgis Pro – Pont de la rivière aux écrevisses, Saint-Claude, Guadeloupe

4. Conclusions et perspectives

La volonté de tirer profit des maquettes BIM et de plus en plus présente chez les acteurs territoriaux. Au-delà de leur atout visuel, ces modélisations sont des outils d'informations et ne sont pas encore totalement insérées dans leurs processus d'activité. Pourtant, ces agents du territoire sont conscients que le passage au BIM apportera des avantages conséquents pour leurs pratiques professionnelles. Ce projet de fin d'études s'inscrit dans ce contexte de transition, visant à valoriser les maquettes BIM produites par les géomètre-topographes et malheureusement sous exploitées par les clients. Axé sur le cas pratique du syndicat mixte « Route de Guadeloupe », le projet a un point de vue global et regroupe les phases suivantes :

- Relevés lasergrammétrique d'ouvrages d'art
- Traitement de données pour la modélisation BIM
- Exploitation des données BIM dans un SIG

La maquette BIM produite sera un support multiple. Elle pourra être utilisée pour des études techniques de mises aux normes parasismiques et être considérée en tant que registre d'informations. Le modèle indiquera la structure de l'ouvrage, pourra intégrer ses réseaux et les interventions réalisées. En s'appuyant sur la solution logicielle Arcgis Pro, le présent PFE (Projet de Fin d'Études) propose à « Route de Guadeloupe » des solutions pour utiliser ces livrables BIM dans un contexte SIG. Ces propositions passent par l'intégration des maquettes numériques, la sélection et la recherche des données à incorporer, l'import des opérations de suivi.

Ceci pour permettre au gestionnaire d'obtenir une vision complète sur ses ouvrages d'art, à partir d'un unique outil. La centralisation de l'information et sa disposition en trois dimensions permettra au client de faciliter et d'optimiser ses méthodes de travail.

En guise de perspectives d'évolution, les solutions présentées lors de ce projet pourront être améliorées notamment au niveau de l'automatisation des process. Apportées sous forme d'outils dans le logiciel SIG, les étapes des processus pourront être optimisées pour réduire les temps de traitement. De plus, la démarche induite pourra être découplée en intégrant le service DSI de l'organisme pour l'organisation des accès de fichier et le stockage des données livrées.

A l'heure actuelle, les agents de « Route de Guadeloupe » accomplissent les visites d'ouvrages via une application interne reliée à une base de données non intégrée à leur SIG. La réalisation de ces opérations de suivi pourrait se faire sur la base des maquettes BIM, via des services web à partir du SIG mis en place. De ce fait, les opérateurs pourraient identifier les éléments de l'ouvrage en trois dimensions, et auraient accès au modèle BIM directement sur le terrain. Les annotations et les remarques de visite pourraient se faire directement sur le contenu géométrique 3D. Ceci permettrait d'avoir une localisation précise des défauts constatés, pour aboutir à un stockage des informations directement dans la maquette BIM et conjointement dans le SIG.

L'avantage d'une interface SIG apportera une valeur ajoutée pour la gestion de crise par l'élaboration de simulations en cas de situation critique, et pourra servir de support d'analyses géospatiales.

Détection d'ouvertures par segmentation sémantique de nuages de points 3D intérieur/extérieur : apport de l'apprentissage profond

PFE présenté par : **Camille Lhenry**
Société d'accueil : **Laboratoire ICube UMR 7357**
Directrice de PFE : **Tania Landes**
Correcteur : **Arnadi Murtiyoso**
Encadrante : **Hélène Macher**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre de l'ANR BIOM (Building Indoor/Outdoor Modeling), visant à la modélisation automatique et simultanée de l'intérieur et de l'extérieur de bâtiment pour réaliser une représentation BIM. Le BIM consiste en la création d'une plateforme digitale intelligente permettant la gestion du bâtiment le long de son cycle de vie. Dans le cas de bâtiments existants (BIM tel que construit), la création de ces modèles requiert des informations sémantiques et géométriques. Pour atteindre ce but, les scanners laser sont largement utilisés, car ils permettent de collecter l'information géométrique du bâtiment sur la base d'un nuage de points. Néanmoins, la tâche de sémantisation du nuage est une étape chronophage et majoritairement manuelle. Les modèles BIM tel que construit sont alors souvent incomplets et entachés d'erreurs.

Parallèlement, l'apprentissage profond et l'intelligence artificielle sont des thématiques récurrentes dans de nombreux domaines de recherches et notamment pour l'automatisation des traitements des nuages de points. De façon simple, l'apprentissage profond a pour objectif d'apprendre à un programme informatique une représentation des données afin qu'il soit capable d'en prédire la nature ou de différencier ses éléments, dans le cas d'une segmentation sémantique. Ce concept s'appuie sur une imitation de la réflexion humaine, appelée réseau de neurones. Très utilisée pour le traitement d'images, l'application des techniques d'apprentissage profond aux nuages de points est une discipline émergente faisant face à de nombreux défis, comme la nature non structurée des données ou encore la faible disponibilité de jeux d'apprentissage.

Le but de ce projet de fin d'études est donc d'implémenter des réseaux de neurones traitant de nuages de points, dans le contexte de la segmentation d'ouvertures (fenêtres et portes) pour automatiser le processus menant du nuage de points à la maquette numérique. L'objectif final est de qualifier la solution d'apprentissage profond pour répondre à cette problématique, en faisant ressortir ses points forts, ses limites ainsi que des perspectives d'améliorations.

2. L'application des réseaux de neurones aux nuages de points

A. Concept théorique du réseau de neurones

Un réseau de neurones, aussi appelé perceptron multicouche (MLP), peut être assimilé à une représentation mathématique du cerveau. Il est composé de plusieurs unités de calcul, les perceptrons, organisés en couches successives. Chaque perceptron est associé à deux paramètres, appelés poids et biais.

Durant une phase d'apprentissage, le réseau va tenter d'optimiser ses paramètres afin de pouvoir réaliser au mieux la tâche qui lui est confiée. Pour cela, une base de données d'entraînement, où chaque donnée est associée à sa vérité-terrain, est nécessaire. Dans le cas de l'étude, il s'agit de nuages de points dont la segmentation sémantique est connue. Le réseau effectue des prédictions sur cette base de données, et les compare aux résultats attendus. L'erreur de prédiction est rétro-propagée dans les couches du réseau, afin de mettre à jour les valeurs de ses paramètres. Ce

processus est répété jusqu'à atteindre un minimum d'erreur de prédiction. Plus la base est diversifiée, plus les capacités sémantiques du réseau de neurones entraîné seront généralisables à des données extérieures. Une fois le réseau de neurones entraîné, il peut être utilisé pour segmenter de nouvelles données.

B. Les réseaux de neurones pour les nuages de points

Les réseaux de neurones traitants des nuages de points se divisent en deux approches : les méthodes indirectes, utilisant une représentation intermédiaire du nuage pour effectuer la segmentation et les méthodes directes, exploitant directement la données 3D.

Il existe deux types de méthodes indirectes : les approches de projection et de discrétisation du nuage. Elles permettent de structurer la données 3D afin d'utiliser des opérateurs mathématiques usuels et d'éviter les problématiques engendrées par l'utilisation d'un nuage de points discret et désordonné. Malgré leur avantages, ces méthodes impliquent des pertes d'information et de coûts de calculs élevés. Ainsi, les approches directes seront préférées dans cette étude.

Les méthodes ont été développées pour traiter le nuage de points sous sa forme brute. Pour contrer la perte d'information impliquée par la nature désordonnée des données initiales, ces approches développent des mécanismes pour explorer le voisinage des points. Certaines tentent d'agréger les caractéristiques du nuage à plusieurs échelles et d'autres essaient d'adapter les produits de convolution à la structure irrégulière des données.

PointNet, développé par Qi et al., (2017a) est l'architecture pionnière dans ce domaine. Composé dans un enchaînement de MLP, ce réseau de neurones concatène les caractéristiques globales et locales d'un nuage de points pour réaliser la segmentation sémantique. Néanmoins, ne permettant pas d'étudier les relations de voisinage, une version améliorée de ce réseau de neurones a été proposée ultérieurement par Qi et al., (2017b), appelée PointNet++. Cette architecture a la capacité d'extraire des caractéristiques à plusieurs échelles du nuage de points et de les combiner de manière intelligente, permettant d'explorer le voisinage des points. Très populaire, ce réseau de neurones bénéficie de multiples implémentations Python libres d'accès. De par ses performances et son accessibilité, cette solution sera retenue pour l'étude.

3. Tests réalisés sur PointNet++

A. Base de données utilisées

Le réseau de neurones PointNet++ a été entraîné et testé sur quatre bases de données différentes, présentées dans la figure 3.



Figure 1 : Visualisation d'échantillons des bases de données utilisées pour l'étude : de gauche à droite : Rue Monge 2014, VIGO RGB, VIGO Thermique, Musée Zoologique

Pour l'étape d'apprentissage, les bases de données VIGO thermiques, VIGO RGB et Musée Zoologique ont été labellisées manuellement avec CloudCompare. La base Rue Monge 2014, dont la labellisation était disponible au préalable, correspond à une rue parisienne présentant des bâtiments d'architecture haussmannienne. Les bases de données VIGO contiennent six bâtiments de la rue Goethe, Strasbourg.

B. Hyper-paramètres et caractéristiques optimales du nuage de points

La phase d'entraînement du réseau de neurones peut être contrôlée par des variables appelées hyper-paramètres. Il convient alors de trouver les valeurs optimales de ces hyper-paramètre pour la segmentation d'ouvertures. Un nuage de points pouvant être composé de millions de points, il est préalablement divisé en plusieurs sous-ensembles appelés bloc avant d'être traité par le réseau de neurones. En particulier, les dimensions et le nombre de points de ces blocs (limité à 4096 points au maximum) sont des hyper-paramètres de la phase d'apprentissage.

Les tests réalisés ont aussi pour but de déterminer les caractéristiques idéales d'un nuage de points pour segmenter les ouvertures de bâtiments. Pour cela, l'impact des couleurs RGB, de l'information thermique, de la densité de points au sein du nuage ou encore des caractéristiques géométriques 3D sur la segmentation des bâtiments a été étudié.

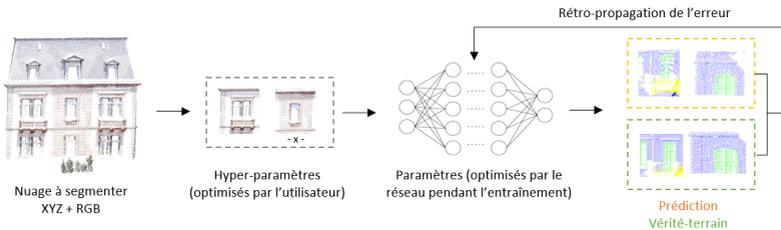


Figure 2 : Workflow de l'entraînement du réseau PointNet ++, illustré sur la base VIGO RGB

4. Analyse des résultats

Les résultats sur les premiers tests permettent d'effectuer les analyses suivantes.

Les fenêtres et les portes sont, par nature, des éléments difficiles à segmenter dans un nuage de points. En particulier, la classe fenêtre est caractérisée par un manque de données, car le faisceau laser ne peut acquérir des points sur des surfaces transparentes. Ensuite, les différents styles architecturaux et les multiples aspects que peut prendre des ouvertures (si elles sont ouvertes, fermées, couvertes pas un store, etc.) en font des classes complexe et hautement variable. Enfin, les portes sont sous-représentées dans une façade, ce qui affecte d'autant plus la qualité de leur segmentation. En effet, le réseau de neurones minimisant un critère d'erreur globale lors de la phase d'apprentissage, cette classe est négligée, car de mauvaises prédictions sur ces éléments affectent peu l'erreur totale du réseau.

Les tests menés en parallèle sur la base VIGO thermique et VIGO RGB démontre que l'information de température est plus pertinente que la couleur pour la segmentation des ouvertures dans un nuage de points. En effet, la teinte des bordures des ouvertures est souvent variable ou proche de celle de la façade, compliquant leur segmentation. En revanche, la déperdition de chaleur provoquée par les ouvertures est caractéristique, facilitant leur extraction par le réseau de neurones.

D'après les tests réalisés sur la base VIGO Thermique + 3D-FEAT, l'apport des caractéristiques 3D n'est pas concluant quant à la segmentation des ouvertures dans un nuage de points. Néanmoins, cette piste mériterait une étude plus approfondie en testant d'autres caractéristiques que celles utilisées dans l'expérience. Un comparatif des résultats obtenus sur les trois bases de données VIGO est présenté sur la figure 4.

Concernant les hyper-paramètres de la phase d'apprentissage, l'étude de la taille des blocs montre que l'information de contexte est plus pertinente pour le réseau de neurones qu'une haute densité de points au sein d'un bloc. En effet, les motifs des ouvertures étant souvent répétitifs pour une même façade, un bloc de grande dimension permet la visualisation de cette périodicité lors de l'entraînement

du réseau et favorise la détection de ces éléments. Néanmoins, la densité de points étant plus faible que pour un bloc plus petit, la segmentation est peu précise, comme le montre la figure 3. Des tests sont en cours sur la base du Musée Zoologique, pour étudier l'apport de la densité dans la précision de segmentation du nuage.

De manière générale, il convient de mettre en perspective la qualité des résultats obtenus avec la faible quantité de données d'apprentissage disponible pour l'étude. Cette quantité limitée affecte la généralisation des réseaux entraînés et il est possible que de meilleurs résultats de segmentation soient atteints pour les ouvertures avec des bases de données plus conséquentes.

Comme cela a été fait dans le domaine du traitement d'images, un effort collectif est nécessaire pour la création de bases de données publiques, afin de pouvoir exploiter le plein potentiel des réseaux de neurones pour la segmentation de nuages de points de bâtiments et l'automatisation de la création de maquette BIM.

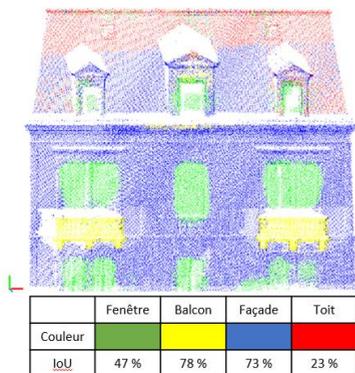


Figure 3 : Résultat sur la base VIGO thermique
IoU : *Intersection over Union* : critère de qualité de segmentation

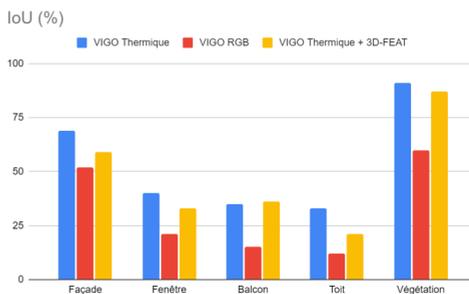


Figure 4 : Comparaison des résultats de segmentation obtenus sur les bases de données VIGO Thermique, VIGO RGB et VIGO Thermique + 3D-FEAT.

5. Conclusion

L'objectif de ce PFE était d'analyser l'apport de d'apprentissage profond pour la segmentation d'ouvertures dans un nuage de points, dans le but d'automatiser le processus Scan-to-BIM. Parmi les solutions proposées, le réseau de neurones PointNet++ a été retenu pour l'étude, de par sa popularité et sa facilité d'implémentation. Les tests menés sur différentes bases de données ont permis de conclure que l'information thermique est optimale pour la segmentation des ouvertures dans un nuage de points. Ces éléments sont difficiles à segmenter par nature, à cause de la faible quantité de points les caractérisant et l'aspect multiple qu'ils peuvent prendre. De plus, le peu de bases de données disponibles a été un frein à l'étude et à la généralisation des réseaux de neurones entraînés. Néanmoins, l'application de l'apprentissage profond aux nuages de points reste un domaine de recherche contemporain et dynamique aux nombreuses applications potentielles.

Références

- Qi, C.R., Su, H., Kaichun, M., Guibas, L.J., 2017. PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation. Presented at the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Honolulu HI, pp. 77-85
- Qi, C.R., Yi, L., Su, H., Guibas, L.J., 2017. PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, in: 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). IEEE, Long Beach, CA, USA

Étude du nouveau système de guidage dynamique en tunnel

PFE présenté par : **Xavier COTTANCEAU**

Société d'accueil : *Demathieu Bard Construction – Chantier*
L17 Lot 1 Grand Paris Express

Directeur de PFE : *Pierre-Emmanuel THERON*

Correcteur : *Gilbert FERHAT*



CONSTRUCTEURS D'AVENIR



1. Contexte de l'étude

Le chantier de la ligne 17 situé au Bourget, au nord de Paris, mandaté par le Grand Paris Express a mis en place un tunnelier pour relier Saint-Denis Pleyel au Mesnil-Amelot. Le rôle du topographe est de s'assurer de la trajectoire et de la position de la machine en la guidant.

Le système de guidage classique de notre tunnelier est fourni par l'entreprise VMT. Cette même entreprise nous a proposé de tester leur nouveau système de guidage dynamique durant la première partie du chantier (TIR 1). Celui-ci permettrait de faciliter le travail du topographe, et pour VMT, d'avoir un retour d'expérience sur ses qualités et défauts afin de pouvoir l'améliorer. Si l'essai est concluant nous le garderons pour la deuxième partie du chantier (TIR 2).

Ce système de guidage n'a jusqu'à aujourd'hui jamais été utilisé en France et seulement quelques fois dans d'autres pays comme l'Angleterre. Notre objectif sera donc de l'étudier et de le comparer à celui actuellement utilisé.

2. Le système de guidage classique

Le principe de la méthode du système de guidage classique est le suivant :

Le guidage se réalise à l'aide d'une station totale, ici un TS15 (Leica) positionné sur un bracket (platine) fixé à un anneau construit. La station totale est connue en coordonnées XYZ et s'oriente à l'aide d'un prisme arrière connu lui aussi en coordonnées. Une fois orientée elle vise un boîtier appelé ALTU (Active Laser Target Unit). La position de celui-ci a été déterminée dans un système local machine en usine que nous avons rattaché au système général du tunnel. En le visant avec la station totale et grâce à tout l'électronique embarqué et aux inclinomètres, nous connaissons la position exacte de la machine, son orientation, son roulis et son tangage.

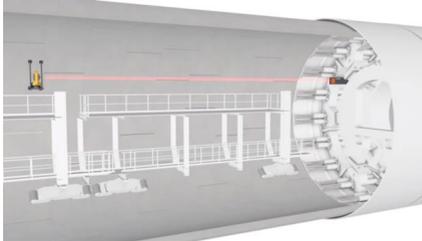
Lors du creusement, le pilote du tunnelier lance la navigation sur le logiciel TUnIS, ceci permet d'obtenir la position exacte du tunnelier en temps réel ; l'appareil prend des mesures à intervalle de temps régulier.

Au fur et à mesure que le tunnelier avance nous devons effectuer des changements de station afin de garder l'appareil et le prisme d'orientation dans le tunnelier, avant qu'ils ne soient plus accessibles car positionnés en hauteur. Nous l'effectuons lorsque le tunnelier est à l'arrêt, généralement pendant la construction des anneaux, afin de ne pas gêner la production puisque le pilote a besoin du guidage pendant le creusement. Nous avons besoin d'environ 20 minutes, en étant deux topographes, et la construction d'un anneau dure environ 30-45 minutes.

Pour le changement de station nous possédons un troisième bracket que nous mettons en place à l'avant du tunnelier puis, à l'aide du logiciel VMT, nous procédons en plusieurs étapes :

- L'appareil commence à s'orienter sur le prisme arrière (prisme de référence).
- Il mesure ensuite le nouveau prisme placé sur le nouveau bracket à l'avant du tunnelier.
- Nous l'échangeons de place avec le nouveau prisme.
- Il mesure le nouveau prisme de référence, positionné à l'ancienne position de l'appareil, et nous donne les écarts obtenus à la suite du changement de station.

- Il mesure l'ALTU, et recalcule la position du tunnelier nous permettant ainsi de voir s'il y a des écarts de position avant et après le changement de station.
- Pour terminer nous enlevons le bracket situé tout à l'arrière du tunnelier que nous pourrions utiliser pour le changement de station suivant.



Sur l'image à gauche nous pouvons observer la station totale sur un bracket fixé à un anneau et visant l'ALTU.

Figure 1 : Méthode de guidage classique (source documentation VMT)



Figure 2 : Bracket supportant le prisme permettant l'orientation du TS15

Figure 3 : Bracket supportant le TS15 pour le guidage ainsi qu'une batterie (en jaune) et qu'une radio (en noir)

La station totale est branchée sur une radio qui permet de transmettre et de recevoir les données entre l'appareil et le logiciel. La radio est alimentée par une batterie externe d'une autonomie de 24 heures.

Sur les photos ci-dessus nous pouvons aussi observer une fenêtre de tir dégagée qui est réservée au système de guidage et qui laisse libre les visées de la station totale.

3. Le système de guidage dynamique

Le principe de la méthode du système de guidage dynamique est le suivant :

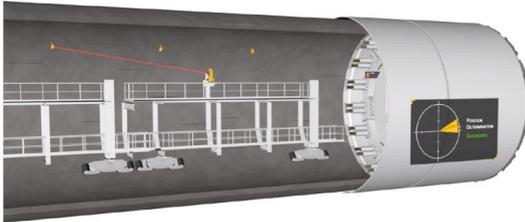
Nous garderons la même station totale que pour le système classique. Elle sera positionnée directement sur le tunnelier, elle avance avec. Il n'y a donc pas besoin d'effectuer de changement de station. Cela permet d'anticiper et d'éviter certaines interventions de nuit.

Sa position est calculée par résection en visant trois prismes de référence. Ces trois prismes de référence sont fixés sur les anneaux du tunnel et connus en coordonnées. Il est nécessaire de les avancer au même rythme que le tunnelier afin que la station totale puisse continuer de les viser tout en gardant une bonne géométrie pour une mise en station précise.

Grâce à une embase autonivelante spéciale, l'appareil reste en permanence de niveau, que ce soit lors des changements de pente dans le tracé mais aussi quand la machine prend du roulis. La station totale est directement branchée au secteur du tunnelier ce qui lui permet d'éviter les changements de batteries.

Pendant le creusement, le tunnelier est en mouvement et vibre, ce qui empêche la station totale de calculer sa position. C'est seulement lorsque le creusement est terminé qu'elle va mesurer la position de la machine.

A l'aide des données de la mise en station et de l'élongation des vérins de poussée à la fin du dernier creusement, le logiciel de calcul, TUnIS.track assistant, va calculer un plan en 3D. Lors du creusement, les longueurs d'élongations des vérins varient changeant ainsi l'orientation du plan 3D et donc la direction du tunnelier. Grâce à ces données, TUnIS.track assistant va extrapoler la position du tunnelier pour l'afficher en temps réel pendant le creusement.



Sur l'image à gauche nous pouvons observer la station totale fixée directement sur le tunnelier et visant un des trois prismes de référence fixés aux anneaux.

Figure 4 : Méthode de guidage dynamique (source documentation VMT)



Figure 5 : Prisme permettant l'orientation du TS15

Figure 6 : Disposition du TS15 pour l'utilisation du système dynamique



4. Traitement des résultats

Les deux systèmes utilisent le même logiciel TUnIS. Nous l'utilisons principalement pour effectuer un changement de station, rajouter des prismes de référence et/ou d'auscultation, lancer une orientation de l'appareil et/ou la navigation, exporter les données d'auscultation et du soutènement posé. Il n'y a quasiment pas de différence entre les deux méthodes de guidage dans l'utilisation du logiciel.

La principale différence observée est le déplacement de la station totale au fil de l'avancement du tunnelier. Dans la méthode classique celle-ci est positionnée sur les voussoirs du tunnel alors que dans la méthode dynamique elle avance avec le tunnelier puisqu'elle est positionnée directement sur celui-ci. Cela est un avantage considérable pour les topographes. En effet cela nous facilite et nous fait gagner beaucoup de temps sur notre travail. Un changement de station prenant 20 minutes en étant deux topographes, et entre 30 et 40 minutes en étant un topographe et un ouvrier. Le bracket pesant environ 20kg et étant positionné en hauteur, il n'est pas possible de le fixer seul.

Le système dynamique ne nécessite quant à lui que l'avancement des prismes de référence, ce qui prend entre 10 et 15 minutes et n'a besoin que d'une seule personne. Cela permet de réduire significativement le nombre d'interventions de nuit et de weekend ainsi que d'arrêts du tunnelier pour un changement de station. Lorsque le tunnelier rentre dans des courbes avec des rayons plus faibles et / ou que les cadences sont élevées, la fréquence des changements de station devient difficile à suivre et requiert une présence du topographe quasi permanente. Cela rend le système dynamique d'autant plus intéressant.

Nous avons pu observer un gain de temps d'environ 30% pour le temps passé à assurer le guidage du tunnelier avec le système dynamique. Le nombre d'intervention sur le terrain a légèrement

augmenté mais les tâches sont moins contraignantes et plus rapides à exécuter. Au bureau, le temps mis pour traiter les données reste similaire.

Grace à la méthode dynamique, l'appareil ne se situe plus au-dessus du passage piéton mais directement sur le tunnelier à un endroit, en hauteur, qui ne gêne pas et dans lequel il ne risque pas d'être involontairement touché.

Du fait de certaines modifications des plans originaux du tunnelier, certains éléments, tels que des armoires électriques ou la secatol (cuve à mortier), se sont retrouvés à empiéter sur la fenêtre de tir réservée à la station totale. Cela a provoqué des collisions entre la station totale et certaines armoires électriques. Il a fallu alors raccourcir le bracket pour éviter ces collisions. A chaque passage de l'appareil au-dessus de la cuve à mortier, il reçoit des projections le salissant et pouvant l'abimer sur le long terme. La méthode dynamique permettrait d'éviter cela.

L'avantage principal du système classique est que même s'il est toujours en phase d'amélioration et d'optimisation, il a fait ses preuves sur de nombreux chantiers dans le monde.

Les pilotes maîtrisent l'interface classique de VMT, le passage au nouveau système ne leur change pas leurs habitudes. Ils sont satisfaits de ne plus avoir à changer la batterie de la radio et à rebuller l'appareil.

« Moins on a besoin de toucher l'appareil, mieux c'est », *citation du chef de poste tunnel.*

Le logiciel TUnIS nous fournit des rapports à chaque pose d'anneau indiquant la position verticale et horizontale ainsi que les tendances (roulis et tangage) de la machine. Dans le système classique à chaque changement de station il peut y avoir un saut vertical et horizontal allant de quelques millimètres à un centimètre. Dans le système dynamique il y a aussi des sauts mais ceux-ci sont à chaque pose d'anneau, ils sont plus nombreux mais moins importants, 5 millimètres au maximum. Ces petites imprécisions sont corrigées avec la nouvelle détermination de la station totale.

Ces sauts peuvent aussi s'expliquer d'une part par la précision des mesures topographiques et d'autre part par le mouvement des anneaux, causé par le tassement du terrain naturel et/ou par l'injection de mortier. Ces mouvements débultent l'appareil et font bouger les prismes de référence qui sont accrochés aux anneaux, entraînant une petite imprécision sur les coordonnées des mises en stations.

Ces imprécisions se répercutent sur les rapports de pose d'anneau.

La précision de bullage ne change pas entre un bullage manuel, pour le système classique, et un bullage automatique, pour le système dynamique. Elle est de plus ou moins 10 mgon pour les deux. Mais le bullage automatique permet que, ni les pilotes ni les topographes, n'ayons besoin d'aller manipuler l'appareil s'il est débulté.

Afin d'observer si le tunnel bouge nous mesurons automatiquement et quotidiennement des prismes d'auscultation fixés aux anneaux. La précision des mesures effectuées et des résultats est équivalente pour les deux systèmes de guidage.

5. Conclusions et perspectives

La comparaison des données acquises nous ont permis de nous rendre compte que le nouveau système de guidage possède de nombreux atouts par rapport au système classique.

Malgré le fait que le système classique ait fait ses preuves depuis des années, le système dynamique est novateur et présente de nombreux avantages. Nous y trouvons un gain de temps précieux, pour le topographe, et d'argent, pour le chantier. Il permet de guider le tunnelier avec une précision équivalente au guidage classique et répond à toutes nos attentes.

A la suite de l'essai de ce nouveau système de guidage dynamique, il a été conclu de le garder pour la fin de la première partie du chantier (Lot 1) et envisagé de l'utiliser pour la deuxième partie du chantier (Lot 2).

Adaptation et amélioration de la chaîne de contrôle dimensionnel distant appliquée au suivi de fabrication de modules LNG et de structures d'éoliennes offshore

PFE présenté par : **Antoine REY**
Société d'accueil : **FUGRO GEOID**
Directeur de PFE : **Sylvain LACOMBE**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**
Encadrant : **Bertrand CHAZALY**



1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Le contrôle dimensionnel est une combinaison de mesures de précision et de modélisation mathématique 3D. Cette analyse de comparaison des objets avec la conception originale permet de garantir l'intégrité de la future installation. Il est appliqué à des éléments industriels tels que les tuyaux, les navires, les plates-formes ou les modules pré assemblés géants. L'intérêt est de mesurer avec précision ces éléments pour s'assurer que tout s'adapte du premier coup sans reprise inutile, afin de réduire le travail de soudage.

L'intervention sur des chantiers pour réaliser du contrôle dimensionnel permet aux entreprises de certifier les dimensions d'une structure avant la livraison. Il permet aussi de réduire les risques de défaut de montage qui engendrent des reprises inutiles sur le site avec des travaux à chaud.

Avec la situation actuelle, les déplacements sont devenus compliqués et les mesures sur sites sont souvent déléguées à des topographes Fugro locaux avec une supervision à distance. Le traitement et les rapports sont réalisés par les superviseurs qui les transmettent ensuite aux clients.

1.2 Objectifs

L'objectif de ce projet de fin d'études est de proposer des améliorations et des changements dans chacune des phases d'un projet de contrôle dimensionnel. Il s'appuie sur deux chantiers de contrôle dimensionnel : les modules LNG d'ARCTIC 2 réalisés en Chine, et les éoliennes en mer de Provence Grand Large réalisées à Fos-sur-Mer

La première partie porte sur la gestion à distance de l'acquisition sur le terrain. Il faut améliorer ou changer de logiciels de traitement des données pour développer la qualité dans le processus de traitement. Il doit être adaptable à tous les projets. Aujourd'hui, sur les projets d'ARCTIC 2 ou celui des éoliennes offshore, les méthodes sont similaires. Les équipes font les relevés topographiques avec un tachéomètre. Ensuite, les données sont calculées avec le logiciel Fugro COGO. Enfin, les rapports sont édités sous Autocad. Dans le futur, le développement du matériel et des logiciels permettrait de devenir plus efficace et de faciliter la compréhension du levé pour les équipes de traitement. Lorsque les moyens seront trouvés, il faudra rédiger un catalogue d'instructions et un programme de formation pour amener les équipes à utiliser cette solution.

Dans un second temps, une étude est menée sur l'impact des points pris sur le terrain, nombre de points pour définir un cercle, un axe ou un plan. Le but est de sensibiliser le personnel sur les bonnes pratiques de levé. Dans le cas du projet ARCTIC 2, en Chine, les mesures sont faites par des équipes locales qui ont été formées par des membres de Fugro Geoid. Il faut être capable de fournir des conseils afin d'améliorer les stratégies de mesure sur le terrain.

Pour terminer, un projet de contrôle dimensionnel comporte un important nombre de rapports suite aux mesures effectuées tout au long de la construction. La classification des rapports permet aux clients de retrouver, visualiser et télécharger n'importe quelle information facilement. Pour l'instant, la solution utilisée est Smartsheet, un tableur en ligne sur Internet proposant des comptes pour chacun des acteurs du projet. L'objectif ici est de mettre en place et d'utiliser une solution Fugro existante, Fugro PAIS, et l'adapter aux projets de contrôle dimensionnel. De plus, il faut intégrer un système de visualisation graphique 3D avec une interface permettant de visualiser les rapports pdf liés à un objet dans le modèle. Le point important ici est de ne pas avoir besoin de télécharger de logiciel pour visualiser le modèle 3D, en passant par Internet.

2. Structures étudiées

2.1 Module LNG

Aujourd'hui, la demande en énergie ne cesse d'augmenter. Pour répondre à cette demande, le gaz naturel a un rôle important. Les besoins mondiaux demandent un acheminement global. L'acheminement par gazoduc pour desservir les pays demandeurs coûte cher et n'est pas le plus pratique. La solution trouvée est la transformation du gaz à l'état liquide pour permettre un transport simple et économique. C'est dans cet objectif que les usines de gaz liquéfié (LNG) sont construites, pour réaliser le tri et la transformation du gaz. Une usine est composée d'un train de modules que l'on soude ensemble après leur construction.



Figure 1 Module LNG en construction

2.2 Eolienne flottante

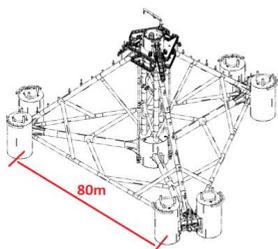


Figure 2 Vue isométrique d'une structure d'éolienne flottante

En restant toujours dans la problématique énergétique, le développement autour des énergies renouvelables est conséquent. Les éoliennes font aujourd'hui partie intégrante de notre environnement. Sur terre comme en mer, les éoliennes sont ancrées sur un sol stable. Le développement des éoliennes flottantes permet de les implanter plus au large où elles sont donc moins visibles depuis les côtes, et où les vents sont plus forts et plus stables.

3. Contrôle dimensionnel

L'embase des éoliennes est construite à Fos-sur-Mer. Le chantier est proche de l'entreprise et nous permet de faire les mesures sans subir la problématique de restriction des déplacements entre les pays. L'ensemble des phases peut alors être effectué au sein de Fugro Geoid. Le lancement de la construction correspond au début de ce projet de fin d'étude. Une approche différente peut être faite en comparaison avec les modules LNG dont le contrôle avait débuté depuis déjà plusieurs mois. Les projets de contrôle dimensionnel sont longs donc lorsqu'une construction débute, il faut adapter les méthodes par rapport à la structure, mettre en place les nouveaux gabarits de rendus et la gestion des données.

3.1 Levé au tachéomètre

Nous prendrons en exemple le projet de Fos-sur-Mer, car nous sommes acteurs sur le terrain. Trois éoliennes sont en construction en même temps. La colonne centrale est le premier élément assemblé dans un hangar du chantier. Les flotteurs sont ensuite positionnés à l'extérieur où l'assemblage est ensuite réalisé après l'implantation de la colonne centrale, le travail d'assemblage se

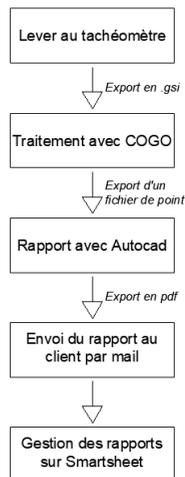


Figure 3 Chaîne de traitement actuel pour un projet de contrôle dimensionnel

fera en extérieur. Pour information, la structure a une emprise de 80m de large et 50m de haut (sans l'éolienne.)

Le contrôle de positionnement ou de soudure d'un élément est demandé par le client. Dans le hangar, un réseau de cibles a été implanté au début pour pouvoir effectuer des stations libres. Lors de chaque mise en station, on s'assure d'avoir plusieurs cibles communes entre chaque station pour pouvoir faire un recalage entre les stations lors du traitement. Ensuite, les éléments nécessaires sont relevés pour définir des cercles ou des plans qui reconstitueront la structure par la suite. Le même principe de réseau de cibles s'applique à l'extérieur.

3.2 Traitement des données

L'une des premières actions à faire au bureau est de contrôler son carnet de terrain. Noter l'ensemble des mesures sur papier est une assurance, mais elle prend aussi du temps sur le terrain qui pourrait être adapté autrement avec de nouveaux moyens. Aujourd'hui, l'ensemble des calculs se fait avec un logiciel interne, Fugro COGO. Le recalage des stations, la définition du système de coordonnées et le calcul des cercles et plans les plus probables se font très bien avec ce logiciel. Cependant, l'arrêt du développement a rendu le logiciel peu ergonomique. Il est très intuitif, mais avec des manipulations redondantes le logiciel n'est pas assez efficace. L'amélioration de ce processus en travaillant avec un nouveau logiciel ou en développement Fugro COGO fait partie des points importants pour améliorer le travail sur le terrain et en traitement. Nous pouvons imaginer que ce logiciel ne demande plus de passer par Autocad pour créer le rendu.



Figure 4 Assemblage de la colonne centrale du support d'une éolienne

3.3 Gestion des données

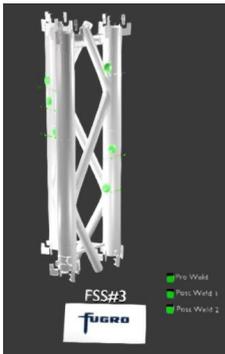


Figure 5 Modèle 3D de la colonne centrale d'une éolienne flottante exporté avec Blend4Web

Dans un projet tel que celui d'ARCTIC2 et des modules LNG, leurs constructions sont réparties sur 6 chantiers comprenant 3 modules chacun. Des rapports journaliers sont fournis au client en suivant la chaîne de traitement de la Figure 3. A la fin de ce processus, les documents sont archivés sur Smartsheet, un tableur sur Internet. Avec des comptes, les clients et les acteurs du projet peuvent accéder à l'ensemble des rapports et d'autres données statistiques liées au projet depuis le début. La solution interne Fugro Pais est utilisée par d'autres bureaux dans le groupe pour des projets différents. L'adapter au contrôle dimensionnel serait intéressant pour développer cette solution et ajouter des fonctions qui ne peuvent pas l'être avec Smartsheet. La gestion de rapports à partir d'une interface graphique gérant un modèle 3D de la structure serait une solution alternative ou complémentaire, plus confortable pour les recherches du client. En attendant de savoir si cette fonction est intégrable dans Fugro Pais, nous avons cherché une solution répondant à cette problématique. Nous avons choisi Blender qui est un logiciel gratuit et nous avons ajouté plusieurs applications, Blend4Web et Verge3D.

Après avoir réglé les problématiques de format d'insertion et de taille du modèle 3D, plusieurs points étaient à travailler.

- La gestion des rapports pdf
- Le moyen de filtrer les rapports
- Automatiser la gestion et le positionnement des rapports dans le modèle

La première extension Blend4Web permet de convertir le modèle dans Blender en un format html visualisable depuis une page internet. Son principal défaut est l'ergonomie du modèle. Il faut, dans Blender ajouter des objets qui sont ensuite codés dans le logiciel pour assurer le lien vers un rapport pdf. C'est un processus long d'autant plus que Blender n'est pas simple en manipulation. Dans la *Figure 5*, les pastilles vertes représentent chacune un rapport et lorsque l'on clique sur cette pastille, une nouvelle page apparaît avec le rapport pdf associé.

La deuxième extension Verge3D se comporte différemment de la première. Une page de paramètre regroupe le modèle Blender, une page de codification et le lien internet pour visualiser le modèle en html. Après avoir intégré le modèle 3D, il suffit de travailler uniquement dans la page de code. Cette page permet d'interagir avec le modèle pour voir les modifications qui sont apportées en cours d'édition. Cette extension fournit plus de possibilités pour se rapprocher au mieux de nos besoins. Pour une utilisation professionnelle, elle devient néanmoins payante. L'ajout de pdf lié au modèle ainsi qu'une description dans le modèle est facile à ajouter. Le problème vient du nombre de rapports par structure à partir d'un certain temps. Sans filtre, il deviendrait difficile et long de trouver le bon rapport. L'ajout de filtre devient alors obligatoire. Cet ajout est faisable, mais demande des connaissances poussées en programmation dans différents langages. Nous avons décidé de ne pas approfondir la visualisation du modèle en attendant des retours des développeurs de Fugro Pais.

4. Méthodologie et précision de mesures

Lors du lever au tachéomètre, nous définissons une structure complexe grâce à des plans, des cylindres et des cercles. La formation à distance des équipes qui feront les levés doit permettre de leur faire prendre conscience de l'importance de la redondance et de la répartition des points pour définir une forme géométrique. Nous avons alors développé un programme Matlab qui est théorique, mais qui permet de définir le cercle le plus probable. En entrée, nous faisons varier le nombre d'itérations, le nombre de points sur le cercle, la tranche de répartition et leur précision.

Le programme va d'abord générer le nombre de points que l'on définit sur la plage de positionnement que nous avons choisi. Ensuite, à partir de ces points, il génère pour chacun un point aléatoire dans un cercle ayant pour rayon la précision d'entrée. En sortie de programme, nous aurons les coordonnées des centres, les rayons minimum/maximum, l'écart maximum entre le centre théorique et calculé, la figure de répartition des rayons et le schéma du positionnement des cercles par rapport au théorique.

Ces données permettent de faire des statistiques et de faire comprendre facilement l'importance de ne pas se contenter du minimum de mesures en contrôle dimensionnel pour minimiser les possibles erreurs lors de la phase de traitement. L'ordre de précision des rendus effectués au client est millimétrique. Malgré une répartition homogène, le manque de point pour calculer le cercle le plus probable peut rendre un résultat qui s'écarte de la réalité.

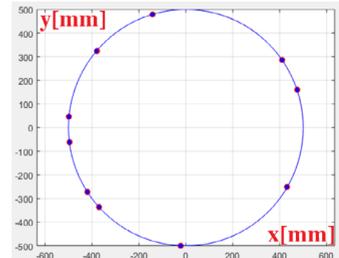


Figure 6 Une itération avec 10 points réparti sur l'ensemble du cercle

5. Conclusion et perspectives

Le contrôle dimensionnel demande une approche différente de la topographie classique, les premières recherches et les expérimentations entamées apportent un début de solution.

- L'analyse de méthodes et outils de calcul de contrôle dimensionnel a permis une prise de conscience des besoins d'évolution du groupe Fugro. Les pistes étudiées permettront d'orienter les décisions.
- Le choix d'utiliser Blender comme solution alternative à la visualisation d'un modèle 3D est très encourageant, car il propose de nombreuses fonctions tout en étant un logiciel gratuit.
- L'amélioration des méthodes de mesure passe par la sensibilisation du personnel de terrain que permettent les outils simples d'analyse et de rendu.

La démarche est à poursuivre en espérant qu'elle permette à Fugro Geoid de maintenir leur niveau d'expertise qu'elle défend au sein du groupe.

Réalisation d'un démonstrateur technique de positionnement PPK à partir de mesures GNSS réalisées par un smartphone

PFE présenté par : VEILLE Pierre
Société d'accueil : Sogelink
Directeur de PFE : WERLEN Maxime
Correcteur : FERHAT Gilbert
Encadrant : COURTOIS Yoann



Mots clés : Smartphone, Positionnement GNSS, Post-traitement, Geosnap, Récepteur low-cost

1. Contexte et définition de l'étude

Ce Projet de Fin d'Études (PFE) est proposé par la société Sogelink, éditeur de solutions logicielles centré sur le monde des réseaux et leur cartographie aérienne et souterraine. Dernière-née au sein du service Innovation et Nouvelles Offres, l'application Geosnap permet d'obtenir des données 3D géoréférencées, de précision centimétrique, grâce à la prise de photographies sur le terrain. Elle propose toute une liste de missions cartographiques qui guident l'utilisateur de l'acquisition des données photos au lancement des calculs. Les algorithmes de traitement permettent de fournir tous les éléments, comme le nuage de points, l'orthophoto ou le modèle numérique de terrain (MNT) d'une zone d'étude, nécessaires pour réaliser des plans techniques : plans topographiques, plans de report des investigations complémentaires et plans de récolement des réseaux enterrés.

La solution propose à ses usagers d'utiliser des techniques de levés photogrammétriques innovantes. En effet, pour tous types de travaux, les photos brutes sont acquises sur le terrain à l'aide d'une caméra d'action avec un objectif très grand angle (GoPro, DJI Osmo Action, etc) fixée sur une perche, selon un quadrillage pouvant être comparé à celui du vol d'un drone. De plus, des travaux récents ont permis la mise au point d'une application mobile qui permet d'effectuer les levés de récolement à l'aide d'un smartphone. Le sujet de ce PFE rentre alors ici en jeu : il doit permettre le calcul de la position précise des images acquises par le smartphone de l'utilisateur. L'idée est de compléter voire de se passer de la méthodologie de géoréférencement actuellement employée (géoréférencement par des cibles placées au sol et mesurées avec un récepteur GNSS) en calculant ses données 3D à partir des positions GNSS acquises par le téléphone portable. Cette étape permettra de proposer un système de positionnement différent et simplifiant le processus photogrammétrique existant. L'un des objectifs sera de proposer des ajustements à la procédure d'acquisition actuelle. A noter que nous visons à satisfaire la classe de précision A pour les réseaux enterrés.

Le traitement photogrammétrique ne nécessite pas de connaître les coordonnées des images en temps réel du levé terrain, ainsi nous ferons appel à des méthodes de positionnement dites de post-traitements pour calculer les positions GNSS du smartphone. Un objectif de ce PFE est d'identifier les composants logiciels existants, les tester et réaliser une étude comparative pour sélectionner les plus intéressants pour la réalisation d'un démonstrateur technique de positionnement. Le but est de mettre en place un processus de traitement, avec des fonctionnalités partielles permettant de se projeter sur la solution attendue et valider sa faisabilité technique.

2. Le positionnement GNSS par smartphone

a. Un peu d'histoire

Le positionnement par smartphone a débuté en 1999 avec le lancement sur le marché grand public du premier téléphone portable à intégrer un récepteur GPS, le Benefon Esc!. Pensé pour les randonneurs, le téléphone permettait à son utilisateur de s'orienter en chargeant des cartes. Il était également possible d'envoyer ses coordonnées géographiques par sms ou même de partager sa position en temps réel avec d'autres usagers de Esc!.

Une véritable révolution a eu lieu en 2016 avec la sortie du système d'exploitation Android Nougat 7.0 et son API 24 (Application Programming Interface). Avant cette date, les données GNSS brutes acquises par les smartphones (mesures de phases et de codes, rapport C/No, satellites suivis...) n'étaient pas accessibles par les utilisateurs. Ces données étaient protégées par les constructeurs de puces GNSS, ainsi seulement la position interne calculée par ces dernières était disponible. Bien évidemment, il était impossible d'en effectuer un post-traitement à l'aide d'un logiciel dédié et par conséquent, le positionnement était limité à une précision de 3-4 mètres sous des conditions favorables et une dizaine de mètres sous des conditions dégradées (exemple d'un canyon urbain). L'accès aux données brutes a marqué un réel tournant dans la course au géopositionnement par smartphone avec la possibilité dorénavant d'analyser la qualité des signaux reçus et de calculer des positions plus précises et exactes grâce à des processus de post-traitement ou des algorithmes avancés.

En 2017, l'entreprise Broadcom a annoncé la sortie de la première puce GNSS bi-fréquence (BCM47755). Ce microprocesseur est capable de recevoir les signaux des fréquences L1/E1 et L5/E5 des satellites des constellations GPS, GLONASS, Galileo, Beidou ou encore QZSS. Cette percée technologique a été rapidement suivie par d'autres industriels tels que U-blox, STMicroelectronics et Qualcomm qui ont produit respectivement les puces ZED F9P, Teseo et Snapdragon X24 LTE. Le premier smartphone équipé d'une telle puce, en l'occurrence la BCM47755, a été lancé et commercialisé l'année suivante par l'entreprise chinoise Xiaomi. Il s'agit modèle Xiaomi Mi 8.

b. Données issues de l'étude bibliographique et premiers résultats obtenus avec le smartphone Xiaomi Mi 8

Il existe aujourd'hui différents smartphones bi-fréquences sur le marché grand public. On peut notamment citer le constructeur Huawei et ses modèles P30 et P30 Pro. Néanmoins, le Xiaomi Mi 8 est décrit comme étant le smartphone le plus performant dans la littérature scientifique. Nous avons obtenu des premiers résultats avec cet appareil en récupérant des données à l'issue de l'étude bibliographique : données partagées par des chercheurs via des projets ouverts et par le laboratoire géodésie de l'Université de Munich.

Nous avons dans un premier temps traité des données statiques : le téléphone portable est positionné sur un trépidé pour une durée de 1h dans un scénario atmosphérique idéal (à ciel ouvert, dégagé de toutes obstructions éventuelles). Ces données nous ont permis de comparer différentes solutions logicielles de post-traitement. Nous avons pu retenir un logiciel open source ainsi qu'une configuration paramétrique optimale pour réaliser le traitement de mesures GNSS captées par smartphone. Le positionnement statique donne des résultats satisfaisants avec la possibilité d'atteindre une précision et une exactitude centimétriques en stationnant un point connu en coordonnées par un récepteur géodésique de haute qualité.

Par segmentation des fichiers Rinex de 1h, nous avons également étudié la possibilité d'effectuer un positionnement rapide statique à l'aide du Mi 8. Nous avons constitué des fichiers de 10 min, 5 min et 3 min. Les trois configurations présentent des résultats sub-décimétriques à centimétriques. Ainsi, le positionnement rapide statique est envisageable avec le Xiaomi Mi 8. Cela est possible grâce au faible temps de convergence des positions smartphone post-traitées, la résolution de l'ambiguïté entière de phases est rapide.

Pour finir avec l'étude du Xiaomi Mi 8, nous avons traité des données avec le téléphone en mouvement, dans un scénario dynamique. C'est la configuration qui nous intéresse pour notre PFE car l'application mobile Geosnap est bien évidemment utilisée par des utilisateurs qui se déplacent sur un chantier. Les tests sont satisfaisants mais avec la mise en place d'un dispositif technique lourd (voir figure 1) constitué d'une antenne choke ring qui permet de réduire considérablement les effets des trajets multiples. Le smartphone suit le mouvement circulaire décrit par l'antenne.



Fig 1 : Dispositif mis en place pour l'acquisition de données dynamiques avec une antenne choke ring

Ces premiers tests effectués avec le Xiaomi Mi 8 nous ont permis de confirmer qu'il est possible d'obtenir un positionnement centimétrique avec un smartphone. Toutefois, ces résultats sont validés avec des conditions de mesures optimales spécifiques : mesures statiques avec des conditions de ciel ouvert et utilisation de matériel permettant de réduire les interférences. De plus, nous validons ces résultats avec un modèle unique et précis de smartphone Android. En effet, nous ne pouvons pas les généraliser à la majeure partie des smartphones du marché, c'est-à-dire ceux qui fonctionnent avec la mono-fréquence. Il est à noter également que le modèle qui a suivi le Mi 8 ne permet plus de lire les mesures de phases, ce qui réduit plus que considérablement la possibilité d'obtenir un positionnement intéressant. Il ne faut pas oublier de préciser que notre PFE vise une généralisation de la solution à l'ensemble des smartphones du marché. Ainsi, dans le but d'une industrialisation et commercialisation future auprès de clients, nous allons étudier la possibilité de réaliser un récepteur GNSS low-cost comprenant dans son dispositif un smartphone.

3. Dispositifs low-cost et campagne de tests

Depuis mi-juin, nous menons une campagne de tests afin de comparer différentes solutions GNSS low-cost. Nous sommes en train de comparer les dispositifs suivants :

- ✓ Un dispositif 100% smartphone : avec l'utilisation d'un téléphone de moyenne gamme et représentatif du marché actuel : le Huawei P20. Il nous permet d'acquérir des données GPS et GLONASS sur la fréquence L1.
- ✓ Un dispositif hybride comprenant un récepteur GNSS externe low-cost (antenne + puce GNSS) ainsi qu'un smartphone qui est employé comme interface d'acquisition et d'exploitation des données. Nous n'avons pas encore reçu ce matériel, cela fait donc parti des éléments qu'il nous reste à étudier pour ce PFE. Nous avons prévu de connecter le smartphone au récepteur GNSS par le biais d'un module Bluetooth.
- ✓ Une antenne constructeur intelligente low-cost : le FLX100 de Leica. Ce matériel ne prend pas en compte de smartphone dans sa solution. Néanmoins, nous pensons qu'il peut être un outil de comparaison intéressant. Les usagers de cette antenne l'utilisent très largement en mode RTK (Real Time Kinematic) avec un abonnement à des corrections en temps réel comme Orphéon, Satinfo, etc. Pour notre étude, nous détournons son usage principal pour l'employer en post-traitement. Pour cela, nous travaillons avec l'application Leica Zenos Connect et nous utilisons un logiciel open source permettant de convertir des données Leica au format Rinex.

Pour comparer les appareils présentés, nous avons mis en place différentes expérimentations. Tout d'abord, nous les étudions en mode statique, en variant les lieux et ainsi les conditions d'acquisitions. Voici les divers environnements que nous avons stationnés : toit de Sogelink à ciel ouvert, végétation légère, végétation dense, zone urbaine semi-dense et canyon urbain. Le protocole d'acquisition consiste à stationner les mêmes points de références. Pour le moment, nous avons établi les coordonnées de ces points à l'aide du matériel géodésique Leica GG04. Nous devrions recevoir d'ici juillet l'antenne GNSS GS18, ainsi les marques de références seront déterminées par cet appareil-ci. C'est pourquoi nous n'allons pas présenter des résultats de précision et d'exactitude dans ce résumé. Ils seront partagés dans le mémoire de PFE et lors de la soutenance finale.

Ensuite, nous procédons à des acquisitions dynamiques. Pour contrôler la qualité de nos mesures nous avons besoin d'une référence. Pour cela nous avons mis en place un protocole sur un terrain de rugby. Nous nous déplaçons en suivant la ligne blanche extérieure du terrain. Cette ligne de référence a été déterminée en mesurant les 4 coins du terrain (P1 à P4) à l'aide du GG04 en statique (mesures avec le GS18 à venir). Les trajectoires suivies par les appareils sont visibles sur la figure 2, nous avons produit un fichier kml afin de créer un projet Google Earth. La trace suivie par le FLX100 est matérialisée en jaune tandis que celle suivie par le Huawei P20 est en bleue. Le rectangle de référence est quant à lui représenté en rouge. Pour présenter nos résultats, nous avons tracé des zones tampons de différentes tailles autour de notre ligne de référence grâce au logiciel QGIS et son plug-in Multiple Distance Buffer. Le FLX100 produit des résultats intéressants dans le cadre de notre projet avec près de 100% des positions post-traitées comprises dans une zone de tampon de 40 cm. La médiane est située à 6 cm. Nous étudierons l'influence que ce positionnement peut avoir sur le traitement photogrammétrique. L'acquisition dynamique avec le Huawei P20 est plus délicate notamment avec des sauts de cycles et des décrochages des signaux GNSS, la médiane se situe ici à 1,50 m avec des positions allant jusqu'à 13 m d'écart par rapport à la ligne de référence.

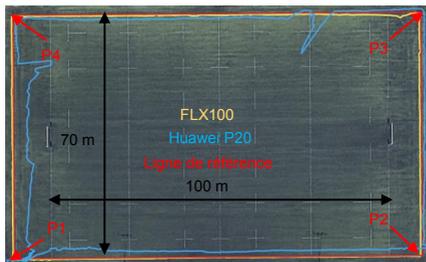


Fig 2 : Acquisitions dynamiques réalisées sur le terrain de rugby

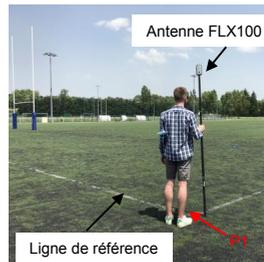


Fig 3 : Test du FLX100 en dynamique

4. Ajustement de l'acquisition et du traitement photogrammétrique

L'accès aux données brutes GNSS des smartphones ainsi que les éléments calculés lors du post-traitement vont nous permettre d'ajuster le traitement photogrammétrique effectué actuellement sur Geosnap. Nous sommes en train de réfléchir à une pondération des positions GNSS calculées en fonction de différents indicateurs (rapport C/No, nombre de satellites, ratio de la résolution de l'ambiguïté, etc). Le but va être d'attribuer un poids, un score de qualité à chacune des images afin d'améliorer le géoréférencement. Les réflexions sont en cours et viendront compléter le mémoire de PFE.

5. Conclusion et perspectives

Les données traitées ainsi que les tests réalisés nous ont permis d'identifier les composants logiciels intéressants pour notre démonstrateur. Nous avons mis en place un workflow de post-traitement avec des étapes qui s'enchaînent efficacement. Il nous reste principalement à tester et analyser la solution hybride GNSS ainsi que d'améliorer le processus photogrammétrique avec des algorithmes efficaces.

Développement d'une solution de numérisation 3D temps réel via smartphone



PFE présenté par : **Raphaël HAENEL**
Société d'accueil : **SYSLOR**
Directeur de PFE : **Edouard SEMIN**
Correcteurs : **Emmanuel ALBY**
Pierre GRUSSENMEYER
Encadrant : **Quentin SEMLER**



1. Contexte et objectifs

L'entreprise SYSLOR, spécialisée dans le développement de solutions innovantes sur smartphone ou tablette à destination des travaux publics, rencontre actuellement une problématique d'envergure pour les travaux de récolement des réseaux enterrés. En effet, ces derniers reposent sur une procédure photogrammétrique usuelle, qui bien qu'étant tout à fait légitime et robuste, se trouve être chronophage pour un applicatif sur smartphone. Ainsi, les délais de production sont directement impactés par une nécessité d'externaliser les calculs correspondants sur une machine adéquate.

C'est donc pourquoi SYSLOR souhaite activement proposer une nouvelle démarche calculatoire qui permettrait de pallier cette problématique. La finalité recherchée étant qu'un chef de chantier, prestataire de la collecte des données, puisse avoir un suivi permanent de la numérisation pour être en mesure de juger immédiatement de l'exhaustivité des données et de la qualité du modèle généré. Cette production en temps réel permettrait en particulier d'éviter une détection trop tardive d'une mauvaise acquisition et de réduire drastiquement les délais de production.

Ainsi, le cahier des charges devant être pris en considération lors des développements peut être synthétisé en trois critères fondamentaux :

- Une fiabilité calculatoire du processus soutenue efficacement par les performances offertes par les smartphones actuels ;
- Une optimisation de la procédure de calcul pour atteindre une productivité en temps réel ;
- Une accessibilité de l'acquisition pour tout un chacun ;

2. Production des données de profondeurs associées à une image

Pour mener à bien une reconstruction 3D performante, nos recherches nous ont orientés vers l'utilisation de cartes de profondeurs. Cette donnée intermédiaire caractérise une pseudo-reconstruction en 2.5D de l'espace de mesure sous la forme d'un échantillon de valeurs discrètes traduisant la distance entre les surfaces mesurées et le capteur d'acquisition.

La production de cartes de profondeurs repose sur l'étude d'une similitude colorimétrique, que l'on désigne aussi par critère de photo-consistance, entre les pixels d'une paire stéréoscopique. L'étude entre les différentes solutions algorithmiques de la littérature scientifique et les critères du cahier des charges nous a permis de recentrer les tests de développements sur deux solutions, à savoir l'algorithme du **planesweep** [1], et la plateforme ARCore.

2.1. Implémentation du planesweep

Cette solution repose sur le concept selon lequel une stéréo-correspondance peut être identifiée en projetant chaque pixel d'une image de référence selon leur rayon de visualisation respectif échantillonné en valeurs discrètes (désignées comment étant la profondeur) sur une seconde image et en mesurant le degré de similitude photométrique. Cette idée est généralisée en discrétisant l'espace objet en une succession de plans virtuels associée à une certaine valeur de profondeur

(figure 1). Ainsi, une image de référence sera projetée sur chaque plan afin que les rayons de visualisation soient parcourus simultanément.

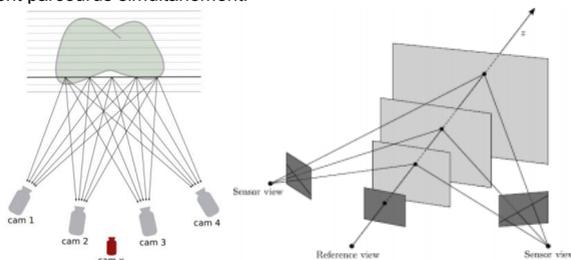


Figure 1 : Méthode du planesweep (Source : [1])

Cet algorithme repose sur un certain nombre de paramètres qui impactent directement la justesse des résultats produits de même que la cadence calculatoire. Grâce à l'appui d'un benchmark très populaire pour des applications multi-vues, nous avons eu la possibilité d'étudier rigoureusement l'impact que porte la variation de ces paramètres. Les différents tests entrepris nous ont permis de mieux comprendre l'implémentation de cette méthode, en extrayant ses avantages, mais également ses limites. Ainsi, bien que cette méthode soit tout à fait légitime pour la génération de cartes de profondeurs, sa démarche calculatoire, relativement séquentielle, implique un temps de traitement ne correspondant pas à notre volonté de développement.

2.2. Intégration de l'API Depth d'ARCore

ARCore est une interface de programmation (API), développée par Google en 2018, vouée à des applicatifs de réalité augmentée. Afin d'atteindre un degré d'immersion plus poussé dans l'expérience offerte, des informations de profondeur sur la scène observée ont été agrémentées sous la forme d'une API complémentaire de génération de cartes de profondeurs à partir d'une unique caméra. En effet, ces données sont intéressantes pour offrir une meilleure perception de l'environnement sous réalité augmentée, en particulier en gérant tous les effets d'occlusion entre les objets virtuels et le monde réel.

Le principe calculatoire de cette solution repose sur une combinaison des approches **PatchMatch** [2] et **HashMatch** [3]. L'idée est d'implémenter un algorithme itératif alternant entre la génération d'une profondeur aléatoire et sa propagation dans l'image sur la base des informations colorimétriques. Cela s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle une image est, en principe, constituée de régions, de taille variable, de profondeurs constantes. Ainsi, l'initialisation aléatoire consiste à tester successivement plusieurs de ces valeurs, qui seront associées à une probabilité d'apparition, pour au final retenir celle ayant la probabilité maximale. Ensuite, la propagation des valeurs aux pixels voisins repose sur l'utilisation de champs aléatoires conditionnels (CRF), variante des champs de Markov. L'intérêt de cette approche est de proposer un schéma d'inférence favorisant une propagation performante en utilisant peu de ressources. De cette façon, chaque pixel peut être considéré indépendamment des autres. La production de résultat satisfait par conséquent la contrainte de temps réel tout en fournissant une qualité très intéressante.

Les cartes de profondeurs, fournies par cette API, présentent une résolution de 160 x 120 pixels, en effet, pour de telles applications, une approche hiérarchique est souvent privilégiée pour restreindre la quantité de calculs. La portée de la profondeur est d'environ 8 m, avec une erreur de détermination qui croît de façon quadratique, néanmoins, pour des résultats optimaux, il est conseillé de limiter la portée d'acquisition à 5 m.

3. Visualisation tridimensionnelle des données

3.1. Production d'un nuage de points 3D

Pour concevoir un nuage de points à partir d'une image RGB-D (association image en couleurs avec carte de profondeurs associée), nous nous sommes ramenés au principe même de formation d'une image. Pour ce faire, nous avons considéré un modèle de caméra standard, à savoir

la caméra sténopé qui décrit une projection perspective. Autrement dit, chaque point 3D de la scène peut être projeté sur un plan euclidien par l'intermédiaire d'une matrice, dite de projection et notée P , qui représente les 11 degrés de liberté traduisant les paramètres internes et externes de ladite caméra. Par l'intermédiaire de cette matrice, deux transformations sont opérées. La première consiste à passer du système de coordonnées image vers le système lié à la caméra par l'intermédiaire des paramètres intrinsèques (distance focale, coordonnées du point principal). La seconde permet ensuite de se ramener au système de coordonnées dans lequel se situe l'objet mesuré grâce aux paramètres extrinsèques de la caméra, constitués d'une matrice rotation (orientation de la caméra dans l'espace) et d'un vecteur translation (position relative de la caméra).

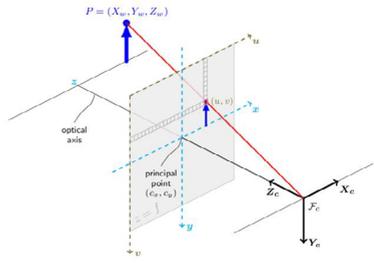


Figure 2 : Modèle de caméra sténopé (Open CV doc.)

La démarche entreprise dans le cadre de notre développement est résumée à la figure 3. À partir des données RGB-D fournies par ARCore, nous incorporons à l'algorithme le géoréférencement de précision centimétrique de chaque image, assuré par l'antenne GNSS développée en interne chez SYSLOR, ainsi que trois angles définissant l'orientation du smartphone dans l'espace. Ces données, qui sont définies selon une représentation eulérienne (pitch, roll et azimut), sont déterminées par l'intermédiaire de capteurs internes au smartphone. Parmi ces derniers, on retrouve en particulier l'accéléromètre qui mesure l'accélération appliquée au téléphone suivant chaque axe du repère cartésien, ainsi que le magnétomètre qui mesure l'intensité des champs magnétiques autour de l'appareil et agit tel un compas. Cependant, pour notre cas d'usage, nous utilisons une autre forme de représentation angulaire. En effet, l'utilisation brute des angles d'Euler peut être sujette à des singularités géométriques, en particulier le blocage de cardan (*Gimbal Lock*). Cela signifie que dans une certaine configuration, un degré de liberté se perd entraînant que deux des trois axes sont portés par la même direction. Ainsi, pour contourner cette problématique, nous faisons appel aux quaternions. Un quaternion décrit un quadruplet traduisant une similitude géométrique dans l'espace qui associe une rotation avec un axe. C'est une représentation plus abstraite des rotations qui a l'avantage de ne pas souffrir des singularités géométriques.

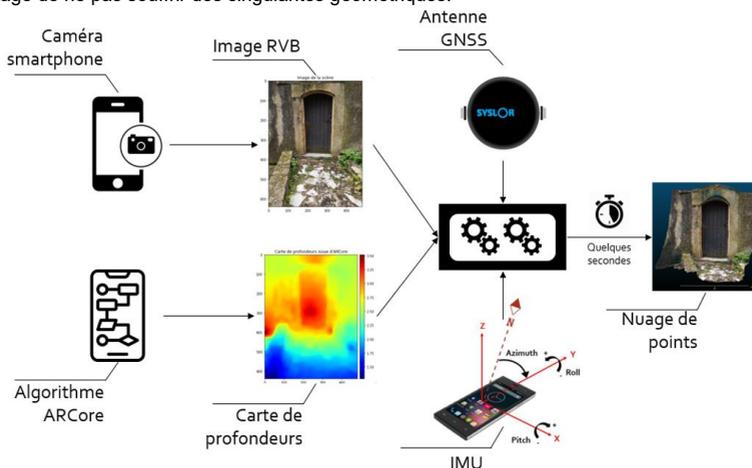


Figure 3 : Processus de création d'un nuage de points

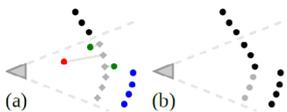
3.2. Mise à jour dynamique du modèle

La fusion des différentes données obtenues à partir des images RGB-D implique de réfléchir au mode de représentation du modèle. En effet, celui-ci doit pouvoir répondre à des applications interactives fonctionnant en temps réel. Par conséquent, il est nécessaire de garantir, à chaque

instant, son intégrité de même que la cohérence topologique après la mise à jour et l'ajout de nouvelles données. C'est en ce sens que nous représenterons le modèle sous la forme de surfels [4], autrement dit un nuage de points orientés. Un surfel (*surface element*) consiste en une position 3D, un vecteur normal, une couleur et une valeur de confiance. Cette dernière, qui traduit la qualité, indirectement la précision des données, est fonction de trois éléments : la précision de positionnement assurée par l'antenne GNSS, la pertinence des données angulaires fournies par le smartphone et enfin la qualité de la carte de profondeurs qui chiffre la fidélité de retranscription de l'environnement étudié.

Le schéma d'adaptation dynamique du modèle se base donc sur l'étude de correspondance ou d'association entre le modèle en cours et les nouvelles données. De manière plus concrète, lorsqu'une nouvelle carte de profondeurs sera disponible, le modèle surfel global sera reprojété sur le plan image de la vue physique actuelle sous la forme d'une carte de profondeurs. À partir de là, trois opérations sont menées, l'ajout, la mise à jour et la suppression de surfels. L'ajout de surfels intervient lorsqu'aucune correspondance n'est trouvée entre le modèle et les nouvelles données. La mise à jour est l'opération la plus complexe puisque différentes situations peuvent exister (figure 4) :

- La mesure de profondeurs obstrue le modèle, aucun changement n'est réalisé ;
- La mesure de profondeurs est derrière le modèle, ceci est un conflit de visibilité, ainsi le surfel est remplacé par la nouvelle donnée ;
- Les deux mesures coïncident relativement, ainsi le nouveau surfel sera construit à partir d'une pondération des deux éléments.



(a) En gris, on retrouve les nouvelles mesures.
 En noir, les surfels hors de la vue de la caméra actuelle.
 En rouge, mesure en conflit de visibilité avec le surfel.
 En bleu, occultation des surfels.
 En vert, mesures et surfel coïncident
 (b) Modèle surfel mis à jour

Figure 4 : Possibilités de mise à jour du modèle surfel [4]

4. Conclusion et perspectives

La preuve de concept développée durant ce Projet de Fin d'Études permettra par la suite de concevoir une application innovante dont la spécificité sera l'auto-contrôle. Autrement dit, tout au long de l'acquisition, le chef de chantier sera conforté grâce à une pré-visualisation du modèle en temps réel attestant de la qualité de reconstruction du modèle de même que l'exhaustivité des données. Bien que la précision et la fidélité du modèle final aient été sommairement abordées au cours du projet, il conviendra d'entreprendre des recherches complémentaires pour quantifier plus justement la qualité du résultat.

Jusqu'ici, notre travail s'est cantonné à l'utilisation d'informations RVB, avec des dispositifs d'acquisition indirecte, néanmoins, avec les perspectives d'ouvertures offertes par les dispositifs d'acquisition directe dont notamment les LiDAR portatifs, il paraît évident que la solution développée ici pourra être améliorée. De même, l'apport d'une centrale inertielle permettra de rendre plus robustes les valeurs angulaires d'orientation du smartphone offrant un gain en précision non-négligeable.

5. Bibliographie

- [1] Collins, R. (1996). A space-sweep approach to true multi-image matching. In *Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 358–363, San Francisco, CA, USA. IEEE.
- [2] Bleyer, M., Rhemann, C., and Rother, C. (2011). PatchMatch Stereo – Stereo Matching with Slanted Support Windows. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2011*, pages 14.1–14.11, Dundee. British Machine Vision Association.
- [3] Fanello, S. R., Valentini, J., Kowdle, A., Rhemann, C., Tankovich, V., Ciliberto, C., Davidson, P., and Izadi, S. (2017). Low Compute and Fully Parallel Computer Vision with HashMatch. In *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pages 3894–3903. Venice. IEEE.
- [4] Schöps, T., Sattler, T., and Pollefeys, M. (2019). SurfelMeshing : Online Surfel-Based Mesh Reconstruction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(10) :14. arXiv : 1810.00729.

Étude et amélioration des échanges entre Géomètre et Architecte et optimisation de la création de BIM à partir de nuages de points



PFE présenté par : **François Potentini**
Société d'accueil : **Cabinet Sibella**
Directeur de PFE : **Guillaume Berwanger**
Correcteurs : **Hélène Macher**
Emmanuel Alby



1. Contexte et objectifs de l'étude

Les architectes sont des acteurs majeurs et incontournables du monde du bâtiment. Depuis le 9 juillet 2016, l'article L431-3 du code de l'urbanisme dispose qu'il est obligatoire de recourir à un architecte pour tout projet de construction supérieur à 150m². De plus, les architectes sont régulièrement nommés maîtres d'œuvre afin d'aider le maître d'ouvrage dans le suivi, l'organisation et la conduite opérationnelle du chantier. Cependant, pour mener à bien les différentes missions qui lui incombent, l'architecte a besoin de documents et de travaux nécessitant l'intervention d'un topographe, et plus précisément d'un Géomètre-Expert.

Le géomètre est donc souvent amené à travailler avec et pour l'architecte. Alors que la collaboration entre ces deux acteurs est très ancienne, il existe encore de nombreux problèmes entravant les différents échanges entre le géomètre et l'architecte. Ces problèmes, d'ordre communicationnel ou technique sont le résultat d'un manque de connaissance et de compréhension des besoins et des capacités de l'autre.

Nous sommes aujourd'hui dans une véritable « ère numérique » où les innovations technologiques permettent chaque année de travailler plus efficacement, plus vite et plus facilement. Le BIM en est un parfait exemple. Depuis une dizaine d'années, il s'est imposé comme un concept permettant d'améliorer à la fois les délais de réalisation d'un projet, la maîtrise des coûts ainsi que la collaboration entre les différents acteurs du bâtiment. Cependant, le BIM n'est encore que très peu utilisé et sa mise en place peut s'avérer longue, difficile et coûteuse. La mise en œuvre du BIM dans une entreprise doit donc être étudiée et réfléchie en fonction de la qualité des solutions qui en découleraient.

Ce PFE a donc deux objectifs majeurs s'articulant autour des deux problématiques citées précédemment :

- Premièrement, il est nécessaire de faire un bilan de l'ensemble des barrières communicationnelles et techniques empêchant une collaboration efficace entre le géomètre et l'architecte. Dans cette partie, nous étudierons les besoins de l'architecte ainsi que les capacités du géomètre pour chercher des solutions ou des pistes de réflexion aux différentes problématiques soulevées.
- Deuxièmement, nous nous intéresserons plus particulièrement au BIM et aux solutions collaboratives qu'il peut apporter. Pour cela, nous évaluerons les trois principaux logiciels de modélisation 3D orientés vers le BIM utilisés par les architectes : Archicad, Revit et Allplan.

2. Le géomètre et l'architecte

a) Les travaux communs

Afin de mieux appréhender l'ensemble des problèmes d'échanges entre géomètres et architectes, il est nécessaire de définir la nature des travaux à réaliser en commun ainsi que le type de relations qu'ils entretiennent en général. Pour cela, deux sondages ont été effectués durant ce projet afin de recueillir plus d'une centaine d'avis de professionnels, d'étudiants et de chercheurs sur le sujet.

Premièrement, les types de missions réalisées en commun concernent notamment les délimitations de terrains, l'implantation d'ouvrages et le dessin de plans 2D (plans topographiques, d'intérieurs, de façades...) ainsi que de plus en plus de modélisations 3D. Les types de fichiers couramment utilisés pour les échanges de données entre le géomètre et l'architecte sont les formats *.dwg, *.pdf, *.txt et *.xyz. On peut également noter la démocratisation du format *.ifc utilisé pour les échanges BIM.

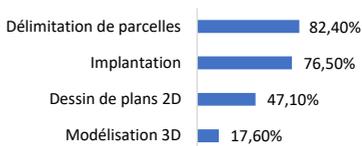


Figure 1 : Missions communes entre les géomètres et les architectes

Cependant, malgré sa démocratisation et les avantages que le BIM propose, ce concept reste encore très peu utilisé notamment chez les géomètres.

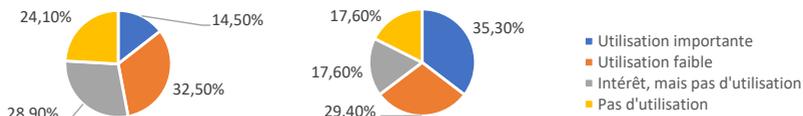


Figure 2 : Utilisation du BIM chez les géomètres (à gauche) et chez les architectes (à droite)

b) Relations historiques et actuelles

Lorsque l'on s'intéresse aux barrières empêchant la bonne collaboration entre le géomètre et l'architecte, on se rend compte qu'il existe un manque de connaissance de l'un envers l'autre. Ce problème est notamment causé par la dualité entre l'ingénieur et l'architecte. En effet, pour Marie, J.-B. (2019), il existe depuis le XVIII^e siècle une séparation flagrante entre ces deux entités, notamment à partir de la création de l'École des ponts et chaussées (1747) et l'École des travaux publics (1794), aujourd'hui devenue l'École Polytechnique. Cette séparation des formations a entraîné ingénieurs et architectes à évoluer séparément pendant plus de deux siècles. Les méthodes et les outils qui ont alors été développés pendant cette période se sont centrés sur des problématiques propres à chaque domaine en particulier sans chercher de solutions à l'intégration du travail de l'autre.

Cette divergence des formations a également engendré une vision caricaturale de l'architecte et de l'ingénieur. L'un est devenu l'homme de l'art, privilégiant le « beau » sans se soucier des contraintes techniques, tandis que l'autre est devenu l'homme de science, trouvant des solutions concrètes, mais inesthétiques.

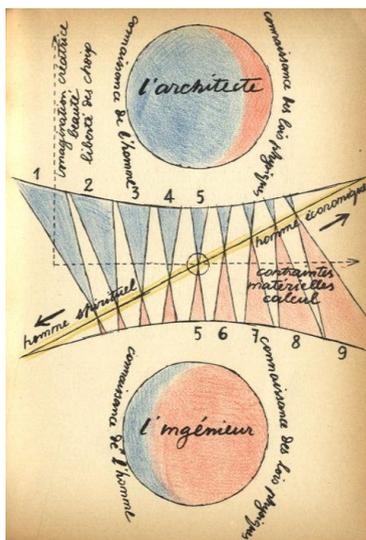


Figure 3 : Répartition des tâches entre l'homme spirituel et l'homme économique, Le Corbusier

Aujourd'hui, ces clichés tendent à disparaître, de même que les problèmes d'interopérabilité. L'aspect collaboratif a pris une place importante dans les méthodes de travail à appliquer en entreprise, notamment porté par la démocratisation du BIM. On constate également un intérêt grandissant à la réunion des formations entre ingénieurs et architectes avec la création de doubles diplômes. Ces bi-cursus peuvent être réalisés dans les 20 Écoles Nationales Supérieures d'Architecture (ENSA) et l'École Spéciale d'Architecture de Paris (ESA) en partenariat avec des écoles d'ingénieurs. Il est également possible de suivre un bi-cursus architecte-ingénieur au sein de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA). Malgré tous ces progrès, de nombreux problèmes techniques et communicationnels restent à résoudre.

c) Problèmes techniques

En plus d'un manque de connaissances des besoins et capacités de l'autre, le manque de collaboration entre architectes et ingénieurs a entraîné différents problèmes techniques au niveau des outils de travail. Pour les échanges entre le géomètre et l'architecte en particulier, les problèmes techniques concernent notamment l'import sur les logiciels « architectes » de certains documents réalisés par le géomètre.

Le problème le plus important est le transfert de MNT. À ce jour, les logiciels les plus utilisés par les architectes sont Revit, Archicad et Allplan, mais ces logiciels ne parviennent pas à importer directement un maillage réalisé par un géomètre. Certaines solutions sont proposées directement par les logiciels, mais les résultats obtenus détériorent les données fournies et obligent les architectes à refaire un travail déjà effectué pour obtenir un rendu final satisfaisant.

Solutions logiciels	Inconvénients
Import d'un nuage de point	<ul style="list-style-type: none"> Les formats de fichiers diffèrent en fonction des logiciels : *.txt et *.xyz pour Archicad, *.csv et *.xyz pour Revit et *.asc pour Allplan. Les lignes de ruptures de pente ne sont pas prises en compte faussant la topographie du terrain.
Dessin à partir de courbes de niveaux	<ul style="list-style-type: none"> Cette solution est uniquement proposée par Revit. L'utilisation de courbes de niveau peut s'avérer utile pour la modélisation de grande superficie où la précision attendue n'est pas élevée, mais s'avère trop vague pour la création d'un maillage précis.
Intégration d'un fichier *.dwg	<ul style="list-style-type: none"> Le maillage importé n'est pas considéré par le logiciel comme un état de terrain à part entière. Sur Archicad, l'import classique de *.dwg ne transfère que la 2D. Il est donc nécessaire d'insérer le fichier en bloc ce qui cause une perte de géoréférencement.
Utilisation du BIM	<ul style="list-style-type: none"> Tout le monde n'utilise pas le BIM Nécessité de bien paramétrer toutes les options de modélisation, d'export et d'import pour obtenir un résultat optimal. Le modèle importé n'est pas toujours modifiable et n'est pas considéré comme un état de terrain à part entière.

Figure 4 : Tableau des solutions d'intégration de MNT directement proposées par les logiciels

Dans ce projet, plusieurs solutions et pistes de réflexion ont été proposées à des architectes afin de corriger ces problèmes, notamment via l'utilisation de fichier *.obj, de logiciels intermédiaires tels que SketchUp ou de plugins.

D'autres problèmes techniques compromettant la collaboration entre géomètres et architectes existent également. Par exemple, la gestion du géoréférencement est une problématique que de nombreux architectes ont rencontrés. Bien que les logiciels proposent directement des solutions à cela, ces dernières sont parfois compliquées à comprendre et à appliquer. De plus, une attention particulière est nécessaire afin de ne pas commettre d'erreurs lors de l'import de données fournies par le géomètre.

3. Étude des logiciels

Le deuxième objectif de ce projet est d'étudier les solutions proposées par les logiciels Archicad, Revit et Allplan concernant la création de maquettes BIM à partir de nuages de points. Pour cela, une campagne d'acquisition de deux semaines a été menée afin de réaliser la modélisation de la clinique psychiatrique de San Ornellu à Borgo, en Corse. Plusieurs types d'acquisitions ont été réalisés :

- 662 stations ont été effectuées pour numériser les 4800m² à l'intérieur du bâtiment avec un scanner BLK360 de Leica.
- Les 1200m linéaires de façades du bâtiment ont été scannés avec un scanner P30 de Leica.
- Une acquisition photogrammétrique des toitures a été faite avec un drone Phantom 4.

Afin d'étudier et de comparer les performances des trois logiciels, un protocole d'étude a été mis en place. Ce protocole vise à évaluer ces derniers sur des critères précis lors de la réalisation d'une maquette 3D et sur certains aspects généraux. Les critères étudiés sont les suivants :

- Intégration de nuages de points
 - Formats de fichiers pris en charge
 - Géoréférencement des nuages
 - Fluidité d'opération, de visualisation et de navigation
- Prise en main du logiciel et des outils
 - Intuitivité des outils
 - Fonctionnalités et performances
- Rendu
 - Types de rendus possibles (maquette 3D, plans, coupes...)
 - Interopérabilité (formats d'exports)
- Caractéristiques générales
 - Coûts
 - Popularité (étendue des supports, formations, plug-ins...)

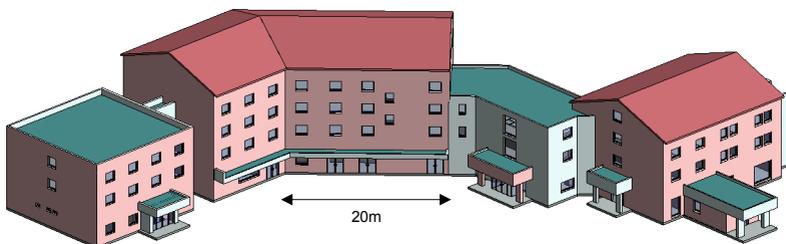


Figure 5 : Maquette 3D de la clinique de San Ornellu sous Revit

4. Conclusion

La collaboration entre géomètre et architecte est encore un sujet trop peu étudié et mériterait un intérêt plus important notamment au niveau des développeurs de logiciels. D'un point de vue technique, les problèmes mis en avant dans ce projet pourraient être corrigés en exploitant les solutions et pistes de réflexion proposées. La création de plug-ins ou d'outils développés au sein même des logiciels existants pourrait être réalisée pour une meilleure interopérabilité entre les logiciels de topographie et d'architecture. Enfin, une communication plus poussée entre géomètres et architectes, notamment lors des phases en amont du projet, permettrait également de mieux comprendre l'autre et ainsi de faciliter grandement la collaboration entre les deux métiers. Pour ce qui est de la comparaison entre les logiciels, l'étude est encore en cours au moment de la rédaction de ce résumé. Les résultats seront présentés lors de la soutenance du PFE.

Bibliographie

Marie, J-B. (2019), *Architectes et ingénieurs face au projet*, Le Moniteur, Antony

Création d'un modèle 3D phasé et valorisation des graffitis de la Tour Heinrich des Ponts-Couverts de Strasbourg



PFE présenté par : **Lisa URFER**

Société d'accueil : **DRAC Grand-Est**

Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,

Equipe TRIO, INSA Strasbourg, Groupe PAGE

Directeur de PFE : **Maxime WERLE**

Correctrice : **Tania LANDES**

Encadrante : **Hélène MACHER**



1. Contexte et objectif de l'étude

Les Tours des Ponts-Couverts de Strasbourg font partie du paysage urbain de cette ville et ce depuis plusieurs siècles. Elles se situent au coeur du centre historique, au sein du quartier de la Petite France. Le site est composé de cinq tours à savoir : la Henkersturm ou Tour du Bourreau, la Hans von Altheimtum, la Französische Turm ou Tour des Français, la Heinrichsturm ou Tour de Heinrich et une dernière tour dissociée des Ponts-Couverts, située quai Schoepflin.



Fig. 1 : Vue sur la tour Heinrich de Strasbourg

Bien que ces tours fassent parties du paysage urbain, nos connaissances à leurs propos sont moindres, voire inexistantes. Afin de pouvoir pallier à cela, un projet pluriannuel, porté par la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) du Grand Est en collaboration avec l'INSA Strasbourg et l'Université de Strasbourg, est né. Cette étude a d'ores et déjà fait l'objet en 2020 d'un Projet de Recherche Technologique (PRT) autour de la Tour Hans von Altheim. Pour cette année, nous avons eu l'opportunité de participer à l'étude d'une autre tour, la Tour Heinrich. Grâce aux récentes études dendrochronologiques qui permettent une datation extrêmement fiable du bois, nous connaissons aujourd'hui assez précisément certaines dates relatives à la tour. Construite vers 1229 dans un but défensif, la Tour Heinrich protégeait l'une des entrées de Strasbourg des envahisseurs arrivant par bateaux. On remarque notamment cette utilisation grâce aux diverses traces laissées par les meurtrières. Une première cellule de grande envergure fut construite au 4ème étage vers 1351 avant la construction des trois autres cellules au 2ème étage vers 1529 confirmant l'utilisation de la tour comme prison. En effet, au fil des siècles, cette tour a subi différentes modifications afin d'en changer son utilisation. L'objectif du Projet de Fin d'Études (PFE) est de permettre une meilleure connaissance de cette œuvre emblématique du patrimoine monumental et touristique de Strasbourg en poursuivant le travail fait lors du PRT qui a permis de réaliser la numérisation, la reconstruction 3D, la réalisation de certains documents graphiques de la Heinrichsturm ainsi que la diffusion et la valorisation au grand public. Notre projet aura pour objectif la mise en valeur des graffitis des cellules ainsi que la réalisation d'un modèle 3D phasé.

2. Création d'un modèle 3D phasé

L'étude de la Tour Heinrich se fait en ce moment même, les différentes productions du PRT ont d'ores et déjà pu apporter une base de travail à l'ingénieur d'étude en charge du site, Maxime WERLE. La segmentation est effectuée sur le nuage de points lasergramétrique obtenu lors du PRT. Cette segmentation s'appuie sur les études dendrochronologies et permettra alors de mettre en valeur les changements qu'a subis cette tour au fil des siècles. En effet, les traces des pièces modifiées sont les témoins du changement selon l'usage. C'est ainsi que six phases ont été définies à savoir :

- A : 1229
- B : 1351 (grande cellule)
- C : 1408 (toiture)
- D : 1529 (cellules)
- E : 16^{ème} siècle jusqu'à 1823 (carcérale)
- F : après 1823

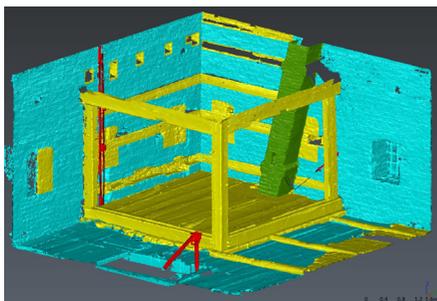


Fig. 3 : Vue de la segmentation du niveau 4 de la tour

Nous prendrons alors soin de générer une visite virtuelle afin de mettre en avant la segmentation faite suite à la définition des phases et diffuser efficacement ces premières observations.

3. Mise en valeur des graffitis

La seconde partie de notre projet vise à mettre en valeur les graffitis et gravures présentes dans les trois cellules du niveau 3 de la Heinrichsturm. Nous avons réalisé plusieurs campagnes photogrammétriques nous permettant d'obtenir un maillage avec une texture de qualité de l'ordre du centimètre. La principale difficulté résidait dans le faible éclairage de ces cellules rendant les graffitis et gravures peu visibles. En effet, les cellules sont petites avec peu de lumière naturelle. Nous avons utilisé des lumières artificielles et avons fait plusieurs essais afin d'obtenir un résultat exploitable proche de la réalité.

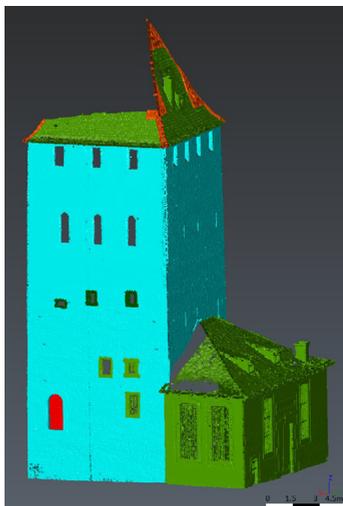


Fig. 2 : Vue de la segmentation de deux façades de la tour

L'avancement de segmentation sera sûrement amené à évoluer. En effet, malgré quelques données archéologiques précises quant à certaines parties de la tour, son étude ne fait que débiter. De ce fait, le maillage de ces diverses parties ne sera pas nécessaire dans l'immédiat.



Fig. 4 : Vue 3D de l'extérieur de la cellule

Une fois nos modèles 3D des cellules prêts, nous avons pu les exploiter pour générer des orthophotographies. Ces orthophotos serviront de base de travail à l'étude archéologique. En effet, elles permettent de visualiser les divers graffitis et gravures sans déformation qui pourrait être présente sur de simples photographies.



Fig.5 : QR Code permettant la visualisation de la cellule 1

Une des problématiques notables de la création de modèles 3D est la diffusion simple et efficace au grand public. Le téléphone portable est aujourd'hui un outil que beaucoup ont constamment sur eux. Néanmoins, il nous faut un outil permettant de visualiser un modèle dense et détaillé sans que l'appareil ne soit saturé. Nous avons alors pu essayer l'outil *Sketchfab* qui permet de visualiser un modèle 3D à l'aide d'une connexion internet, ce qui donne une manipulation accessible à tous. De plus, une fonctionnalité permet de voir le modèle en réalité virtuelle à l'aide d'un simple casque et de la réalité augmentée avec l'application *Sketchfab*.

4. Travaux complémentaires

Lors du PRT, plusieurs acquisitions de différents types n'ont pas pu être effectuées suite à un manque de temps, de moyens ou bien d'autorisations.

Parmi ces diverses acquisitions, nous retrouvons les acquisitions photogrammétriques et lasergrammétriques de niveau -1. En effet, seul un trou d'une cinquantaine de centimètres de diamètre dans le sol du niveau 0 permet l'accès à cette zone. Ainsi, *Spéleo Secours Alsace* nous a permis d'y descendre en toute sécurité. Nous en avons alors profité pour raccorder au reste de la tour l'acquisition lasergrammétrique. Afin de compléter les documents graphiques en générant des orthophotos, nous avons entrepris de faire une campagne photogrammétrique qui nous a permis d'obtenir le résultat visible ci-dessous sur la figure 6.



Fig.6 : Visualisation du trou (gauche) et du maillage 3D texturé à partir de photos du sous-sol (droite)

Nous avons également eu l'opportunité d'acquérir la toiture de la Tour Heinrich à l'aide d'un drone. Ayant une hauteur d'environ 27 mètres, l'acquisition de la toiture était difficile avec des appareils terrestres. De plus, la toiture de la Heinrichsturm a un réel intérêt historique car elle dispose de différents types de tuiles (canales ou plates). C'est alors qu'est née l'hypothèse d'anciennes bretèches grâce à la présence de ces différentes tuiles.

De ce fait, nous avons demandé les autorisations nécessaires et avons pu faire voler le drone en plein centre-ville. Le temps était très ensoleillé, nous avons alors obtenu des différences de couleurs sur les diverses faces de la toiture. Afin d'avoir un meilleur résultat, nous avons appliqué un filtre. La figure 7 représente le résultat obtenu suite au filtrage.

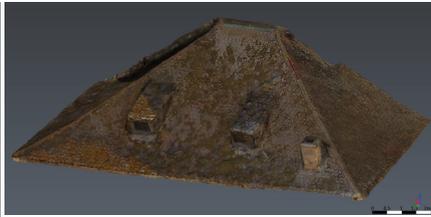
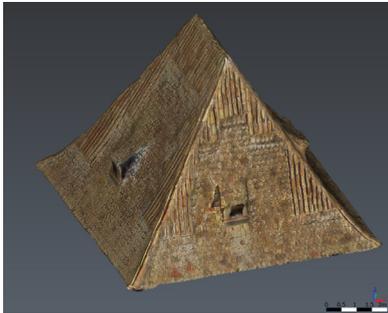


Fig.7 : Visualisation du modèle 3D photogrammétrique des toitures acquises par drone

Durant le PRT, nous avons obtenu un modèle 3D photogrammétrique de l'extérieur de la tour. Néanmoins, certains défauts nous ont amenés à refaire une campagne avec un autre appareil photo, le Canon EOS R5. C'est un appareil photo de type hybride que nous voulions essayer. Grâce aux défauts que nous avons remarqués sur le précédent modèle, nous savions quelles zones seraient problématiques et avons pu essayer d'y pallier. Cependant, l'emplacement géographique et la hauteur de la tour ont été des contraintes persistantes, car au niveau d'une façade le recul est restreint.

Malgré notre principale contrainte, nous avons obtenu un résultat plus que satisfaisant comme nous pouvons le voir sur la figure 8 ci-contre où nous avons également importé la toiture.



Fig.8 : Visualisation du modèle 3D global

5. Conclusion et perspectives

Nos différents modèles sont géoréférencés et nous donnent la possibilité de les réunir plus aisément. De ce fait, nous avons un rendu global très esthétique mettant en avant les zones importantes à l'étude. Ce résultat satisfaisant provient également du fait d'une bonne utilisation et compensation des erreurs. Les tolérances ne sont pas très élevées du fait de la taille du bâtiment et de son état actuel. Néanmoins, la précision centimétrique du cheminement polygonal fait lors du PRT, accompagné de son complément pour le rattachement du niveau 0, nous a permis de travailler sur une base solide et précise.

La génération des documents graphiques de ce projet permet actuellement de continuer l'étude archéologique de cette tour. Ce sont des documents en 2D et il serait dommage de ne pas profiter de notre travail en 3D. C'est ainsi que diverses vidéos ont été réalisées afin de rendre ce travail accessible au grand public et promouvoir par la même occasion le patrimoine culturel.

Le partage des informations est très gratifiant. Néanmoins, plusieurs articles scientifiques mettent en avant l'accès au patrimoine culturel par les personnes non voyantes. Nous avons alors entrepris d'imprimer en 3D le modèle photogrammétrique extérieur. Ce modèle, visible sur la figure 9, a par la suite été prêté à une association permettant l'insertion de personnes malvoyantes ou non voyantes dans des activités sportives. Nous voulions avoir leur retour quant à la compréhension du bâtiment et le niveau de détails. Cette rencontre a été très fructueuse et nous pourrions être amenés à utiliser davantage l'imprimante 3D et développer cet accès aux malvoyants en créant un nouveau projet de fin d'études autour de cette problématique.



Fig.9 : Modèle 3D imprimé

Réalisation d'un outil permettant la génération des plans de niveaux et de ventes de lots de copropriété automatiquement et ajustement sur l'outil existant au sein du cabinet Geosat permettant la génération des EDD et des certificats Carrez.



PFE présenté par : **Pauline Faure**
Société d'accueil : **Geosat**
Directeur de PFE : **Charles Beyries**
Correcteur : **Mathieu Koehl**
Encadrant : **Pierre Grussenmeyer**



Introduction

Aujourd'hui, vu l'intérêt croissant de gagner du temps et conserver les données ; petites, moyennes et grandes entreprises cherchent quotidiennement des solutions informatiques capables de répondre à leurs besoins. L'enjeu de ce mémoire est d'apporter une solution automatique et complète à l'utilisateur lors de la mise en place d'une copropriété. La réalisation des présentations des plans de copropriétés est un processus qui peut être long lorsqu'il s'agit de grands ensembles immobiliers. Mon travail de fin d'études s'inscrit dans ce cadre et consiste à réaliser des applications d'automatisation tant sur la partie écrite de l'état descriptif de l'art et des certificats Carrez que sur la présentation des plans de niveaux et de ventes de lots pour les acquéreurs.

Les plans d'intérieur sont établis pour permettre la vente, la location ou la gestion de locaux ou de bâtiments dans leur intégralité. Le Géomètre-Expert établit par niveau les plans nécessaires à la description du bâtiment ou du local et au calcul de sa superficie avec les cotes, la hauteur sous plafond, la hauteur sous poutre et la désignation des pièces. Dans l'état descriptif de la copropriété, il est indispensable de prévoir l'établissement de plans réguliers, comprenant habituellement plan d'ensemble et plan d'intérieur. Ces documents permettront par la suite la numérotation des lots et la détermination exacte des parties communes et des parties privatives. Ils serviront également au calcul des superficies privatives (définies par la loi Carrez) et toutes autres superficies. Les plans d'intérieur de copropriété remplissent aussi un rôle non-négligeable d'illustration de l'état descriptif de division. Le plus souvent au 1/100ème, ils permettent de repérer les parties communes et de situer les lots.

Le service Foncier – Copropriété du cabinet Geosat traite les dossiers de copropriété en partant des plans d'intérieurs, soit fournis par le maître d'ouvrage au format DWG, soit réalisés par le cabinet. Les plans d'intérieurs sont travaillés sur AutoCAD pour diviser l'immeuble en lots privatifs et parties communes. L'automatisation de la présentation de plan de niveaux et de vente de lot permettra de réduire le temps consacré à leurs réalisations, mais aussi de réduire le risque d'erreur.

Le cabinet Geosat n'a pas imposé le logiciel qui permettrait de répondre à la problématique et c'est finalement pour FME que nous avons opté. Largement utilisé dans le pôle SIG de l'entreprise, c'est aussi le logiciel qui a permis de créer l'outil existant pour la génération de documents techniques et juridiques de la copropriété. Par ailleurs, nous avons pu apprécier la puissance de ses transformateurs, son espace de travail intuitif et les échanges très actifs au sein de sa communauté.

Les deux outils que nous avons mis en place aujourd'hui prennent en entrée les plans de la copropriété au format DWG, les différents cartouches, les logos des entreprises, les surfaces dites Carrez des lots et génèrent en sortie les plans présentés au format PDF.

Un outil déjà existant

En 2020, un étudiant de l'ESGT a entrepris ses travaux de fin d'étude avec pour sujet : « Mise en place d'un outil sous FME permettant la génération automatique des Etats Descriptifs de Division et les certificats de surface correspondants ».

La rédaction des documents de copropriété consiste à produire l'EDD (Etat Descriptif de Division), le RCP (Règlement de copropriété) et les certificats de surfaces CARREZ. Ce processus comporte des tâches répétitives et un risque d'erreur de retranscription des informations depuis les plans de copropriété. L'automatisation de ce processus permet de réduire le temps consacré au montage des dossiers de copropriété, réduire le risque d'erreur et laisser au rédacteur la possibilité de se focaliser sur des questions d'expertise. L'outil mis en place génère l'EDD et les certificats Carrez, à partir des plans de la copropriété au format DWG. Il interprète tous les éléments du dessin et calcule automatiquement les tantièmes de copropriété, des charges générales et des charges spéciales éventuelles.

Au total, trois chaînes de traitements ont été mises en place sur FME. L'étudiant a choisi de diviser le processus en plusieurs routines afin de permettre à l'utilisateur de contrôler les résultats intermédiaires et de pouvoir les modifier. Cela permet aussi de réduire le nombre d'interventions sur les documents finaux.

L'outil est implémenté en quatre étapes. Chaque Workspace prend en entrée le résultat du précédent. Ces traitements génèrent dans un premier temps le fichier Excel données.xlsx. Il contient toutes les informations de la copropriété présentes sur les plans. Ensuite il génère un fichier Excel tantièmes.xlsx contenant les calculs de tantièmes et de charges générales et spéciales éventuelles. Et pour finir, il écrit les documents Word edd.docx et certificats_carrez.docx. Ces trois documents sont générés sur la base de trois modèles pré remplis, stockés dans un dossier « templates ».

À la suite du TFE, les équipes de Geosat n'ont pas utilisé l'outil car il y avait quelques problèmes au niveau des scripts Python du programme. L'objectif de cette première partie du stage était de comprendre pourquoi les équipes n'arrivaient pas à se servir de l'outil et de corriger ces bugs.

Dans un second temps, nous avons ajuster l'outil dans le but d'élargir son champ d'application à différents schémas de copropriété qui n'avaient pas été pris en compte et nous avons simplifié la saisie des données dans le fichier DWG en amont.

Les plans de niveaux et de ventes de lots

Les plans d'intérieur sont établis pour permettre la vente, la gestion ou la location de locaux ou de bâtiments dans leur intégralité. Ainsi, le Géomètre-Expert établit par niveau les plans nécessaires à la description du bâtiment et au calcul de leur superficie dans le cadre d'une copropriété par exemple. Bien qu'il n'y ai pas d'obligation par la loi d'annexer les plans de niveaux à l'état descriptif de division, le plan de copropriété est un document d'illustration permettant de déterminer, localiser et identifier tous les lots ainsi que les locaux communs au sein d'une copropriété.

Enfin, dans le cadre de la vente de tout bien situé au sein d'une copropriété, une certification de surface privative dite loi Carrez (l'article 46 de la loi du 10 juillet 1965.) doit être obligatoirement fournie. La surface privative, appelée superficie Carrez, est la superficie des planchers des locaux clos et couverts après déduction des surfaces occupées par les murs, cloisons, marches et cages d'escaliers, gaines, embrasures de portes et de fenêtres. Les placards encastrés dans une embrasure ainsi que les placards avec une marche ne sont pas comptabilisés. Enfin, il n'est pas tenu compte des planchers des parties de locaux d'une hauteur inférieure à 1,80 m.

La réalisation des présentations des plans de niveaux et plus particulièrement de ventes de lots est un processus qui peut être long lorsqu'il s'agit de copropriétés composées de plusieurs bâtiments et de nombreux étages. Ainsi, les échanges avec les techniciens DAO de l'entreprise nous ont permis d'identifier un ensemble de besoins.

Les besoins de l'entreprise

Geosat souhaite un outil capable de lire les fichiers DWG d'AutoCAD contenant les plans de copropriétés et de les orienter automatiquement dans les cartouches. Un outil qui puisse suivre les indications de l'utilisateur pour la mise à l'échelle des plans, l'identification de la copropriété dans le cartouche et le choix d'une présentation au format A4 ou A3. Cependant, pour la génération des plans de ventes de lots, l'outil doit être en mesure d'adapter une présentation orientée portrait ou paysage en fonction de la configuration du plan, et reconnaître un lot en duplex afin de positionner les deux niveaux du lot sur la même page.

Par ailleurs, certains objets dans le logiciel AutoCAD n'ont pas les mêmes couleurs ni épaisseurs de traits avant et après impression. Geosat souhaite donc un outil qui puisse forcer certaines propriétés à la génération des PDF et conserver l'ordre de positionnement des calques. De plus, l'outil doit pouvoir renseigner les caractéristiques principales du lot ou du niveau tel que l'étage, le bâtiment, le numéro de lot, les numéros d'appartement/maison s'ils sont présents, l'orientation de la flèche nord et enfin mettre en surbrillance le lot présenté au sein d'un plan de situation sans échelle.

Enfin, l'utilisateur doit aussi pouvoir insérer le logo des clients s'il s'agit d'une entreprise et indiquer s'il le souhaite la surface Carrez. Les présentations de lot doivent être générées dans l'ordre, c'est-à-dire par numéro de lot lorsqu'un seul bâtiment est présent ou bien par numéro de bâtiment puis par numéro de lot s'il y en a plusieurs. Même principe pour les présentations de niveaux, mais en remplaçant le numéro de lot par l'étage.

Implémentation des outils

Nos outils font partie des logiciels applicatifs. Il s'agit du type le plus courant aussi appelé application informatique. C'est un logiciel dont les automatismes sont destinés à assister un utilisateur dans une ou plusieurs de ses activités. Le processus global consiste à lire un fichier DWG, en extraire les différentes entités géométriques et textuelles et générer les plans de niveaux et de ventes de lots au format PDF. A la demande des techniciens DAO de Geosat, nos outils ont été conçus de façon « sur-mesure ».

Le DWG est un format binaire et propriétaire d'échange de données et de stockage de la société Autodesk. AutoCAD fait partie des nombreux formats que le logiciel FME est capable de lire et écrire. Dans FME, chaque entité AutoCAD est référencée dans le dessin par un attribut de format. C'est un moyen de filtrer, manipuler et comprendre les contraintes qui s'appliquent à la donnée.

Pour que le rendu visuel soit harmonieux, Geosat a choisi d'adapter ses présentations en fonction de la configuration du lot : simple, duplex orienté portrait, duplex orienté paysage. Le cartouche est aussi la carte d'identité du dessin, il rassemble les éléments essentiels. La lecture des fichiers des plans et des cartouches est réalisée par un Reader au format DXF/DWG, tous les deux paramétrés pour grouper les entités appartenant à chaque calque, par nom de calque. La lecture du logo de l'entreprise est réalisée par un Reader au format Raster/PNG. La sortie est effectuée par un Writer au format PDF.

Pour extraire automatiquement les données du dessin de façon normalisée, nous avons choisi d'élaborer une charte AutoCAD organisée sur la base de six calques. Nous les utilisons afin de ne pas modifier le dessin d'origine. Les éléments imprescriptibles y sont copiés. Les quatre premiers calques contiennent des entités textuelles comme le nom des étages, les numéros d'appartement, les numéros de lots et le nom du/des bâtiments. Tandis que les deux derniers sont composés d'entités géométriques à savoir : les contours de lots de ventes et les contours en versions simplifiés des lots de ventes pour les plans de situations.

Pour réussir à :

- placer le lot dans le bon cartouche A3 ou A4, paysage ou portrait et duplex ou non,
- renseigner les informations textuelles,
- mettre le lot en avant dans un plan de situation en dessinant une hachure rouge,
- orienter la flèche nord,
- mettre le plan à l'échelle
- et ordonner les pages

Il est nécessaire de croiser les entités afin qu'elles partagent des attributs en communs (bâtiment, numéro de lot, étage...). Ainsi, dans le dessin, les données brutes telles que les entités géométriques et les désignations textuelles sont fragmentées. Pour cela, nous avons réalisé des jointures attributaires et spatiales de différents types.

Enfin, pour que l'utilisateur puisse saisir les renseignements de la copropriété comme les éléments du cartouche et qu'il n'ait pas besoin de renseigner toutes ces données sur AutoCAD, nous avons utilisé les propriétés du User Parameters.

Conclusion

Finalement, il est intéressant de voir que les solutions mises en place pour répondre à la problématique de ce projet de fin d'étude sont un véritable gain de temps pour le service Foncier de l'entreprise. Il s'agit d'une solution globale, relativement complète entre la présentation des plans de copropriétés, la génération de l'EDD, des certificats Carrez et la présentation des plans de ventes de lots.

Ainsi, une fois les plans dessinés, les présentations des plans de niveaux sont générées avec l'outil et envoyées aux clients comme une première proposition de découpage de l'ensemble immobilier. Le client peut ainsi valider les plans ou demander des modifications. Le dessinateur peut effectuer des ajustements sur les plans et la routine des présentations est relancée rapidement. Auparavant, s'il s'agissait d'une erreur dans le cartouche par exemple, à la main, l'utilisateur devait reprendre les présentations une par une. Aujourd'hui, il modifie simplement les paramètres utilisateurs avant de lancer la routine.

Ensuite, l'outil de mise en copropriété de l'étudiant de l'ESGT permet de générer rapidement les documents techniques et juridiques. Grâce aux ajustements que nous avons réalisés, il est maintenant plus performant, puisque nous avons élargi son champ d'application et qu'il nécessite moins l'intervention de l'utilisateur dans la correction des documents générés.

Enfin, le temps passé à réaliser les plans de ventes de lots des grands ensembles immobiliers pouvait être très long, car beaucoup d'éléments sont à renseigner, c'est un travail fastidieux et répétitif qui pouvait être la source de nombreuses erreurs.

En outre, étant donné les enjeux actuels et futurs liés à l'extraction, l'exploitation et l'archivage des données, la maîtrise d'un outil tel que FME est une valeur ajoutée au profil de l'ingénieur géomètre-topographe.

Outil	Temps gagné en pourcentage
Plans de niveaux	50%
EDD et Certificat Carrez	70%
Plans de ventes de lots	80%

Conception d'un outil de visualisation 3D et de visite virtuelle orienté web

PFE présenté par : **Elisa LEMBERT**
Société d'accueil : **ARCHIMED-GE**
Directeur de PFE : **Sylvain DAILLY**
Correctrice : **Tania LANDES**
Encadrant : **William HUCK**



1. Contexte et objectif

L'agence ARCHIMED-GE est un cabinet de géomètres-experts associés composé de trois pôles : un pôle foncier, un pôle topographie et un pôle copropriété.

Ce dernier livre actuellement des plans d'intérieur ainsi que des plans de façade constitués sur la base de numérisations par scanner laser terrestre statique (SLT). A la demande des clients, elle propose également des outils de visualisation et d'exploration de modèles 3D ou nuages de points (Trimble Scan Explorer Viewer par exemple). Ces outils sont cependant très peu orientés grand public et n'offrent que peu de fonctionnalités. Dans le cadre de l'amélioration de cette proposition, l'entreprise souhaite développer une solution interne, un outil de visualisation et de visite virtuelle orienté web de modèles 3D basés sur les données déjà acquises et utilisées pour la conception desdits plans.

C'est dans ce cadre que ce Projet de Fin d'Études (PFE) prend sa place. Son objectif est de faire évoluer les solutions déjà employées par le cabinet dans le but de développer un outil orienté web, permettant la visualisation et la manipulation d'un modèle 3D quelconque. Il s'agit donc de mettre en place une solution globale indépendante de la nature du modèle à importer, tout en permettant de traiter tous les modèles tridimensionnels issus des relevés passés et futurs de l'entreprise.

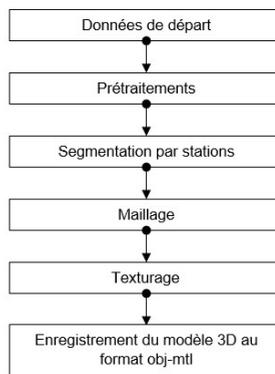
Nous allons donc à présent aborder brièvement les grandes étapes menant à l'aboutissement de ce projet.

2. Mise en place d'une chaîne de traitements aboutissant à un modèle 3D maillé-texturé

Le nuage de points, issu dans ce contexte d'acquisitions par SLT, est une sorte de source de données directe particulièrement adéquate pour cartographier l'espace urbain et reconstruire des bâtiments en trois dimensions. Son emploi permet également de rationaliser les étapes de modélisation et reconstruction de ces environnements particuliers.

Le nuage de point est donc ici la donnée de base qui permet d'aboutir au modèle 3D ensuite utilisé comme support de visualisation et d'interaction dans l'application web. La mise en place d'une chaîne de traitement permettant d'aboutir à ce type de modèle constitue donc le premier jalon de cette étude.

Figure 1 : Chaîne de traitement mise en place pour la génération de modèle 3D



La première étape consiste dans le prétraitement des données. En effet, pour obtenir un nuage global de l'environnement étudié, il faut commencer par assembler les différentes acquisitions en réalisant une étape de consolidation des données. Ici, c'est un recalage nuage-nuage basé sur la recherche de points homologues qui est effectué (recalage relatif). Puis, un échantillonnage régulier à 1cm est effectué sur l'ensemble des données, ce qui permet d'obtenir un nuage allégé sans compromettre la qualité et l'abondance des détails.

La scène globale est ensuite segmentée en deux parties. Cette segmentation basée sur les stations permet de séparer les données relatives aux façades de celles relatives à l'intérieur du bâti. Cette étape est nécessaire car ces données doivent être modélisées séparément. Ensuite, on reconstruit la géométrie 3D des objets. Le maillage est ici obtenu par triangulation de Delaunay en utilisant un algorithme de croissance en régions. Plusieurs essais avec variations de paramètres ont en effet été réalisés : algorithme de reconstruction du maillage basé sur une triangulation de Delaunay ou une reconstruction par surface de Poisson, réduction adaptative de la taille du maillage, nombre maximum de triangles autorisés, poids maximum du maillage, taux de lissage du maillage. Après étude, c'est ce résultat que nous avons trouvé comme offrant l'alternative la plus pertinente au vu des résultats recherchés.

Finalement, il s'agit de donner un aspect réaliste au modèle 3D. Pour cela, on lui applique une texture. Cette texture est générée à partir des données RVB de chaque point du nuage initial. Cette méthode fournit un bon compromis entre réalisme et limitation du poids des données. En effet, le modèle 3D final ne doit pas excéder un certains poids, sous peine d'avoir une visualisation et manipulation sur l'interface longue et complexe.

Enfin, le modèle 3D maillé-texturé est enregistré au format obj-mtl, permettant ensuite son intégration dans l'application web.

3. Développement de l'outil web et de son interface utilisateur

La fonctionnalité développée étant une application orientée web, les langages de programmation employés tout au long de ce projet ont été : JavaScript, HTML et CSS. En effet, ces trois langages constituent la base du développement web frontal, permettant la création d'éléments interactifs en ligne.

Sur cette base, l'HTML (langage de balise hypertexte) et le CSS constituent les deux premières couches des technologies standards du web, permettant de créer du contenu statique et de le mettre en forme sur une page. Le JavaScript intervient ensuite, en tant que troisième couche, pour implémenter des mécanismes plus complexes et permettre de rendre une page interactive voire dynamique. Complété par l'API WebGL (Web Graphic Library), le JavaScript permet alors de créer directement sur une page web des graphiques 2D et 3D interactifs. Le WebGL reste cependant un système ne permettant pas de générer des graphiques complexes. De ce fait, la bibliothèque OpenSource ThreeJS a été employée pour l'ensemble du développement. Celle-ci permet en effet de faciliter la création et la gestion d'environnement 3D dans les navigateurs, et donc de gérer efficacement le rendu de modèle 3D comme ceux avec lesquels nous travaillons ici.

3.1. Mise en place d'une scène et de son environnement

L'implémentation d'une application en ThreeJS débute par la création d'un environnement appelé une scène. C'est cette scène qui va être le contenant de l'ensemble des éléments que l'on va ensuite ajouter à l'application. Cette dernière est associée à un ensemble d'objets qui gèrent les paramètres de rendu et d'affichage de la scène. Ils sont connectés entre eux au sein d'un graphe scénique sous forme de structure arborescente. Les objets qui ont été employés sont les suivants :

- ◆ Un moteur de rendu (*renderer*) qui permet de restituer la scène et ses composants sous forme d'image 2D, et de les afficher à l'écran à chaque fois qu'il est actualisé ;
- ◆ Une caméra qui permet la visualisation de la scène au sens de la vision humaine. Ce constructeur prend en compte 5 paramètres : le type de projection appliqué aux graphiques de la scène pour le rendu et 4 paramètres qui permettent de définir le frustrum de la caméra : le champ de vision de la caméra, le rapport hauteur/largeur de la caméra, la profondeur de champ de la caméra (plan le plus proche et plan le plus éloigné) qui délimite l'intervalle en distance dans lequel des objets sont visibles ;

- ◆ Des lumières utilisant le principe du PBR (*Physically Based Rendering*) et qui permettent d'éclairer les objets de la scène de manière réaliste, en utilisant la physique pour calculer la manière dont un élément et sa surface interagissent avec les faisceaux lumineux issus des sources.

3.2. Contrôle et navigation au sein du modèle

Maintenant que notre scène est créée et paramétrée, il s'agit de la remplir. La première étape consiste ici à importer le modèle 3D précédemment créé. Il est ainsi ajouté à la scène par le biais d'un *MTL-OBJ-Loader* et positionné en son centre.

Il ne reste alors plus qu'à définir les différentes options de visualisation et de manipulation du modèle. Le choix a été fait d'implémenter trois options :

- ◆ La première définie est une vue 3D, au sein de laquelle on peut orbiter autour du modèle, le translater ou encore zoomer dessus ;
- ◆ La seconde permet d'accéder à une vue de dessus en plan du modèle ;
- ◆ La troisième est une vue 3D en plein écran. Elle reprend le principe de la vue 3D précédente, avec la différence d'un affichage en plein écran de la page du navigateur.

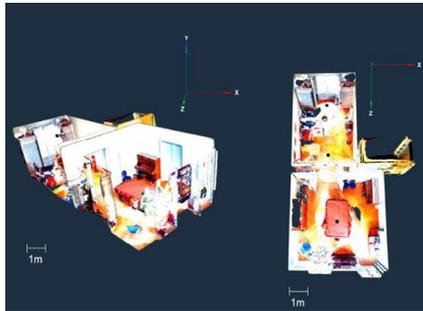


Figure 2 : Vue 3D (gauche) et Vue de dessus (droite) du modèle 3D proposées dans l'application web

3.3. Mise en place d'une solution de visite virtuelle

Le premier vrai outil proposé pour cet application est une solution de visite virtuelle. L'utilisateur peut y accéder de deux manières :

- ◆ Une première solution consiste à utiliser l'onglet « Visite Virtuelle » intégré à l'interface. Suite au clic, l'utilisateur se retrouve plongé au sein du premier panorama 360° sphérique généré lors des acquisitions. Deux flèches lui permettent alors de naviguer au sein des photographies : une flèche bleue permet le passage au panorama précédent, tandis qu'une flèche verte permet le passage au panorama suivant.
- ◆ Une seconde solution a été mise en place pour permettre à l'utilisateur de débiter sa visite virtuelle depuis un endroit quelconque du bâtiment. Pour ce faire, de petites sphères modélisent l'emplacement des différentes stations du projet. En double-cliquant sur l'une d'elle, l'usager est plongé en immersion dans la panoramique associée. Il peut ensuite se déplacer au sein des images comme dans la première solution, en utilisant les deux flèches de navigation mises à sa disposition.

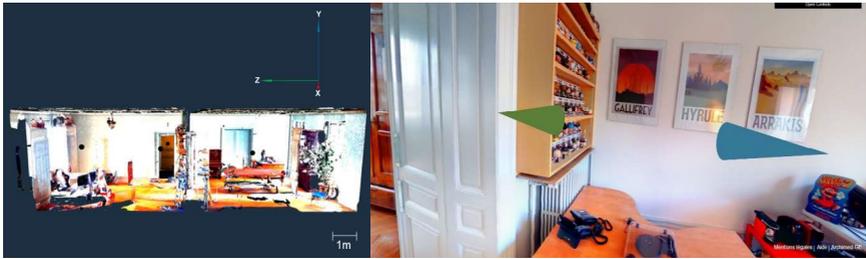


Figure 3 : Solution de visite virtuelle proposée dans l'application web : accès au sphère (gauche) et immersion au sein des panoramas (droite : vue sans échelle)

3.4. Mise en place d'une solution de mesure

Le second outil créé est un outil de mesure. Il fonctionne sur le principe suivant : pour l'activer, l'utilisateur doit cliquer sur l'onglet qui lui est relatif. Un message apparaît alors à l'écran, l'informant du fonctionnement de ce module. Pour lancer une mesure, la touche contrôle du clavier doit être maintenue enfoncée, puis le premier point de la mesure est déterminé par un clic gauche avec la souris, et il en va de même pour la détermination du second point de la mesure.

Visuellement, le curseur prend l'apparence d'un pointeur (croix). La distance est figurée par un trait rouge et sa valeur, donnée en mètres, est affichée au centre de la ligne de mesure grâce à une étiquette. Ce résultat est visible sur la figure 4 :



Figure 4 : Outil prise de mesures sur modèle 3D proposé dans l'application web

4. Conclusion et perspectives

Lors de ce projet, nous nous sommes intéressés à la mise en place d'une interface de visualisation et manipulation de modèle 3D orientée web, couplée à des solutions de mesure et de visite virtuelle.

Dans un premier temps, il a donc fallu mettre en place une chaîne de traitement aboutissant à un modèle 3D maillé-texturé, visuellement de qualité et dimensionnellement précis. Ce modèle doit être créé depuis des acquisitions lasergramétriques terrestres, et plusieurs solutions ont été testées avant d'aboutir à un choix concernant les méthodes de consolidation, maillage et texturage à appliquer.

Dans un second temps, ce projet a permis la conception d'un outil directement exploitable sur un navigateur web. Il permet ainsi, pour un client du cabinet, la valorisation de ces données à moindre coût pour l'entreprise. Ceci en lui offrant l'accès à différentes nouvelles fonctionnalités : visualisation et navigation au sein du modèle 3D tel que saisi de son patrimoine immobilier, accès à un outil de mesure, accès à un outil de visite virtuelle par photographies panoramiques lui permettant d'explorer ses biens de manière réaliste.

Zones humides et aménagements urbains

PFE présenté par : **Jade LAUTIER**
Société d'accueil : **URBACTIS**
Directeurs de PFE : **M. Jacobus VOS**
M. Sébastien LE PAPE
Correcteur : **M. Emmanuel ALBY**



1. Contexte et objectifs de l'étude

La notion de zones humides a grandement évolué au cours des années. La dernière définition de la zone humide date de juillet 2019 : « *On entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire, ou dont la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hydrophiles pendant au moins une partie de l'année.* ». À chaque nouvelle définition, de nouvelles réglementations se mettent en place et les inventaires des zones humides s'élargissent par la même occasion. Jusqu'à présent, pour être classée en zone humide, il fallait être une zone inondée de façon permanente ou temporaire et avoir sur son sol des plantes hydrophiles. Dorénavant, seul un de ces deux critères est suffisant pour classer un terrain en zone humide.

Depuis peu, lors de la préparation d'un projet urbain, une étude pédologique est effectuée pour identifier des zones humides potentiellement présentes sur le site. Hors, il est rare que les notions touchant ces zones soient connues des géomètres ou des bureaux d'études.

Pour pallier à ce problème, l'entreprise Urbactis veut connaître plus en détail les réglementations autour de ce thème, comment faire cohabiter les aménagements en respectant les qualités environnementales et à quel moment un projet d'aménagement n'est plus économiquement faisable. Elle veut ainsi intégrer plus souvent la notion de génie écologique dans ses travaux en accord avec l'environnement tout en continuant à travailler sur des projets urbains.

Les problématiques principales ici sont de savoir :

- Quelles sont les réglementations à respecter ?
- Comment identifier une zone humide ?
- À quel moment distingue-t-on une zone humide avec une valeur écologique forte, moyenne ou faible ?
- Si la zone humide est considérée à valeur faible, quels types d'aménagements peuvent être effectués ?

Ainsi, les objectifs de ce PFE sont :

- De comprendre et d'analyser les réglementations sur les zones humides, ainsi que leur fonctionnement et les méthodes pour les détecter ;
- D'analyser en détail la doctrine ERC (= Eviter, Réduire, Compenser) ;
- De travailler sur des cas concrets d'aménagement sur une zone humide en orientant la réflexion sur la base de la doctrine ERC.

2. Doctrine ERC (=Éviter, Réduire, Compenser)

La doctrine ERC permet de lier les questions environnementales et la conception de projet. Elle insère les différentes dimensions du développement durable (environnementale, sociale et

économique) et guide vers une meilleure adaptation des décisions sur un projet. Cette doctrine se décompose en trois axes qui sont éviter, réduire et compenser.

Tableau 1 : Tableau synthétisant les notions de la doctrine ERC (Éviter, réduire, compenser)

Doctrine	Définition	Méthodes
Éviter	Cette solution permet de protéger complètement une zone. Lors d'un aménagement urbain sur une zone à protéger, l'évitement est la modification du projet pour supprimer les impacts négatifs pouvant se traduire sur un site aux enjeux environnementaux.	<ul style="list-style-type: none"> - L'évitement en « amont » - L'évitement géographique - L'évitement technique - L'évitement temporel
Réduire	Dans cette phase, l'évitement est impossible et ses raisons ont été clairement définies, donc la réduction prend la place. Des impacts négatifs permanents ou temporaires seront réalisés sur la zone, la réduction permet de diminuer ces conséquences au maximum lors de la phase de chantier ou la phase d'exploitation.	<ul style="list-style-type: none"> - La réduction géographique - La réduction technique - La réduction temporelle
Compenser	<p>D'après l'article R122-14 du code de l'environnement : « Les mesures compensatoires ont pour objet d'apporter une contrepartie aux effets négatifs notables, directs ou indirects, du projet qui n'ont pu être évités ou suffisamment réduits. Elles sont mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou à proximité de celui-ci afin de garantir sa fonctionnalité de manière pérenne. Elles doivent permettre de conserver globalement et, si possible, d'améliorer la qualité environnementale des milieux. »</p> <p>La compensation doit suivre 5 règles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'équivalence écologique ; - Un objectif d'absence de perte nette ou un gain en biodiversité ; - La proximité géographique, c'est-à-dire essayer de se trouver dans le même bassin versant ; - Une obligation de résultats ; - Une pérennité dans le temps avec un suivi et une gestion de cette zone. 	<ul style="list-style-type: none"> - Par restauration - Par réhabilitation - Par création ou renaturation <p>Entre ces trois compensations, c'est la restauration qui doit être privilégiée. Le risque d'échec est moindre.</p>

La doctrine ERC est donc la base et le support sur la réflexion autour de la protection et de l'aménagement sur une zone humide.

3. Évitement : Inventaire des zones humides pendant la phase d'évolution d'un PLU

3.1. Problématique

La découverte de beaucoup de zones humides se fait souvent dans un stade avancé de la réflexion du projet, quand le site a été choisi et l'aménagement a été réfléchi. Le principe d'évitement est alors plus difficile à mettre en œuvre, soit le projet met en place une compensation soit il est annulé, faute de moyen financier suffisant pour réduire la zone impactée.

3.2. Solution

Une méthode qui pourrait permettre d'augmenter la maîtrise de l'évitement est d'identifier les zones humides sur une commune lors de l'évolution d'un PLU. Cela permettra ainsi de connaître bien

en avance les zones à éviter et de ne pas créer des projets qui ne pourraient ne jamais voir le jour. L'impact des zones humides n'est pas très connu des communes, un travail de communication doit être mis au point de plus en plus souvent pour faciliter les démarches par la suite.

Un coût supplémentaire est à prévoir lors de l'évolution du PLU, des acteurs qui ne sont pas prévus au départ comme les écologues se rajoutent au projet et la mise en place de ses nouvelles OAP (=Orientation d'Aménagement et de Programmation) impliqueront un temps supplémentaire. Mais au final et sur un plus long terme, cette perte économique et temporelle sera rattrapée par la suite. En effet, cette technique apporte beaucoup d'avantages pour le porteur de projet, les aménageurs et les bureaux d'études. Le passage de l'écologue sur la commune sera réduit puisqu'il connaîtra toutes les zones à analyser. Les zones de compensation seront identifiées plus tôt, ce qui permettra aux aménageurs d'avoir un plan d'action efficace avant d'effectuer les travaux et ainsi la réussite des compensations sera augmentée. Les porteurs de projet n'auront pas de mauvaises surprises après la mise en place de leur aménagement sur un site qui aura déjà été inspecté. De plus, l'identification des zones humides permettra de mieux les préserver et de les mettre en valeur.

4. Enjeux et valeurs d'une zone humide

Les zones humides ont longtemps été classées en fonction de leur valeur directe telle que leur avantage pour le climat ou leur niveau de biodiversité. En effet, des tableaux permettent d'identifier les zones avec une forte biodiversité autant pour la faune que pour la flore. Cependant avec la constante augmentation de leur nombre, surtout depuis la nouvelle loi de juillet 2019, la demande d'un affinement de cette classification se fait ressentir. Pour ce faire, il faut connaître les enjeux et les valeurs des zones humides qui la touchent directement et indirectement.

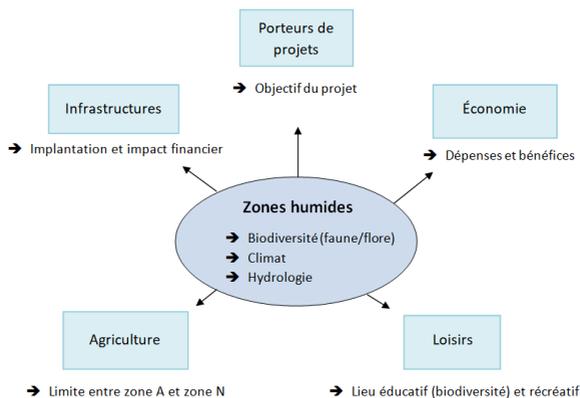


Figure 1 : Illustration des enjeux directs et indirects des zones humides

De nombreux facteurs touchant la zone humide sont à prendre en compte, plus particulièrement lors d'aménagements urbains :

- Les porteurs du projet (collectivités territoriales, acteurs privés...) : L'aménagement sur une zone humide touche les différents porteurs de projet. Il faut donc penser à prendre en compte l'objectif de ces travaux sur la zone humide. En effet, l'annulation d'un projet peut avoir un grand impact sur les plans d'une commune ;
- L'infrastructure : Tous les travaux ne sont pas simples à effectuer sur une zone humide. Il faut prendre en compte l'impact financier qui peut être plus important et donc faire une comparaison entre les prix d'une compensation et les prix des travaux sur les infrastructures ;
- L'agriculture : Les zones humides viennent souvent contraindre les techniques d'agriculture actuelle et donc obligent à faire passer une zone A (= Agricole) en zone N (= Naturelle) ;

- **Les loisirs** : La zone humide peut servir à éduquer toutes les nouvelles générations pour son rôle sur la biodiversité et également servir de lieu récréatif.
- **L'économie** : Les porteurs de projet regardent en détail les dépenses et les bénéfices, il faut donc voir le résultat final entre le coût de la protection de la zone humide et le coût des travaux.

Toutes ces valeurs doivent être prises en compte lors de la classification d'une zone humide. Le but ici est d'utiliser tous ces caractères pour savoir quels sont les plus importants à prendre en compte et pouvoir ainsi connaître l'enjeu d'une zone humide. Sa biodiversité ne doit pas être le seul élément utilisé mais les autres valeurs peuvent être d'un côté une raison supplémentaire de la protéger mais, cela peut également montrer que la zone humide freine l'avancée d'évolution de la commune et de son territoire.

5. Réduction et compensation : Aménagement urbain sur une zone humide

5.1. Analyse des problématiques

Avant de pouvoir trouver des solutions pour une bonne intégration des zones humides au sein de projets urbains, il faut analyser les différentes problématiques : problème de compatibilité entre environnement et urbanisation, difficulté de communication entre les différents acteurs, facteur économique, mentalité à changer, personnes responsables de la gestion et du suivi de la zone humide après une compensation.

5.2. Solutions possibles pour un aménagement urbain sur une zone humide

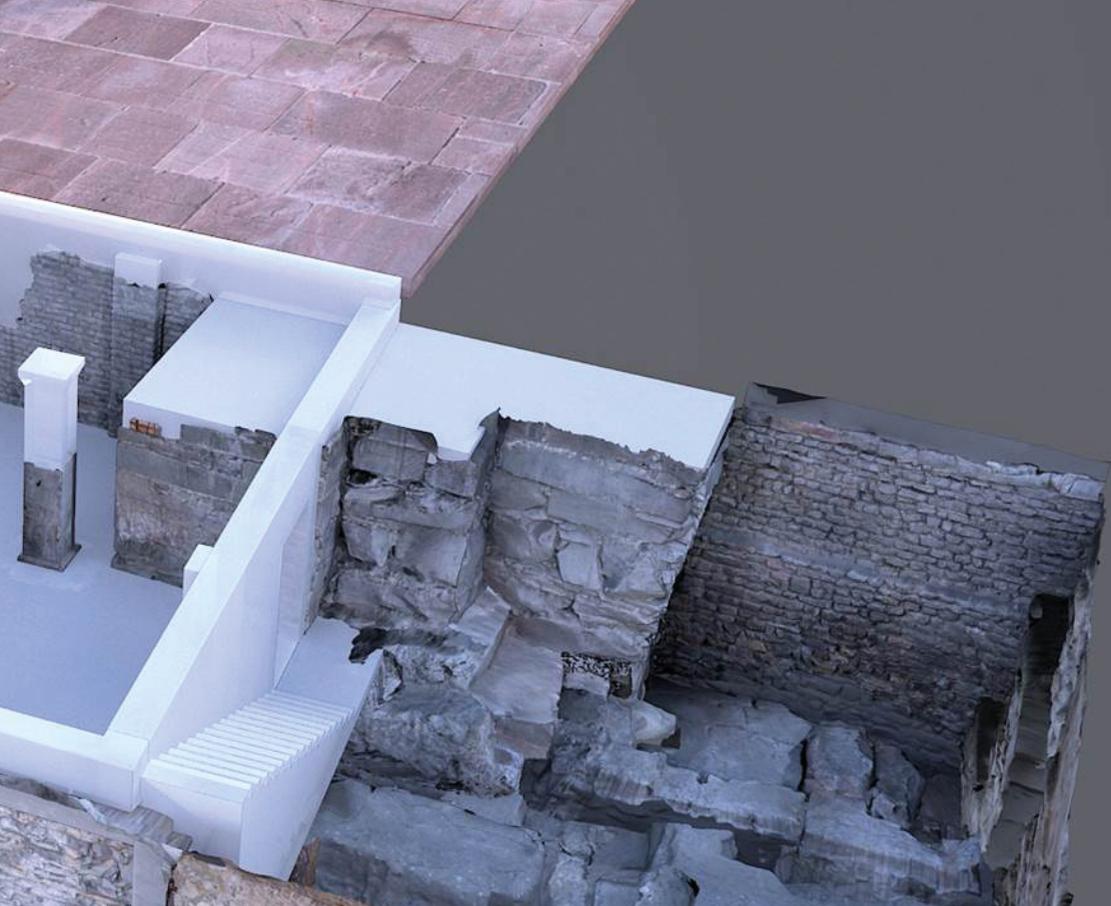
L'éco-quartier met en avant le développement durable. Dans sa charte, les différents points à mettre en œuvre placent l'environnement au centre. Tous les aspects se rejoignent pour faire en sorte que le secteur soit autonome au niveau de la vie dans le quartier. L'avantage pour les aménagements en zone humide c'est que l'urbanisation est bien prise en compte tout en préservant la zone humide. Les infrastructures sont mises en place de sorte à inclure les bâtiments en fonction de la zone humide. Cependant, cette charte reste très contraignante pour les entreprises surtout lorsqu'il s'agit de petits ou moyens projets n'ayant pas les fonds nécessaires pour des difficultés de cette ampleur.

Il s'agit alors d'utiliser des pratiques simples et peu coûteuses qui protègent les zones humides au maximum, tout en mettant en place de nouveaux projets urbains : réduire la possibilité de passage vers les zones humides à fort enjeu, créer des cheminements utilisant des matériaux non polluants sur les zones à enjeu faible pour inclure le site dans l'aménagement et réduire le risque d'impact, implanter les bâtiments et les infrastructures en accord avec la continuité écologique du site.

6. Conclusion

Ce projet a permis d'axer la réflexion des zones humides sur la base de la doctrine ERC et de la nouvelle réglementation de 2019. Les enjeux et les valeurs ne se concentrent plus seulement sur les zones humides mais également sur les conséquences et l'économie autour de ces zones. Après une analyse de ces enjeux, il est alors important de se recentrer sur la doctrine ERC. L'évitement est une étape nécessaire pour la protection des zones humides mais reste difficile à mettre en place par les entreprises car il est tardivement intégré au projet et ainsi crée une perte de temps et d'argent. Il faut donc étendre la possibilité d'identifier les zones humides lors d'évolution du PLU. Le rôle du géomètre sera donc de guider les communes dans cette pratique encore trop méconnue. Si le projet ne peut pas être évité, il faudra donc intégrer les zones humides au sein du site. De nombreuses solutions peuvent être mises en place pour inclure ces zones à l'aménagement.

Les zones humides restent un sujet vaste et leur réglementation est en constante évolution. Les solutions pour intégrer les zones humides aux projets urbains sont donc un sujet évolutif qu'il faut régulièrement reprendre pour analyser les nouvelles problématiques et rechercher de nouvelles solutions. Les projets urbains ne doivent pas être vus comme un frein à la biodiversité mais comme un lien entre environnement et densification urbaine.



Plus d'infos: <https://topographie.insa-strasbourg.fr>



Contact

jdt2021@insa-strasbourg.fr

Avec l'aide d'Hélène Macher

Maître de conférences INSA Strasbourg
helene.macher@insa-strasbourg.fr
tél. 03 88 14 49 16

INSA Strasbourg

Spécialité topographie
24 boulevard de la Victoire
67084 Strasbourg Cedex
tél. 03 88 14 47 00
www.insa-strasbourg.fr

INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG

GE
GÉOMÈTRE-EXPERT
CONSEILLER VALORISER GARANTIR

aft