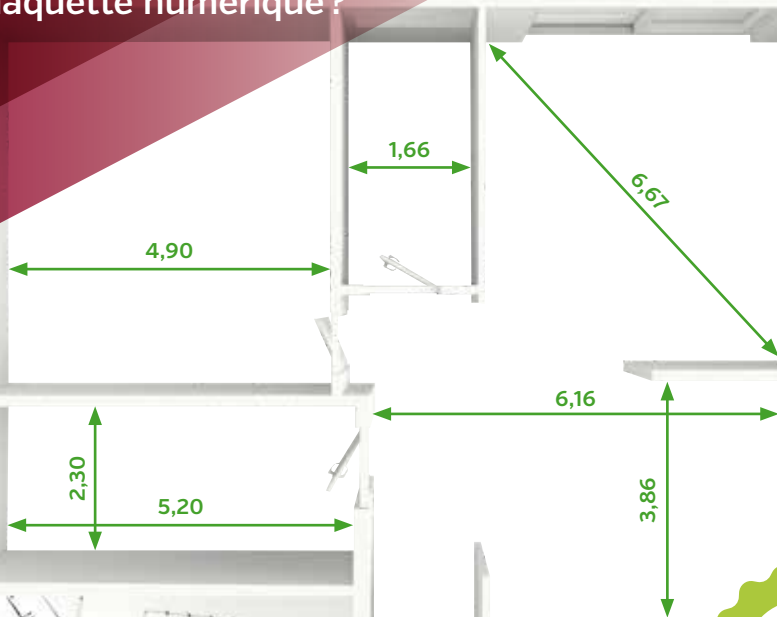


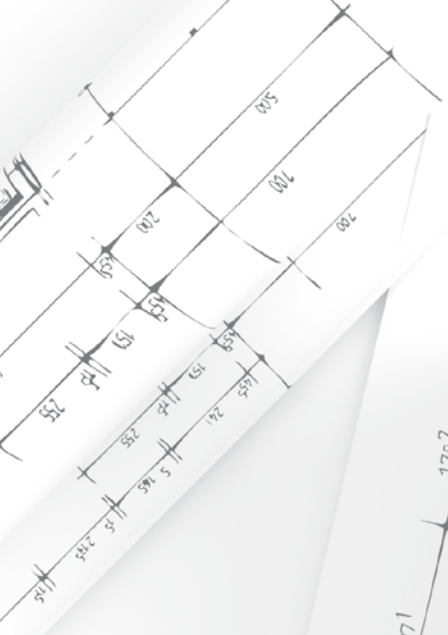
15^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 19 AU 21/09/18

BIM: le géomètre, garant de
la maquette numérique ?



≡ Sommaire

Programme	-----	p. 5
Salon des exposants	-----	p. 6
Conférence: « BIM: le géomètre, garant de la maquette numérique? »	---	p. 7
Ordre de passage des PFE	-----	p. 9
Résumés des PFE	-----	p. 15



≡ Programme

MERCREDI 19 SEPTEMBRE

8 h

Accueil (hall d'entrée)

8h30 - 11h30 et 13h30 - 17h30

Soutenances de Projets de fin d'études (PFE)

[salle topographie, bâtiment C]

JEUDI 20 SEPTEMBRE

8 h

Accueil (hall d'entrée)

8h30 - 11h30

Soutenances de PFE [salle topographie, bâtiment C]

13 h - 18 h

Salon des exposants et animations [salle d'expositions]

17h30

Conseil de l'Association française de topographie (AFT)

[salle C.116, bâtiment C]

VENDREDI 21 SEPTEMBRE

8 h

Accueil (hall d'entrée)

8h30 - 11h30

Soutenances de PFE [salle topographie, bâtiment C]

14 h - 16 h

Conférence: « BIM: le géomètre, garant de la maquette numérique? » [amphi de Dietrich]

16 h - 17h30

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

[amphi de Dietrich]

17h30

Annonce des résultats [salle topographie]

18h30

Verre de l'amitié [salle topographie]

≡ Salon des exposants

JEUDI 20 SEPTEMBRE DE 13 H À 18 H
SALLE D'EXPOSITIONS

Après un retour réussi l'an dernier, le salon des exposants est reconduit!

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

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

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

Liste des entreprises du salon des exposants

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. Exagone | 9. Aft |
| 2. Geopixel | 10. Oge |
| 3. Geosat | 11. Sixense Soldata |
| 4. Positics | 12. Technodigit |
| 5. Sitech | 13. Geofit Group |
| 6. Viametris | 14. Azimut Topo |
| 7. Leica | 15. Fenò |
| 8. Geotopo [Trimble] | |
- [Liste non exhaustive]

≡ **Conférence : le géomètre, garant de la maquette numérique ?**

**VENDREDI 21 SEPTEMBRE DE 14 H À 16 H
AMPHITHÉÂTRE DE DIETRICH**

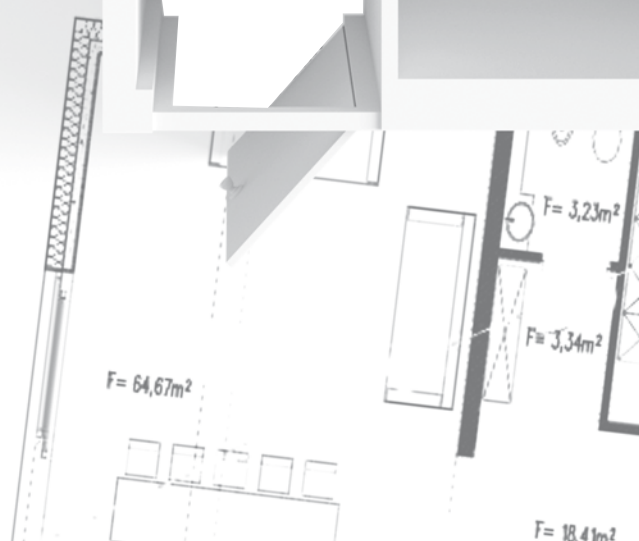
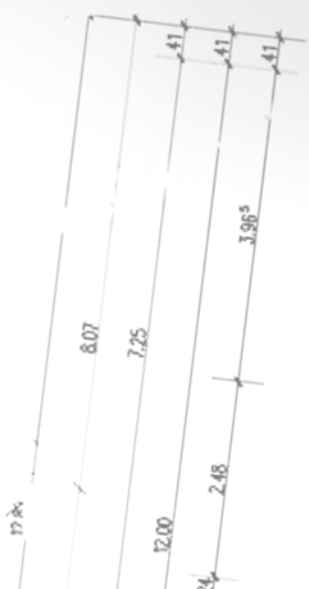
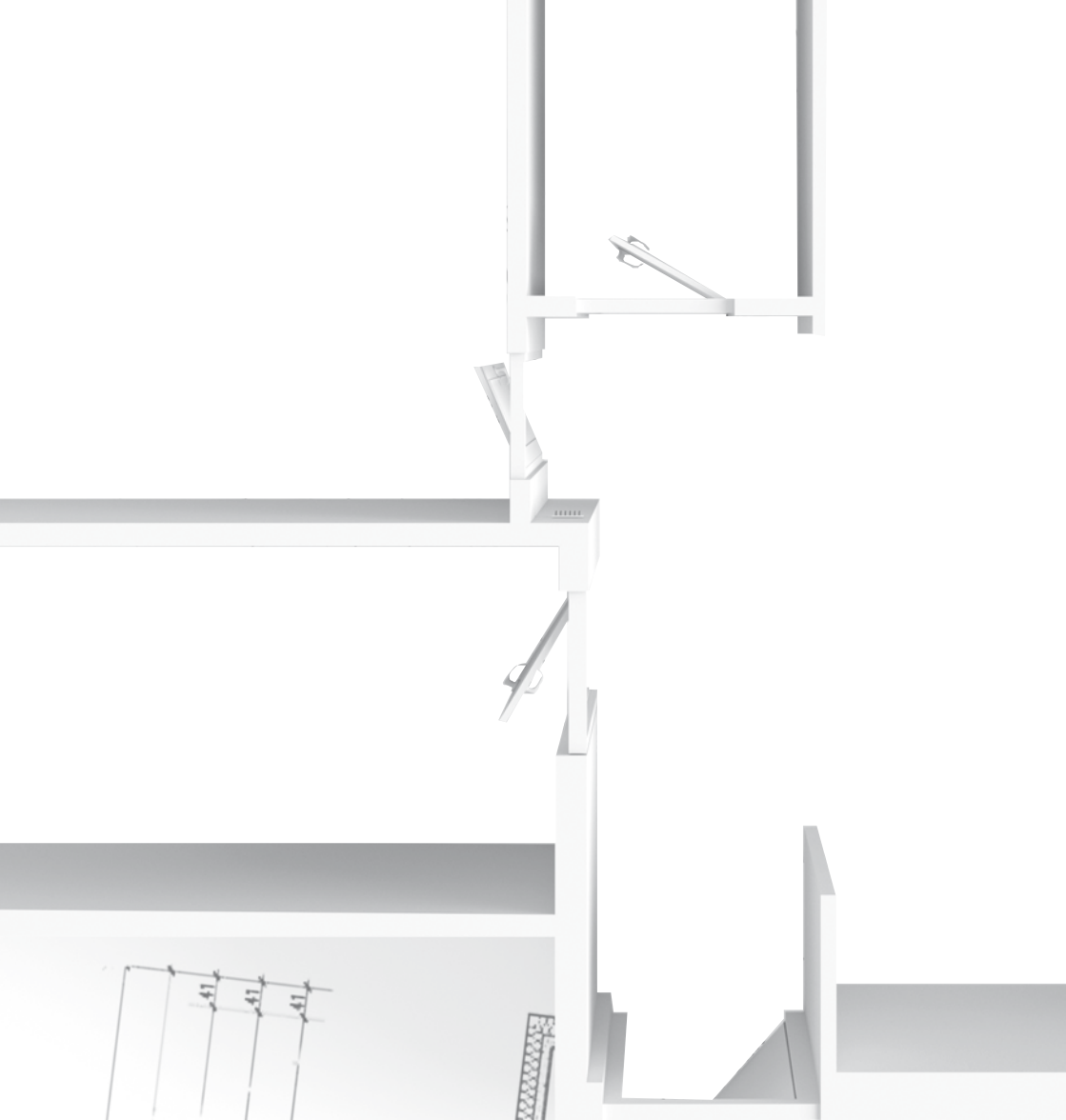
Aujourd'hui, il découle de la mise en œuvre des projets BIM, des problématiques concrètes qui remettent en question la place du géomètre-expert au sein de ce processus.

Le BIM, pour *Building Information Modeling*, est un ensemble de processus et de méthodes permettant d'organiser et de structurer les informations relatives à un ouvrage construit ou à construire. Ces informations sont projetées sous la forme d'une maquette numérique où interviennent simultanément les différents acteurs des métiers du bâtiment.

S'il est évident que la maîtrise d'ouvrage ferait appel à un géomètre pour réaliser un plan topographique, il reste à définir quelles sont les compétences nécessaires à la production et à la qualification, en termes de précision, d'une maquette numérique.

Dans ce contexte, une problématique se pose: qui doit assurer l'exactitude des relevés voire de la maquette sur laquelle vont reposer toutes les interventions futures, que ce soient celles des architectes, bureaux d'études, géomètres experts, thermiciens, électriciens, etc ?

L'objectif de cette édition des Journées de la topographie 2018 sera de proposer le géomètre comme garant de cette maquette: en pesant le pour et le contre. Les experts présents discuteront cette proposition tant en s'interrogeant sur les compétences nécessaires à l'évaluation d'une maquette, que sur le possible monopole du géomètre pour assurer cette garantie. Rendez-vous à la conférence pour en savoir plus!



≡ Ordre de passage des PFE

MERCREDI 19 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

8 h 30 • Optimisation des méthodes de relevés des réseaux souterrains et développement d'une solution SIG • p. 17

- Étudiante: NOUGIER Eva
- Structure d'accueil: Omexom Nîmes Ingénierie, Nîmes
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre et KOEHL Mathieu

9 h 30 • Du nuage de points à la réalité virtuelle: contribution à la mise en place d'un espace digital à la cité souterraine de Naours • p. 21

- Étudiante: ROBERT Cécile
- Structure d'accueil: Communauté de communes du territoire Nord Picardie, Doullens
- Correcteur: KOEHL Mathieu
- Encadrant: GRUSSENMEYER Pierre

10 h 30 • Numérisation et modélisation 3D du jardin d'hiver du Musée de la faïence de Sarreguemines • p. 25

- Étudiant: GIRARDET Valentin
- Structure d'accueil: Ville de Sarreguemines, Sarreguemines
- Correctrice: LANDES Tania
- Encadrant: GRUSSENMEYER Pierre

13 h 30 • Mise en place d'un SIG archéologique sur la commune d'Horbourg-Wihr • p. 29

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

14 h 30 • Modélisation 3D du *castellum* et du château disparus de Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine • p. 33

- Étudiant: NIVOLA Thibaut
- Structure d'accueil: Archéologie Alsace, Sélestat
- Correcteur: ALBY Emmanuel
- Encadrant: KOEHL Mathieu

15h30 • Mise en place de procédures automatisées pour les reports topographiques en milieu ferroviaire à partir de données photogrammétriques et Lidar acquises par drones • p. 37

- Étudiante : HINAUX Marion
- Structure d'accueil : Altametris, Paris
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre et LANDES Tania

16h30 • Analyse et contrôle de relevé de bâtiments par la technologie Zeb-Revo de Geoslam et mise en valeur de ces données via la maquette numérique • p. 41

- Étudiant : PEGOSSOFF Pierre
- Structure d'accueil : Parera, L'Isle-Jourdain
- Correcteurs : LANDES Tania et GRUSSENMEYER Pierre

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

8h30 • Convergence BIM-SIG: une maquette de référence pour les permis de construire numériques • p. 45

- Étudiante : KANNENGIESSER Marion
- Structure d'accueil : INSER SA, Le-Mont-sur-Lausanne (Suisse)
- Correcteur : FERHAT Gilbert

9h30 • Développement d'un dispositif de mesures topographiques automatiques nadirales • p. 49

- Étudiant : ROSSI Xavier-Pierre
- Structure d'accueil : Itmsol, Paris
- Correcteur : LEDIG Jacques

10h30 • Mise en place d'un SIG pour le Syndicat mixte Moselle aval • p. 53

- Étudiante : BRESSON Célia
- Structure d'accueil : Syndicat mixte ouvert Moselle aval, Metz
- Correcteurs : KOEHL Mathieu et LEDIG Jacques

13h30 • Automatisation du traitement de données *Mobile Mapping*: extraction d'éléments linéaires et ponctuels • p. 57

- Étudiant : ELSHOLZ Loïc
- Structure d'accueil : Futurmap SAS, Lyon
- Correctrice : LANDES Tania

14h30 • Perfectionnement de la procédure de calibration de systèmes Lidar pour drones • p. 61

- Étudiant : LU Kyn-Do
- Structure d'accueil : Yellowscan, Montferrier-sur-Lez
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

15h30 • Modélisation semi-automatique de toitures à partir de données Lidar pour la création d'une maquette numérique urbaine • p. 65

- Étudiant: LOGÉ Paul
- Structure d'accueil: Futurmap SAS, Lyon
- Correcteur: KOEHL Mathieu

16h30 • Rendre le béton transparent: acquisition, modélisation, réception et réimplantation des armatures le constituant au sein de la société Sites • p. 69

- Étudiant: MALLERON Mathilde
- Structure d'accueil: Sites, Aix-en-Provence
- Correcteur: ALBY Emmanuel

JEUDI 20 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

8h30 • De la méthodologie d'acquisition au scanner laser terrestre à la mise en œuvre d'un modèle 3D du hall d'essai du laboratoire d'hydraulique de la CNR • p. 73

- Étudiante: PLASSE Calypso
- Structure d'accueil: CNR, Lyon
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et GRUSSENMEYER Pierre

9h30 • Développement du pôle scanner 3D d'Alpes Topo: étude comparative des logiciels et scanners et création de procédures adaptées • p. 77

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

10h30 • Intégration de modules de suivis et de gestion des activités d'urbanisme opérationnel et d'ingénierie en infrastructures dans un PGI (Progiciel de gestion intégrée) développé en interne • p. 81

- Étudiant: SIGNARDIE Tanguy
- Structure d'accueil: Cabinet Baur, Haguenau
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et LEDIG Jacques

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

8h30 • Optimisation des méthodes de levés de bâtiments au scanner laser statique et dynamique • p. 85

- Étudiant: BERARD Yannick
- Structure d'accueil: Géofit Expert (Groupe FIT), Nantes
- Correctrice: LANDES Tania

9h30 • Valorisation de l'utilisation de systèmes de réalités virtuelles et augmentées pour la détection de réseaux, l'aménagement de lotissement et la promotion immobilière • p. 89

- Étudiant: CASOURANCQ MINVIELLE Vincent
- Structure d'accueil: Geosat, Pessac
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Étude et optimisation des stratégies de numérisation au scanner laser 3D, dans l'optique d'une intégration dans le système de visualisation en ligne d'infrastructures numériques Fugro Site-Spot® • p. 93

- Étudiant: GOUVERNEUR Antoine
- Structure d'accueil: Fugro Geoid, Jacou
- Correctrice: LANDES Tania

VENDREDI 21 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

8h30 • Reconstitution 4D du château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site • p. 97

- Étudiant: BENAZZI Théo
- Structure d'accueil: Mairie d'Obernai, Obernai
- Correcteur: KOEHL Mathieu
- Encadrante: LANDES Tania

9h30 • Basculement de maquettes 3D TQC vers la réalité virtuelle. Création d'un démonstrateur de conception et de revue de projet pour l'industrie • p. 101

- Étudiant: TADJIAN Nicolas
- Structure d'accueil: TPLM-3D, Chasse-sur-Rhone
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et KOEHL Mathieu

- 10h30 • Numérisation 3D de la carrière Saingt de Fleury-sur-Orne: intégration des données pour une exploration virtuelle du site** • p. 105
- Étudiant: VERSTAEN Matthieu
 - Structure d'accueil: INRAP, Bourgebus
 - Correcteur: KOEHL Mathieu
 - Encadrant: GRUSSENMEYER Pierre

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

- 8h30 • La mise en place du BIM au sein de structures gestionnaires d'actifs immobiliers: foncières, bailleurs sociaux et syndicats de copropriété** • p. 109
- Étudiante: GOURGUECHON Camille
 - Structure d'accueil: SELARL Lambert et associés, Brumath
 - Correcteur: ALBY Emmanuel

- 9h30 • Drone marin de surface: quelles applications pour l'exploration pétrolière ?** • p. 113
- Étudiante: KERYELL-EVEN Maiwenn
 - Structure d'accueil: Total SA, Pau
 - Correcteur: FERHAT Gilbert

- 10h30 • Étude du potentiel d'un drone aquatique dans un cabinet de géomètre expert pour les relevés bathymétriques et la modélisation 3D des berges en eaux intérieures** • p. 117
- Étudiant: MANGIN Lilian
 - Structure d'accueil: GE Infra, Toulouse
 - Correcteur: MOISAN Emmanuel

Projet de fin d'études soutenu au mois de juin 2018

- Pointé automatique sur cible passive, par analyse d'images provenant de la caméra coaxiale d'un tachéomètre** • p. 121
- Étudiante: BOUCHE Juliette
 - Structure d'accueil: HYP-ARC SAS
 - Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre



20

17R7

2.971

2.67

2.38

25

180

370

2.12

4.20

1.20

1.20

8.07

7.25

4.1

4.1

4.1

3.965

48

F = 64,67m²

F =

F =

/// **Résumés des PFE**

OPTIMISATION DES METHODES DE RELEVES DES RESEAUX SOUTERRAINS ET DEVELOPPEMENT D'UNE SOLUTION SIG

PFE présenté par : **Eva NOUGIER**

Société d'accueil : **Omexom Nîmes Ingénierie**

Directeur de PFE : **M. Julien BERTOLINI**

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

OMEXOM



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le besoin de visualiser des données géographiques sur une carte est une préoccupation majeure dans de nombreux domaines. Les collectivités mais aussi les sociétés privées ont un besoin grandissant dans ce secteur en perpétuelle évolution. Le domaine de l'énergie avec notamment la gestion du réseau des lignes électriques aériennes et souterraines ne fait pas exception. En effet, ces dernières ont un rapport très étroit avec la géographie. Que ce soit pour la maintenance et l'entretien des lignes, pour la construction de nouvelles lignes ou encore pour pouvoir répondre à des urgences, la localisation de l'information est au cœur de ces interventions. L'outil qui semble le mieux répondre à toutes ces attentes est le Système d'Information Géographique (SIG). Depuis déjà quelques années, l'entreprise Omexom Nîmes Ingénierie souhaite acquérir un tel outil lui permettant de visualiser ses données géographiques et de valoriser celles-ci auprès des clients. A cette fin, elle utilise, depuis déjà quelques années, le format KML pour exporter ses géométries de lignes électriques sur Google Earth. Bien que ceci leur permette de mieux appréhender la ligne dans son environnement extérieur, toutes les informations techniques ne sont pas présentes ou sont mal structurées.

La visualisation de données ne va pas sans leur acquisition. La réglementation « anti-endommagement » oblige les acteurs des réseaux à moderniser leurs relevés et à proposer des rendus innovants et plus précis. L'amélioration des méthodes de relevés des réseaux est un enjeu pour Omexom Nîmes Ingénierie, novice dans ce secteur. Ayant eu son accréditation pour intervenir à proximité des réseaux en début d'année 2018, l'entreprise cherche à gagner en compétences et en efficacité. En effet, si les méthodes de levé des réseaux souterrains sont multiples, la difficulté porte sur le choix de la méthode afin qu'elle soit bien adaptée aux conditions d'utilisation. La transition directe entre l'acquisition et la visualisation des données est également rendue possible avec l'évolution de la technologie sur le terrain.

Le but de ce projet de fin d'études est, dans un premier temps, de proposer un mode opératoire contribuant à moderniser leurs méthodes de relevés des réseaux électriques souterrains. La méthode doit utiliser au maximum les possibilités de leurs instruments de mesure. Une étude approfondie des méthodes de relevés existantes sur le marché ainsi que celles propres à leurs instruments a constitué une première phase. Cette première partie n'a été en fait qu'une introduction permettant de rentrer au cœur de ce projet de fin d'études : le SIG. L'élaboration d'un SIG permettant le positionnement et la visualisation des lignes électriques aériennes et souterraines a donc été le deuxième but de ce projet. Pour remplir cet objectif, un serveur dédié ainsi qu'une base de données ont été mis en place. Deux interfaces graphiques sont proposées, qui se différencient par leurs fonctionnalités et qui ont vocation à être utilisées par des personnes présentant des besoins différents. Un premier SIG qualifié de « SIG expert » a été réalisé avec le logiciel QGIS directement synchronisé à la base de données. En ce qui concerne le deuxième SIG, j'ai opté pour un WebSIG consultable par tous types d'utilisateurs. Il utilise le serveur cartographique MapServer et le site web a été programmé en HTML et en javascript.

Une grande partie du projet a été consacré à l'élaboration d'un SIG et de sa base de données. La Figure 1 résume les étapes clés réalisées pendant ce projet de fin d'étude.

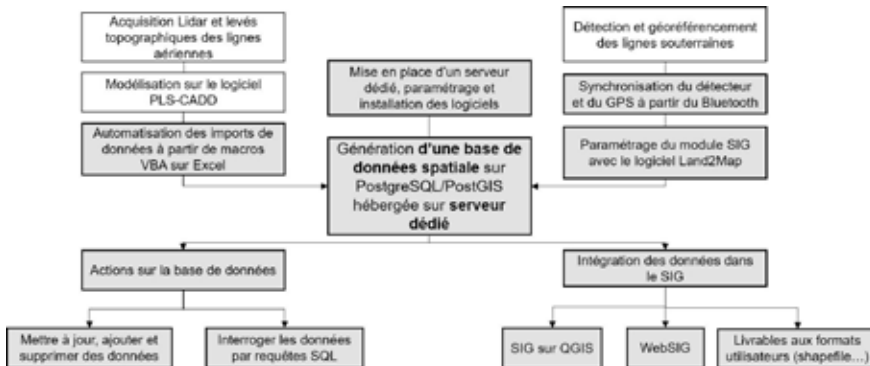


Figure 1 : Schéma bilan des tâches réalisées (cases colorées en gris) durant ce projet d'étude

2. Mode opératoire pour moderniser leurs méthodes de relevés

La société dispose d'un détecteur d'ondes électromagnétiques, d'un récepteur GNSS et d'une tablette munie du logiciel Land2Map. Land2Map permet d'assister le géomètre lors de levé topographique, de bornage, de récolement et pour la détection géolocalisée des réseaux. Cette dernière faculté du logiciel n'était pas du tout utilisée jusqu'à mon intervention. En effet, un premier opérateur marquait sur un carnet ou au sol toutes les profondeurs des points détectés avant qu'un deuxième opérateur repasse sur ces derniers avec un GPS. Il écrivait alors la profondeur des points en tant qu'attribut texte à l'aide de la tablette. Cependant, dans la majorité des travaux, par manque de temps sur le terrain, le second opérateur prenait simplement la mesure au GPS et les profondeurs étaient associées aux points ultérieurement. Les inconvénients de procéder comme tel étaient multiples, comme le risque de mauvaise retranscription des profondeurs ainsi que la perte de temps sur le terrain et au bureau. Avec Land2Map, il est possible de synchroniser l'ensemble des appareils en Bluetooth. Ainsi, j'ai proposé quatre méthodes en fonction du nombre d'opérateurs disponibles sur le terrain et du nombre de passages le long de la ligne (Tableau 1). Une procédure a été écrite et testée sur le terrain. De plus, le logiciel Land2Map possède un 'module SIG' qui permet de créer des tables compatibles avec la plupart des logiciels de base de données. Les données peuvent être exportées au format Shape ou en CSV. Ce module a donc été paramétré afin de remplir la base de données pour la partie 'lignes souterraines'.

Opérateur	Passage	Détails
1	1	L'opérateur possède un détecteur et un GPS simultanément. Chaque point détecté est envoyé en Bluetooth à la tablette puis pris au GPS.
1	2	L'opérateur détecte le réseau en entier et marque au sol les numéros des points. Les mesures sont envoyées à la tablette puis dans un second temps les points sont géoréférencés avec un GPS.
2	1	L'opérateur 1 détecte le réseau et envoie la mesure via Bluetooth à la tablette. L'opérateur 2 géoréférence le point avec le GPS et ainsi de suite.
2	2	L'opérateur 1 détecte le réseau en entier et marque au sol les numéros des points, toutes les mesures sont envoyées à la tablette puis dans un second temps, les points sont géoréférencés avec un GPS par l'opérateur 2.

Tableau 1 : Description des quatre méthodes possibles pour le relevé de réseaux

3. Définition du SIG métier

Le SIG développé doit permettre de cartographier, de visualiser et d'analyser leurs données techniques, de gérer ces données via une base de données afin d'organiser et de conserver la donnée et enfin d'accéder à ces informations via des applications web. Les utilisateurs de cet outil sont multiples. En effet, cela passe par les salariés d'Omexom Nîmes Ingénierie au bureau ou sur le terrain jusqu'à leurs clients.

Un SIG passe par la sélection et l'acquisition de matériels, de logiciels et de données. Concernant le **matériel**, un serveur hébergé sur un cloud, dispensé par la société OVH, a été mis en place. Ce dernier est un serveur physique dédié avec le système d'exploitation Linux OpenSource, qui présente l'avantage d'être totalement configurable par l'administrateur du serveur et d'être capable d'accueillir aussi bien la base de données que le serveur web nécessaire à l'application. Au niveau des **logiciels**, le choix s'est porté vers des solutions libres et gratuites telles que le logiciel QGIS pour la visualisation et le traitement des données, le logiciel PostgreSQL/PostGIS pour l'élaboration de la base de données spatiale et le serveur cartographique MapServer pour la diffusion des données sur le Web. Enfin, aucune **donnée** payante n'a été acquise puisque l'entreprise disposait déjà de nombreuses données, notamment issues de leur logiciel technique PLS-CADD et fournies par l'IGN.

Pour organiser les données sous forme de modèle, la méthode MERISE a été utilisée, celle-ci ayant déjà fait ses preuves dans le SIG. Le Modèle Conceptuel de Données est directement lié aux données présentes dans les fichiers projets issus de leur logiciel PLS-CADD ainsi qu'à des données fournies par l'IGN. Ce modèle a constitué une base pour la construction à proprement parler de l'architecture de la base de données.

4. Mise en place d'une base de données spatiale sur un serveur dédié

La base de données spatiales (nommée omexomOVH) a été réalisée sur PostgreSQL avec l'extension PostGIS et hébergée sur le serveur dédié. Elle est constituée de quatre **schémas** : aérien, cadastre, RTE et souterrain. Au sein de ces schémas, les **tables** ainsi que leurs **champs** respectifs ont été créés en respectant le modèle MERISE et en langage SQL. Pour chaque table, des **clés primaires** ont été définies, elles portent sur un numéro unique et auto-incrémenté pour chaque enregistrement afin d'éviter tout doublon. Les clés primaires constituent des contraintes d'unicité qui ne peuvent être rompues. Les champs peuvent aussi avoir des contraintes sur certaines de leurs valeurs qui ne peuvent être nulles. En effet, c'est le cas du champ regroupant le code de la ligne et le numéro de support et qui permet de faire les jointures entre les tables. Des **champs géométriques** ont été ajoutés sur certaines tables. Les données géométriques peuvent être de différents types : les points, les lignes finies ou infinies, les polygones et les cercles. Des **index** ont aussi été créés afin d'accélérer les requêtes, notamment dans le cas de requêtes imbriquées. Enfin, des **vues** ont également été générées. Elles permettent de partitionner les données d'une table selon une requête spécifique (Figure 2).

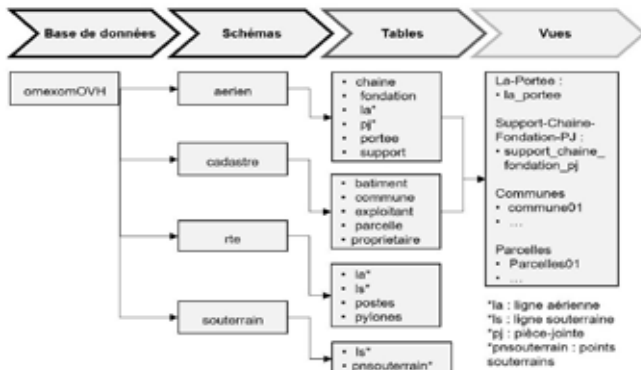


Figure 2 : Organisation de la base de données

L'import des données métier dans la base se fait par le transfert des tableaux issus du logiciel PLS-CADD sur Excel puis le traitement de ces tableaux a fait l'objet de macros VBA. Le processus démarre de la copie des données depuis leur logiciel technique à l'import dans la base de données (Figure 3). Des données ont aussi été importées à partir des fichiers DWG convertis au format Shape. Enfin, concernant les données de l'IGN, présentes au format Shape encodées en LATIN1, elles ont directement été insérées dans la base de données. Pour cela, j'ai développé des scripts Python pour générer les commandes SQL en et ces dernières ont été lancées via un exécutable Windows .BAT.



Figure 3 : Les quatre étapes de traitements ayant fait l'objet de macros VBA sous Excel

Plusieurs rôles ont été créés. Ces derniers sont ensuite rattachés à une adresse IP et un mot de passe dans le fichier de configuration de PostgreSQL (pg_hba.conf). Parmi ces comptes, on retrouve le compte du super-utilisateur (appelé postgres) qui jouit de tous les droits sur toutes les bases de données. Trois types de comptes ont été créés : un compte 'invite-1' octroyant tous les droits à l'utilisateur uniquement sur la base de données omexomOVH et pas sur les autres, un compte 'invite-2' permettant à l'utilisateur de consulter et modifier les données mais pas de les supprimer et enfin un compte 'invite-3' où l'utilisateur peut seulement consulter les données.

Les mises à jour se font donc essentiellement par import de données via les macros VBA sous Excel. Des procédures ont été rédigées afin de guider l'utilisateur. Afin de faire des mises à jour, l'utilisateur doit bénéficier d'un droit d'accès à la base de données en tant qu'invite-1, invite-2 ou super-utilisateur. Les procédures expliquent comment gérer les situations d'échec d'import des données qui peuvent être causées par des informations présentes dans les fichiers non conformes à l'encodage 'UTF-8' ou à des contraintes violées telles que la duplication d'une clé primaire ou un champ vide qui ne peut l'être. Concernant les données de l'IGN étant donné qu'elles sont reçues tous les cinq ans, l'administrateur pourra procéder dans un premier temps à une suppression des données dans la base de données. Dans un second temps, il pourra effectuer un simple changement de données dans le dossier actuel où sont stockées ces dernières et lancer l'exécutable .BAT.

5. Création d'interface client pour visualiser les données

Deux interfaces clients ont été déployées pour ce projet. Une première permet de visualiser, modifier et supprimer les données. La seconde est une solution en ligne pour la consultation uniquement des données.

Concernant la première solution, les données sont mises en forme en utilisant le logiciel client QGIS. Le projet QGIS est déposé sur un serveur fichier et est éditable uniquement par les personnes ayant ce droit. La mise à jour s'effectue de façon asynchrone et par très peu de collaborateurs. Les données ont été structurées par groupe et par tension de câbles.

Pour ce qui est du webSIG (Figure 4), ce dernier passe par le serveur cartographique MapServer installé sur le serveur OVH. Les couches à visualiser en ligne ainsi que leur représentation sont définies dans un fichier, intitulé 'mapfile'. La définition du site web se fait ensuite en langage HTML et javascript. L'accès à la carte requiert un nom d'utilisateur et un mot de passe.



Figure 4 : Structure d'une carte en ligne

6. Conclusions et perspectives

Ce projet a tout d'abord permis de faire le point sur leur toute nouvelle méthode d'acquisition des réseaux souterrains et de l'optimiser afin de l'orienter vers le SIG. Dans un second temps, cette étude a rendu possible le déploiement d'une solution SIG pour la société Omexom Nîmes Ingénierie. La gestion des données avec une base de données spatiale a permis de structurer l'information et par la suite de pouvoir l'interroger. L'acquisition d'un serveur dédié permet une meilleure gestion de la base de données à plusieurs utilisateurs et de la solution Web. La structuration des données pour leur import dans la base a été totalement automatisée. La carte en ligne est accessible par tout utilisateur disposant d'un nom de connexion et d'un mot de passe. Elle est fonctionnelle et présente toutes les informations métiers sur les lignes et supports électriques.

L'entreprise est déjà tournée vers des perspectives d'améliorations. Cela passera, notamment, par la synchronisation du SIG avec la réalité augmentée. Cette dernière a été au cœur d'un concours au salon Viva Technologie 2018. L'import de nuages de points dans le SIG afin de bénéficier d'un environnement 3D est aussi à l'étude.

Du nuage de points à la réalité virtuelle : Contribution à la mise en place d'un espace digital à la cité souterraine de Naours

PFE présenté par :

Cécile ROBERT

Société d'accueil :

C.C. du Territoire Nord Picardie

Laboratoire ICube UMR 7357, équipe



TRIO

Directeur(trice) de PFE :

Matthieu BEUVIN

Encadrant :

Pierre GRUSSENMEYER

Correcteur :

Mathieu KOEHL



1. Introduction

Durant de nombreux siècles, la Somme a été une zone de passage des armées qui poussa les villageois à innover pour se protéger. De nombreuses carrières de craie ont été exploitées afin d'y construire des refuges appelés « muches ». Redécouvert par l'abbé Danicourt à la fin du XIX^e siècle, le domaine de Naours devient une attraction touristique de la région. Les travaux du topographe Balesdens ont permis de dresser en 1905 l'unique plan topographique des souterrains existant jusqu'alors connu.

Durant la Grande Guerre, des soldats étrangers ont visité ces curiosités locales. Ils marquèrent leur passage en dessinant sur les parois des graffitis comportant leur nom, leur matricule ainsi que d'autres qualificatifs propres au domaine militaire ou des informations plus personnelles. La cité souterraine de Naours est considérée de nos jours comme le type le plus caractéristique et complet de souterrains-refuges visitables dans le Nord de la France. Les milliers de graffitis tapissant les parois en font un lieu chargé d'histoire et témoignent du parcours de certains soldats durant la Première Guerre Mondiale. Fin 2018, un espace muséal sera inauguré permettant à tout individu de découvrir le patrimoine du domaine. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de fin d'études. Celui-ci fait partie d'un projet continu débuté en 2015 lorsque la Communauté de Communes du Bocage-Hallue nouvellement du Territoire Nord Picardie fit appel à l'INSA de Strasbourg pour entreprendre le relevé 3D du réseau.

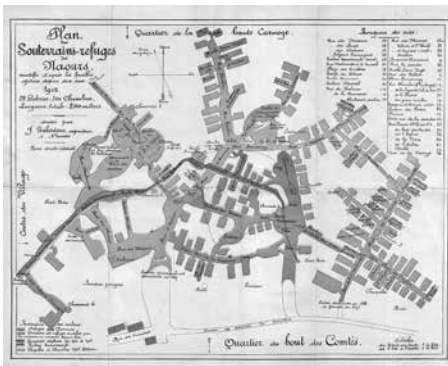


Figure 1 : Ancien plan de la Cité souterraine de Naours Balesdens 1905

La finalité de ce projet permet d'en définir les objectifs. L'un d'eux est la création de projets en réalité virtuelle afin de parcourir le site sans avoir besoin de se déplacer. Ainsi, chacun peut visiter le domaine, y compris les personnes à mobilité réduite. Un individu peut également accéder virtuellement à des espaces partiellement ou totalement fermés au public. C'est l'outil adéquat pour sensibiliser le visiteur au travail issu du partenariat entre l'INSA de Strasbourg et la Communauté de Communes du Territoire Nord Picardie.

Le second objectif correspond aussi à la création d'outils numériques. Il s'agit de produire des bornes de consultation de la base de données des graffitis pour différents publics. Les recherches menées par l'INRAP ont permis d'inventorier les graffitis tapissant les parois des souterrains et d'établir une base de données des soldats passés par Naours. Cette dernière devra être accessible aux scientifiques impliqués dans le projet mais aussi au tout public.

2. Travaux préalables

La numérisation de la cité souterraine de Naours a débuté en 2015 lors du projet de recherches technologiques mené par Maxime Balland et Joseph Guillerey. Ces travaux ont été poursuivis par Maxime Balland lors de son projet de fin d'études nommé *Numérisation 3D dans le souterrain de Naours et intégration des données 3D de la base de données Graffiti*. Au cours de ces travaux, une première partie des souterrains a été numérisée à l'aide d'un Scanner Laser Faro X330. Des restitutions photogrammétriques ont été effectuées afin de modéliser avec précision les graffiti tapissant les parois. Par la suite, un programme de visualisation de nuages de points et de modèles 3D en Python à partir de la librairie OpenGL a été développé. La modélisation des souterrains du domaine de Naours s'est prolongée lors du projet de recherches technologiques et du projet de fin d'études de Pierre Caron intitulé *Modélisation 3D du Souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données « Graffiti » avec QGIS*. De la même manière, un scanner laser Faro X330 a été employé pour numériser les souterrains et les parois tapissées de graffiti ont été restituées en photogrammétrie. Afin de pouvoir consulter la base de données des graffiti de la cité souterraine par le biais de requêtes, une borne de consultation prenant le format d'interface graphique a été créée. Celle-ci constitue une extension appelée Plug-in sur le logiciel du Système d'Information Géographique libre QGIS. Enfin, les travaux de modélisation de ces précédents projets de recherches technologiques et projets de fin d'études ont été valorisés par des vidéos de visite virtuelle dont l'une est disponible sur le site de la cité souterraine.

2. Projets en réalité virtuelle

La réalité virtuelle en archéologie

Issue de la pure traduction littérale « Virtual Reality » la réalité virtuelle est une notion complexe à définir, néanmoins les professionnels se rejoignent sur deux principes qui régissent cette dernière : l'immersion et l'interaction. Depuis la fin du XX^e siècle, de nombreux dispositifs dédiés à la réalité virtuelle dans le monde de l'archéologie ont vu le jour. En vue de promouvoir le Patrimoine culturel ou « Cultural Heritage », ces environnements virtuels prennent la forme de « Virtual Museums » correspondant à la reproduction de l'existant ou à une reconstitution du site archéologique selon un facteur temps. Rapidement, l'individu a pu s'immerger dans un environnement virtuel et interagir avec les entités via des architectures matérielles et logicielles de réalité virtuelle. L'essor des systèmes d'information géographique et l'évolution de l'interactivité des viewers 3D connectés aux objets et aux sites patrimoniaux ont marqué le développement de ces dispositifs de réalité virtuelle dans le monde de l'archéologie.

Un projet de réalité virtuelle sur SCENE de Faro

Un premier projet de réalité virtuelle est réalisé à l'aide de l'« Affichage VR » proposé par la version 7.1 de SCENE de Faro. Le nuage de points visible offre une visite virtuelle réaliste à l'utilisateur puisqu'il est issu de mesures faites sur le terrain. L'individu peut pleinement s'immerger dans le nuage, plus ou moins dense en fonction des zones. L'intérêt est la lecture des graffiti, l'échantillonnage doit donc être adapté. Les 27 parois qui ont été restituées en photogrammétrie durant les précédents projets ont par exemple été échantillonnées à 1mm sous le logiciel libre CloudCompare pour que les graffiti soient toujours lisibles. Les parties extérieures ainsi que les autres espaces des souterrains sans graffiti ont été respectivement échantillonnés à 2cm et 1cm sur ce même logiciel.

Bien que l'utilisateur puisse s'immerger dans l'espace et se déplacer facilement, l'affichage en réalité virtuelle sur SCENE a ses limites. Tout d'abord, le rendu visuel manque de crédibilité : nous ne pouvons que naviguer dans un nuage de points, et ce sans les contraintes physiques auxquelles nous sommes soumis dans le monde réel. De plus, le logiciel ne dispose pas de fonctionnalités d'interaction recherchées pour ce projet. Un second projet de réalité virtuelle a ainsi été élaboré sur un moteur de jeu.

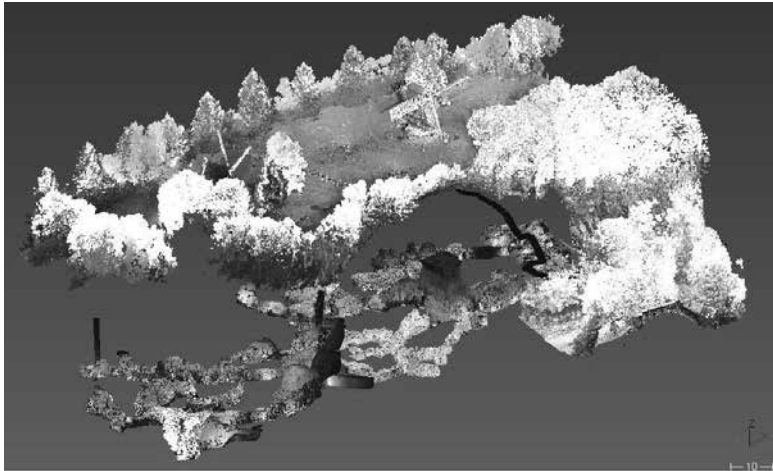


Figure 2 : Nuage des points total du domaine de Naours inséré dans un projet de Réalité Virtuelle sur SCENE

Un projet de réalité virtuelle sur un moteur de jeux

Les deux moteurs de jeux vidéo Unity de Unity Technologies et Unreal Engine d'Epic Games ont été retenus afin de valoriser les graffiti des souterrains. Les modèles issus des restitutions photogrammétriques qui ont permis de représenter avec précision les graffiti des parois servent alors de référence en termes de rendu visuel.

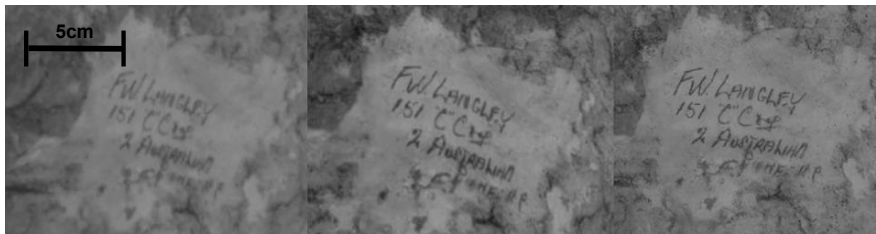


Figure 3 : Comparaison des rendus graphiques : de gauche à droite Unity, Unreal Engine, et PhotoScan

Le rendu visuel issu du moteur de jeu Unreal Engine est plus pertinent que celui issu de Unity, celui-ci a alors été retenu.

Le projet sous Unreal Engine correspond à une visite partiellement guidée dans quelques salles. Depuis un menu principal, l'utilisateur peut accéder à l'un des quatre niveaux différents relativement aux quatre salles visitables virtuellement : la Salle des Congrès, la Salle des Américains, la Chambre du Tourisme ou encore une salle comportant trois imposantes parois. Depuis l'une d'elles, il pourra passer à la salle suivante ou revenir au menu principal.

L'immersion et les interactions au sein de l'environnement virtuel d'Unreal Engine sont régies par un système de script visuel ou « Visual Scripting » appelé « Blueprint ». Ce système de programmation proposé par Epic Games permet à toute personne, programmeur ou non, de rédiger des lignes de codes en C++ sans s'être familiarisé avec ce langage de programmation. Le déplacement



Figure 4 : Scénario sélectionné pour la visite virtuelle de Naours sous Unreal Engine

au sein de l'espace virtuel s'effectue par défaut par téléportation. Des informations concernant un graffiti s'obtiennent à l'aide de « User Interface » ou d'interfaces utilisateur qui peuvent être de simples boutons, des images, un contenu textuel ou autres. Le comportement de ces interfaces utilisateur est régi par un « Blueprint ». Ces interfaces utilisateurs sont intégrées dans un objet quelconque appelé « Actor » afin d'être insérées dans l'environnement virtuel.

3. Les bornes de consultation de la base de données Graffiti

La borne de consultation de la base de données « Graffiti » construite par Pierre Caron durant son projet de fin d'études a été élaborée sous le module Qt Designer issu de la bibliothèque Qt. Le script de cette interface graphique codé en Python permet de rechercher un soldat dans la base de données composée de plusieurs tables comportant plusieurs champs. Cette interface graphique est une extension appelée Plug-in disponible sur le logiciel libre de Système d'Information Géographique QGIS. L'utilisateur réalise des requêtes sur la base de données depuis l'interface graphique mais peut également visualiser la photographie du soldat et du graffiti, et exporter les coordonnées géoréférencées de celui-ci suivant le système RGF93 CC50.

Par le biais d'un visualiseur OpenGL, l'utilisateur a la possibilité de voir le graffiti. Il correspond à une fenêtre interactive pour l'affichage des données en 3D puisque les versions de QGIS ne proposaient jusqu'alors qu'un affichage en 2.5D. Cette fonctionnalité est issue de l'insertion des programmes QGIS2D et Q3DView créés par Maxime Balland et Arnaud Breitweiser lors de leur projet de fin d'études. Le premier permet de convertir en tables de données SQLite des données 3D de divers types tel que le modèle texturé monochrome DXF. Le second permet la visualisation interactive des données 3D à partir de ces tables. Pour être en adéquation avec le projet actuel, des modifications ont été apportées afin de traiter les fichiers des nuages de points au format ASCII et les fichiers des modèles texturés au format OBJ. Le principal intérêt de cet outil est la possibilité de visualiser dans son contexte le graffiti du soldat sélectionné et d'établir des études statistiques telles que la détermination du nombre de graffitis sur la zone affichée. Les modèles texturés sont issus des restitutions en photogrammétrie.

Cette borne de consultation est destinée au public scientifique tel que les archéologues. Une borne de consultation similaire et simplifiée sera mise à la disposition du tout public afin d'effectuer des requêtes sur la base de données en vue de rechercher un soldat, un proche. Cette simplification se traduira par la réduction des champs de recherches et la réduction des fonctionnalités.

4. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études poursuit le travail de modélisation de la cité souterraine de Naours débuté en 2015 lors du partenariat entre la Communauté de Communes du Territoire Nord Picardie et la spécialité Topographie de l'INSA de Strasbourg. L'intérêt de ce projet est de valoriser les données collectées sur le terrain en proposant une visite dans un environnement virtuel où l'utilisateur, immergé et actif, peut obtenir des informations concernant les graffitis. Les bornes de consultation permettent d'interroger la base de données « Graffiti » et d'obtenir plus de détails sur ces derniers.

Bien que le moteur de jeux Unreal Engine ait été choisi pour son rendu visuel plus pertinent, un travail similaire sur Unity semble intéressant en utilisant une nouvelle extension de traitement de textures issues d'une restitution en photogrammétrie, le « De-Lighting Tool ». De plus, le déplacement par défaut présente quelques imperfections (effet saccadé, téléportation mètre par mètre) qui peuvent être corrigées avec un travail approfondi sur la programmation via les « Blueprints ». Le déplacement serait alors plus fluide, tel celui proposé sous SCENE.

La borne de consultation destinée au public scientifique propose d'ores et déjà de nombreuses fonctionnalités telles que la recherche d'un soldat et l'affichage de son portrait et du graffiti lui correspondant. Afin d'approfondir les études sur ces souterrains, il semble intéressant d'ajouter de nouveaux outils tels le calcul de volumétrie. Enfin, pour délivrer aux visiteurs une fiche biographique papier d'un soldat, l'édition de rapports à partir de la borne de consultation tout public sera à développer.

5. Bibliographie

- 1 - Jean-Baptiste Barreau. Techniques de production, d'exploration et d'analyse d'environnements archéologiques virtuels. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. INSA de Rennes, 2017. Français. <NNT: 2017ISAR0014>. <tel-01633811>
- 2 - Balland, M. (2016). Numérisation 3D dans les souterrains de Naours et intégration des données de la base de données Graffiti, Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, pp.1-83.
- 3 - Caron, P. (2017). Modélisation 3D du souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données Graffiti avec QGIS, Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, pp.1-69.

Numérisation et modélisation 3D du Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence de Sarreguemines



PFE présenté par : Valentin GIRARDET
Société d'accueil : Ville de Sarreguemines – Musée de la Faïence
Laboratoire ICube UMR 7357, Equipe TRIO,
INSA Groupe PAGE
Directrice de PFE : Julie KIEFFER
Encadrant : Pierre GRUSSENMEYER
Correcteur : Tania LANDES



1. Contexte de l'étude

La Ville et les Musées de Sarreguemines, en Lorraine, souhaitent modéliser en trois dimensions une pièce remarquable et emblématique de son Musée de la Faïence, le Jardin d'Hiver (Figure 1).

Cet édifice a été construit en 1880 sur la propriété de Paul de Geiger, le directeur de la manufacture de la ville, spécialisée dans la création d'objets en faïence. Dans ce jardin d'hiver, il est possible d'admirer, entre autres, deux allégories représentant le feu et la terre (symboles dont la fusion a permis de créer l'Art céramique à Sarreguemines), deux vues de Sarreguemines, des vases et une fontaine, la pièce la plus remarquable.

Les objectifs de ce Projet de Fin d'Etudes (PFE) sont de :

- Parvenir à modéliser le Jardin d'Hiver dans son intégralité avec un rendu esthétique satisfaisant pour palier à toute éventualité comme une destruction ou un déplacement du site (conservation du patrimoine) ;
- Réfléchir à des moyens de visualisation et de mise en valeur des modèles adaptés aux attentes du musée afin d'en faire profiter le public (visite virtuelle interactive en immersion, vidéos, espace numérique interactif, etc.) (tourisme).



Figure 1 : Jardin d'Hiver de Paul de Geiger en 1892 [Céramique d'architecture - Le Jardin d'hiver de Paul de Geiger - Musées de Sarreguemines, 2017]

Des méthodes photogrammétriques et lasergrammétriques modernes sont exploitées pour construire le modèle du Jardin d'Hiver. Toutes les données sont géoréférencées pour être rattachées aux systèmes de coordonnées nationaux (RGF93-CC49 et NGF-IGN69). Le défi à relever est de numériser de la faïence, un matériau très réfléchissant qui occasionne des surbrillances sur les prises de vue ainsi que du bruit dans les nuages de points. Pour ce qui est du volet visualisation, diverses expérimentations avec un système de réalité virtuelle sont entreprises.

2. Travaux antérieurs

La modélisation du Jardin d'Hiver a commencé en octobre 2017 au cours du Projet de Recherche Technologique (PRT) mené [Girardet, 2018]. Le but était de tester les techniques lasergrammétriques et photogrammétriques sur le matériau réfléchissant qu'est la faïence. Par ailleurs, des tests de superposition de données de sources différentes (laser fixe/laser mobile et laser/photo) ont donné satisfaction quant à la possibilité de fusionner celles-ci pour tirer profit des avantages de chaque technique et combler le manque d'informations par endroit.

Le PRT a conclu que la photogrammétrie fonctionne dans des conditions spécifiques (minimum de reflets, grande focale, distance courte, nombre de photos important, minimum de relief) et qu'elle sera un atout pour modéliser les objets remarquables du Jardin d'Hiver et pour appliquer les textures. Quant à la lasergrammétrie, elle fonctionne relativement bien pour acquérir de grands espaces et de

grands volumes de données. Elle sera préconisée pour modéliser l'ensemble du Jardin d'Hiver mais également pour suppléer la photogrammétrie sur les objets remarquables si nécessaire.

3. Acquisition sur le terrain

La phase d'acquisition des données sur le terrain (PRT et PFE combinés) s'est déroulée sur cinq missions d'une journée. Au cours de ceux-ci, un canevas polygonal a été mis en place autour et à l'intérieur du Jardin d'Hiver, la volumétrie du Jardin d'Hiver a été acquise par lasergrammétrie et les objets remarquables ont été photographiés.

Du matériel spécialisé disponible auprès de la plateforme Topographie de l'INSA a aidé à acquérir toutes les données. Pour la polygonation et le levé des points d'appui, une antenne GNSS Leica Viva et une station totale Leica TS02 ont été utilisées. Pour ce qui est de la lasergrammétrie, le scanner laser terrestre Faro Focus 3D X330 et le scanner à main Faro Freestyle 3D ont été sollicités. Enfin, en ce qui concerne la partie photogrammétrie, un appareil photo numérique reflex Canon EOS 5DSR et un smartphone Apple iPhone 8 Plus ont permis de capturer les images (Figure 2).



Figure 2 : De gauche à droite : Faro Focus 3D X330, Faro Freestyle 3D, Canon EOS 5DSR, Apple iPhone 8 Plus, Leica TS02, Leica Viva

4. Traitements et modélisation

Calcul de la polygonation

La première étape a été de calculer le cheminement polygonal afin de déterminer les coordonnées définitives de tous les points levés sur le terrain. Pour ce faire, un recalage Helmert 2D et un recalage altimétrique ont été entrepris afin de fixer les points à l'intérieur du jardin d'hiver en premier.

Photogrammétrie

La photogrammétrie a été utilisée pour modéliser les objets remarquables du Jardin d'Hiver en haute résolution. Au total, neuf objets ont été traités : la fontaine (tests et texture), l'Allégorie du Feu, l'Allégorie de la Terre, le Pavillon de Rendez-Vous de Paul de Geiger (Figure 3), l'Usine de Faïence de Sarreguemines, les portraits d'Alexandre de Geiger et de Paul Utzschneider et les compositions florales japonaises gauche et droite (modélisation photogramétrique complète). Les traitements se sont déroulés sur le logiciel PhotoScan d'Agisoft. Dans l'ordre, le processus consiste à :

- Calibrer l'appareil photo ;
- Orienter les images et générer un nuage de points de jonction peu dense ;
- Mettre à l'échelle (géoréférencer) le futur modèle à l'aide de points d'appui connus en coordonnées et optimiser les paramètres de la caméra ;
- Densifier le nuage de points ;
- Construire le modèle 3D par maillage ;
- Appliquer les photos sur le modèle 3D (texturage).



Figure 3 : Modèle photogramétrique texturé du Pavillon de Rendez-Vous de Paul de Geiger (PhotoScan)

Par ailleurs, dans le but de s'affranchir des surbrillances qui produisent du bruit dans les nuages de points et d'améliorer la couleur et la texture du modèle, des tests de pré-traitement d'images sur la fontaine ont été effectués avec Matlab et GIMP. La suppression des surbrillances s'est avérée efficace sur Matlab avec l'implémentation de l'algorithme de [Górny, 2005]. L'avantage est que le processus a été automatisé pour s'effectuer sur plusieurs images à la fois. En revanche, l'inconvénient est que

l'aspect caractéristique de la faïence a été détérioré. De plus, le bruit n'est pas moins présent dans le nuage après correction. Sur GIMP, seuls les tests de rehaussement des couleurs ont fourni des résultats satisfaisants. Toutefois, le processus n'est pas automatisé et doit s'appliquer à chaque photo manuellement. Finalement, comme la fontaine est composée de deux jeux de photos provenant d'appareils différents (Canon EOS 5DSR et iPhone 8 Plus), les images Canon plus sombres ont fait l'objet d'une égalisation d'histogramme sur Matlab. Elles ont ainsi été rendues plus claires pour s'approcher des couleurs des images de l'iPhone.

Lasergrammétrie

La lasergrammétrie a été employée pour modéliser la globalité du Jardin d'Hiver. Plusieurs étapes ont été nécessaires pour arriver au résultat final.

Dans un premier temps, il a fallu assembler les nuages de points acquis depuis les diverses stations les uns par rapport aux autres (consolidation). Les sphères disposées à l'intérieur du Jardin d'Hiver ont permis cela. Puis, ces nuages ont été géoréférencés grâce aux points d'appui levés par tachéométrie au préalable. Ces deux tâches ont été réalisées sous le logiciel SCENE de Faro.

Les nuages de points consolidés ont ensuite été importés dans le logiciel de traitement de nuages de points CloudCompare d'EDF pour y être nettoyés. Ce nettoyage a consisté à ôter le bruit présent par l'intermédiaire de filtres, à enlever les autres points parasites (personnes, objets) par segmentation, à fusionner les nuages et à rééchantillonner (homogénéiser) le nuage résultant à 1 mm.

Pour construire un modèle maillé de bonne qualité, le logiciel 3DReshaper de Technodigit, spécialisé dans le maillage, a été exploité. L'algorithme reposant sur l'affinage progressif du maillage a permis de construire un modèle 3D esthétique du Jardin d'Hiver.

Enfin, la dernière étape a consisté à texturer le modèle avec les images prises avec le Canon EOS 5DSR sur la volumétrie lors de la dernière campagne d'acquisitions en mai 2018. Encore une fois, le logiciel PhotoScan a été sollicité pour cette tâche (Figure 4).

Le modèle lasergrammétrique du Jardin d'Hiver produit étant très volumineux (2.5 Go), des méthodes de réduction ont été utilisées pour l'alléger et le rendre plus maniable par la suite. La fonction « Réduire » dans 3DReshaper et l'outil de simplification de maillage présent sur MeshLab [Caron, 2017] [Rodríguez-González et al., 2015] ont permis de réduire la taille du modèle d'environ 25% (format RSH) et 11% (format OBJ) respectivement.



Figure 4 : Modèle texturé du Jardin d'Hiver sans la fontaine produit sur PhotoScan (vue extérieure et intérieure)

5. Visualisation (réalité virtuelle)

Après avoir monté de toutes pièces les modèles lasergrammétriques texturés du Jardin d'Hiver et des objets remarquables, l'objectif est ensuite de les mettre en valeur grâce à différents moyens de visualisation.

Le premier moyen trouvé est d'importer les modèles légers des objets remarquables sur la plateforme en ligne Sketchfab. Des réglages peuvent être opérés sur la lumière pour rendre le modèle fidèle à la réalité et pour qu'il soit agréable à regarder. Dans les options concernant la réalité virtuelle, l'échelle peut être ajustée pour permettre à l'utilisateur de se rendre compte de la taille réelle de l'objet (Figure 5).

La deuxième solution de visualisation est d'utiliser le nuage de points consolidé du Jardin d'Hiver et de ses abords pour créer une immersion à l'aide d'un système de réalité virtuelle. Ici, le logiciel SCENE et le système HTC Vive ont permis de réaliser cela (Figure 5).

Enfin, la dernière option de visualisation est de mettre en place un scénario de visite virtuelle dans le modèle texturé du Jardin d'Hiver avec un moteur de jeux vidéo capable d'outrepasser le problème

du volume des fichiers. Après avoir fait des tests sur Unity et Unreal Engine, il a été décidé de construire cette visite sur Unreal Engine car ce moteur permet une meilleure visualisation des modèles par rapport à Unity. L'aspect interactivité a pris une place importante puisque des boutons ont été créés pour offrir la possibilité à l'utilisateur de consulter des informations concernant les différents objets remarquables du Jardin d'Hiver et l'histoire de ce dernier (Figure 5). Le système HTC Vive a également été réglé sur Unreal Engine afin de permettre l'interaction entre le modèle et l'utilisateur.



Figure 5 : Modèle du Pavillon de Rendez-Vous sur Sketchfab (à gauche), immersion dans le nuage de points du Jardin d'Hiver sur SCENE (au centre) et visite virtuelle sur Unreal Engine (à droite)

6. Conclusions et perspectives

Ce PFE a permis de poursuivre et de terminer les travaux de modélisation et de numérisation du Jardin d'Hiver de Sarreguemines entamés durant le PRT. L'obstacle que constituait la modélisation d'un matériau aussi réfléchissant que la faïence a été contourné en tirant profit des avantages de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie. Un modèle 3D maillé et texturé du Jardin d'Hiver a pu être sorti. Celui-ci sera archivé et prêt à l'emploi dans l'éventualité d'une casse ou d'un déménagement.

Outre, la conservation du patrimoine, le PFE a également été l'occasion de tester divers moyens de mise en valeur et de visualisation de ce patrimoine pour en faire profiter le grand public. Deux visites virtuelles interactives ont pu être réalisées : une dans le nuage de points et une dans le modèle. Ces outils permettront d'alimenter le futur espace numérique qu'envisage de développer le Musée de la Faïence avec l'appui de la Ville de Sarreguemines.

Dans le futur, d'autres travaux de modélisation pourraient être entrepris à Sarreguemines. En effet, d'autres monuments en rapport avec l'industrie faïencière jalonnent la ville comme le four, le Casino de la Faïencerie ou encore le Moulin de la Blies. Il pourra être aussi intéressant de chercher à automatiser certaines étapes du procédé de modélisation lasergrammétrique car celui-ci est particulièrement long et fastidieux. Par ailleurs, d'autres méthodes de réduction des modèles pourront être pratiquées comme la création de modèles hybrides constitués de primitives géométriques pour les parties sans détails particuliers et pour les éléments répétitifs. Pour terminer, il faudra sans doute améliorer le déplacement de l'utilisateur avec les contrôleurs du système de réalité virtuelle sur Unreal Engine pour plus de fluidité.

Références :

Caron, P. (2017) 'Modélisation 3D du souterrain de Naours et exploitation des données de la base de données Graffiti avec QGIS', Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, INSA Strasbourg, pp. 1-69.

Céramique d'architecture - Le Jardin d'hiver de Paul de Geiger - Musées de Sarreguemines (2017) *Musées de Sarreguemines*. Available at: <http://www.sarreguemines-museum.eu/musee-de-la-faïence/>.

Girardet, V. (2018) *Numérisation 3D du Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence à Sarreguemines*. Projet de Recherche Technologique, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg, pp. 1-55.

Górný, P. (2005) 'Highlight Removal Method for HDR Images', pp. 1–6. Available at: <http://old.cescg.org/CESCG-2005/papers/Szczecin-Gorny-Pawel.pdf>.

Rodríguez-González, P., Nocerino, E., Menna, F., Minto, S., Remondino, F. (2015) '3D Surveying and modeling of underground passages in wwi fortifications', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W4), pp. 17–24. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-17-2015.

MISE EN PLACE D'UN SIG ARCHEOLOGIQUE SUR LA COMMUNE D'HORBOURG-WIHR

PFE présenté par : **Théotime FRAGNOL**
Société d'accueil : *Archéologie Alsace*
Directeur de PFE : *Mathieu FUCHS*
Correcteurs : *Mathieu KOEHL*
Emmanuel ALBY



1. Contexte et objectifs de l'étude

Archéologie Alsace est un acteur majeur de l'archéologie territoriale qui assure la chaîne complète d'opérations archéologiques, des recherches de terrain à la conservation des objets et vestiges.

Horbourg-Wihr est une commune du Haut-Rhin qui s'est développée sur les vestiges d'une ville de l'Antiquité puis d'une occupation médiévale. La commune possède ainsi un patrimoine historique riche et varié. Les découvertes archéologiques se sont multipliées ces dernières décennies avec le développement de l'archéologie préventive. 70 entités archéologiques ont été recensées sur l'agglomération à partir de fouilles programmées, de diagnostics, de prospections aériennes, terrestres ou géophysiques. Une quantité considérable de données hétérogènes est issue de ces opérations archéologiques.

Ce PFE a pour but de gérer ces données et de répondre aux enjeux d'analyse spatiale et de synthèse des données collectées à travers la mise en place d'un Système d'Information Géographique et Archéologique (SIA) sous logiciel libre QGIS. Un SIA permettrait de visualiser sur un même support l'ensemble des données disponibles et ainsi confirmer ou non certaines hypothèses archéologiques.

L'exploitation du SIA doit permettre l'intégration de plans de référence, le géoréférencement des vestiges archéologiques, une analyse spatiale intégrant une lecture 3D et la mise en place de filtre d'exploitation (en fonction de la nature des vestiges, de leur datation, du mobilier retrouvé...), ainsi que les emprises des terrains fouillées.

Les principaux thèmes discutés au cours de ce PFE sont : la structuration de l'information archéologique au sein d'une base de données (à travers l'élaboration d'un modèle conceptuel de données) et la mise en place d'une méthode automatisée pour intégrer cette dernière au SIA (par le développement de plugin QGIS).

La mise en place d'un SIA de manière pérenne demande parfois de nombreuses années. Il est alors nécessaire d'assurer la continuité du projet à travers l'élaboration de manuels d'utilisation.

2. Données de l'étude

Les différentes opérations archéologiques effectuées à Horbourg-Wihr ont généré de nombreuses données. Avant d'intégrer ces informations dans un SIA, il est important de les analyser et de les répertorier. Nous avons pu en différencier quatre catégories distinctes : les métadatas, les données vecteurs ou raster et des données indépendantes des recherches d'Archéologie Alsace.

2.1. Rapports de fouilles et METADATA

À l'issue de chaque opération archéologique, des rapports de fouilles sont rédigés, à l'intérieur desquels se trouvent les métadatas. Ces rapports comportent une fiche signalétique qui permet d'identifier une opération par une série d'attributs.

Les rapports de fouilles contiennent également des listings des découvertes archéologiques réalisés lors des fouilles. On distingue le Mobilier archéologique (ensemble des objets recueillis sur le terrain) des couches stratigraphiques (traces matérielles d'actions anthropiques présentées sous la

forme de séquence de strates). Chacune de ces unités est enregistrée et associée à un numéro, le n°UE (unité d'enregistrement), et des attributs spécifiques.

2.2. Les données Vecteurs, plan Illustrator

Les données vectorielles concernant Horbourg-Wihr se présentent sous la forme de plans archéologiques Illustrator (format *.ai). Elles représentent l'ensemble des structures archéologiques retrouvées sur une fouille ou un diagnostic. Un haut niveau de détail est souvent utilisé avec des bâtiments dessinés « pierre à pierre ». Nous avons également constaté que les plans Illustrator ne suivent pas une trame commune et que chaque archéologue construit ses dessins à sa manière.

2.3. Les données Raster

Les images aériennes dévoilent parfois d'importants vestiges archéologiques. Archéologie Alsace réalise ainsi des travaux de photogrammétrie débouchant sur des orthophotos. De plus l'établissement possède des orthophotos de la commune, réalisées par l'IGN en 1945, 1979 et 1997.

Des cartes historiques de la région digitalisées sont également disponibles et trouvent leur place au sein du SIA. Les données LiDAR et celles issues de prospection géophysiques sont également intéressantes pour le projet.

Toutes ces données nécessitent un géoréférencement afin d'être utilisées dans le SIA.

2.4. Données indépendantes d'Archéologie Alsace

Nous avons également à notre disposition la BD parcellaire d'Horbourg-Wihr qui servira de plan de référence. De plus le Service Régional Archéologique nous a fourni un extrait du SIG PATRIARCHE d'Horbourg-Wihr et des communes environnantes. PATRIARCHE est l'outil SIG de la carte archéologique nationale, cartographiant les informations relatives à l'archéologie sur le territoire national des origines à nos jours.

De nombreuses informations sont donc disponibles sur Horbourg-Wihr. La création d'un MCD était alors la meilleure façon d'organiser les données au sein d'une BD.

3. Mise en place du SIA et de la base de données

Dans le but de gérer ces différentes données du mieux possible, nous avons dû réfléchir à la manière de les organiser au sein d'un Modèle Conceptuel de Données. Sachant qu'une BD est associée au SIA, nous avons suivi la méthode Merise afin qu'elle réponde au mieux aux problématiques du projet.

La rédaction d'un cahier des charges a permis de déterminer l'aspect général du SIA et de la BD. Les éléments archéologiques devant figurer dans le SIA, le type de leurs géométries et les attributs auxquels ils doivent être associés sont indiqués dans ce document. Nous avons alors pu créer un MCD pour le projet (Figure 1).

Les tables principales sont celles représentant les éléments archéologiques : la voirie, les bâtiments, les fossés, les vestiges ponctuels et les parcelles. Chacune possède des champs similaires portant sur leur nature et leur datation ainsi qu'une géométrie (polygone, polyligne ou ponctuelle). Les éléments archéologiques peuvent être contenus par une opération et par son emprise. Toutes les informations administratives relatives aux opérations se retrouvent dans la table éponyme.

D'autres tables, sans géométrie, recensent les mobiliers, les architectures et les unités d'enregistrements (UE) de chaque élément. Elles possèdent un champ permettant de faire le lien avec les éléments archéologiques (souvent l'identifiant). Isoler ces tables permet de faciliter les requêtes sur les types architecturaux ou le Mobilier.

Il était également important que le SIA intègre une composante altimétrique. Nous avons fait le choix d'associer un champ d'altitude à la table des UE associés. Listant les UE des éléments archéologique, la table ouvre d'une part une passerelle entre le SIA et les rapports d'opérations mais permet surtout d'obtenir l'altitude des éléments. En effet à l'issue des levés topographiques, les coordonnées des points sont enregistrées avec leur numéro d'UE dans des fichiers *.csv.

Une homogénéité des données doit être respectée si l'on veut exécuter des requêtes précises sur la nature, les types d'architecture, de mobilier ou la datation des composants de la BD. Cette réflexion a amené la rédaction d'un thésaurus précis sur des listes de valeurs et la syntaxe des différents champs de la base de données.

Nous avons alors choisi de monter la BD sous SQLite, motivés par son extension spatiale compatible avec QGIS et sa facilité d'utilisation avec le logiciel SIG. Afin de valider la structure de la base de données, une série de requêtes a été soumise à celle-ci pour vérifier sa cohérence vis-à-vis des problématiques.

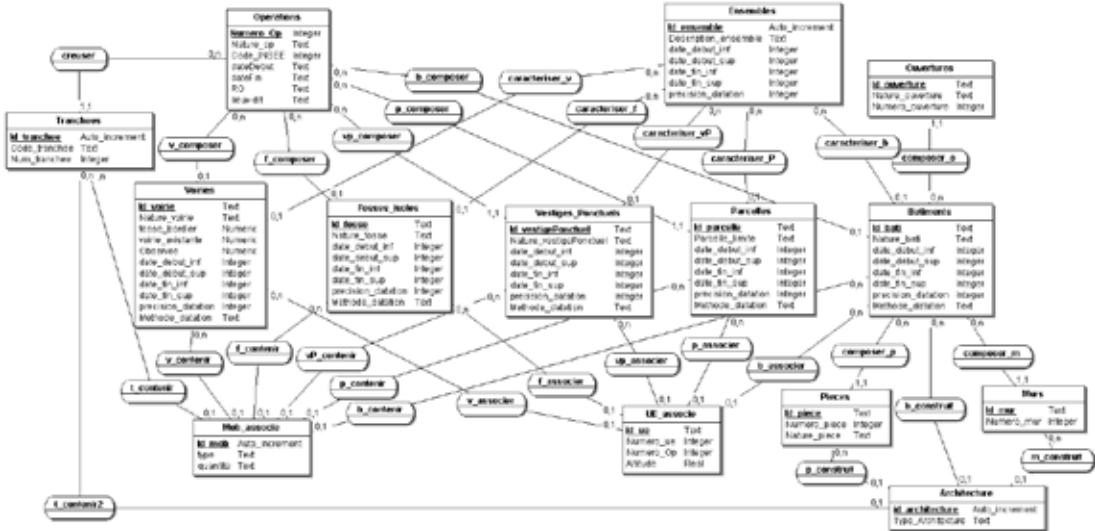


Figure 1: MCD de la base de données associée au SIA d'Horbourg-Wihr

La création du projet sous QGIS permet alors de gérer l'arborescence des différentes couches – Spatialite, Raster pour les prospections géophysiques ou aériennes, BD parcellaire et PATRIARCHE (formats *.shp) – et les représentations symboliques des éléments.

La mise en place de la BD nous a permis de structurer la multitude d'informations présentes sur Horbourg-Wihr en ciblant les problématiques archéologiques du SIA. La suite du PFE porte sur la mise en place d'une méthode automatisée d'intégration des données issues des opérations archéologiques.

4. Intégration des opérations archéologiques

Une solution d'intégration des opérations archéologiques dans le SIA et la base de données a été proposée et développée. Elle se présente sous la forme d'un Plugin QGIS. Cette solution a l'avantage de gérer simultanément l'intégration des attributs et de la géométrie à la BD, en offrant de larges possibilités sur la forme de l'outil. Les principaux enjeux de cette phase étaient l'automatisation maximale du processus et le développement d'une utilisation intuitive pour les archéologues.

La première étape est l'édition des géométries des éléments archéologiques. Il a fallu développer un outil que gère à la fois l'édition de nouvelles géométrie (à partir de raster) et la récupération de géométries existantes (à partir des plans vecteurs Illustrator). Nous avons pour cela intégré dans notre application des outils de géoréférencement raster ou vecteur déjà existants dans QGIS.

L'intégration des données attributaires se fait à travers une boîte de dialogue, développée avec QTdesigner (figure 2). Ces interfaces ont été conçues de manière à minimiser le nombre de champs à saisir par l'utilisateur et à forcer le respect du thésaurus. Nous avons utilisé pour cela des listes déroulantes, et automatisé la gestion d'un maximum de tables et de champs grâce au programme Python. L'ergonomie de l'outil et de l'interface a demandé une attention particulière au



Figure 2: Interface - intégration d'une voirie archéologique au SIA avec le plugin SIA_HbW

5. Conclusion et Perspectives

Au cours de ce PFE, les bases du développement d'un Système d'information Géographique et Archéologique sur la commune d'Horbourg-Wihr ont été mises en place. Nous avons pu proposer une manière de gérer la donnée archéologique ainsi qu'une méthode pour intégrer ces informations dans la BD. Pour cela nous avons parfois dû faire des choix, notamment vis-à-vis de la structuration de la donnée. Il était alors important de garder une trace de notre démarche et ainsi de pouvoir transmettre le cheminement de nos réflexions.

L'intégration des données issues d'une opération de fouille archéologique ont permis d'évaluer les éléments mis en place. Si cela a permis de valider certains aspects de l'étude, nous avons dans le même temps pu mettre le doigt sur des lacunes du plugin d'intégration des éléments archéologiques et de définir les axes de développements futurs du projet.

Parmi ces points à étudier, on retrouve dans un premier temps une revue de l'ergonomie de l'outil, afin d'accélérer et de fluidifier l'intégration des opérations archéologiques. L'intérêt sera notamment d'éviter d'avoir à éditer des géométries sous QGIS lorsqu'elles sont déjà existantes sous Illustrator. Développer un outil facilitant l'édition de requêtes SQL sur la BD semble également indispensable à la bonne utilisation du SIA.

De nombreuses pistes de développement restent encore à explorer : mise en ligne du SIA, élargissement de la base de données à l'ensemble de la région et des périodes historiques, mise en lien des géométries avec les photographies prises sur les chantiers de fouille ou encore la mise en place d'un procédé commun à l'ensemble d'archéologie alsace, du dessin archéologique jusqu'à l'intégration au sein d'un SIA.

Pour assurer la poursuite de ce projet d'avenir dans ces multiples voies, nous avons dû mettre en place des éléments – manuels d'utilisation, manuels développeurs, synthèses – permettant une prise en main du projet et de ses problématiques rapide et efficace.

cours du développement. L'utilisation de l'outil doit être instinctive et fluide si archéologie alsace a pour objectif d'intégrer une grande quantité d'information dans le SIA.

Le dernier mois du projet aura permis l'intégration d'une opération archéologique dans la BD. Cette étape sera faite avec un archéologue et permettra l'étude qualitative de l'outil. Cela permettra d'évaluer le temps nécessaire à l'intégration des données et de cibler les difficultés liées à l'utilisation de l'outil. Nous pourrions également valider définitivement la structuration de la BD archéologique d'Horbourg-Wihr et évaluer la pertinence de nos choix.

Modélisation 3D du Castellum de Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine

PFE présenté par : **Thibaut NIVOLA**
Société d'accueil : **Archéologie Alsace**
Laboratoire ICube UMR 7357, Equipe TRIO
Directeur de stage : **Matthieu FUCHS, Directeur Général**
Responsable scientifique : **Florian BASOGE, Ingénieur topographe**
Encadrant : **Mathieu KOEHL**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Introduction

La reconstruction 3D n'est pas un concept nouveau en archéologie et est utilisée depuis une trentaine d'années, si l'on se réfère aux nombreux travaux réalisés. Les projets de restitution utilisent de plus en plus la modélisation comme moyen de présentation interactive.

Dans un objectif plus scientifique, ces modèles permettent aux archéologues de visualiser et de tester leurs hypothèses. Les travaux de restitution ne se limitent aujourd'hui plus à des rendus 2D, mais peuvent désormais s'appuyer sur les techniques du monde du jeu vidéo. Des environnements 3D sont ainsi créés pour permettre aux utilisateurs d'explorer le modèle dans un but pédagogique ou scientifique.

2. Contexte de l'étude

La commune d'Horbourg-Wihr, située à 60km au sud-ouest de Strasbourg, s'est développée sur les vestiges d'une ville romaine durant l'antiquité. Pour faire face aux invasions barbares qui menacent le vaste territoire de l'empire romain au milieu du 3^{ème} siècle, la ville antique d'Horbourg-Wihr se dote au IV^{ème} siècle d'un camp militaire. Aujourd'hui disparu sous l'urbanisation de la ville, cet édifice romain est un quadrilatère d'environ 170m de côté, renforcé par 16 tours et complété par un fossé. Etant donné sa taille et sa fonction strictement militaire, le terme de *castellum* est employé pour ce type de fortification.



Figure 1- Elevation du castellum d'Horbourg-Wihr, d'après l'architecte C. Winkler (1905)

Cet édifice fait l'objet de travaux archéologiques depuis le 19^{ème} siècle, avec notamment d'importantes fouilles réalisées par le pasteur E.A Herrensneider et l'architecte C. Winkler durant les années 1884-85. Leurs travaux ont permis d'en dresser un plan théorique.

De nombreuses autres fouilles ont été réalisées depuis et d'autres sont aujourd'hui encore programmées pour tenter d'en apprendre plus sur l'histoire de la ville.

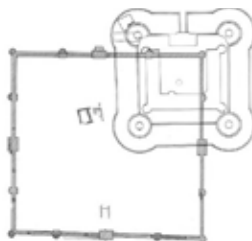


Figure 2 - Plan théorique du castellum et du château d'Horbourg-Wihr : Plan dressé par E.A Herrensneider (1894) à partir de fouilles archéologiques. Le château comtal d'Horbourg-Wihr (XVI^{ème} siècle) apparaît dans l'angle nord-est du castellum

2. Objectifs du PFE

Ce *castellum* suscite aujourd'hui l'intérêt des archéologues et de la ville d'Horbourg-Wihr, et l'initiation de ce projet s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre Archéologie Alsace et l'INSA de

Strasbourg. La volonté de la part d'Archéologie Alsace est donc de restituer cet édifice en 3D et de le rendre accessible de manière virtuelle, afin de valoriser ce site historique.

Pour cela, le projet contient une première partie d'analyse et d'interprétation des données. Les documents disponibles sont de nature diverses : peintures, plans, photos de fouilles, textes, nuages de points, travaux archéologiques, etc.. Des sites similaires proches en termes d'architecture, de localisation géographique et d'époque ont également été visités pour s'en inspirer et pouvoir faire des propositions de restitution. Les données à disposition étant malgré tout lacunaires, l'aspect multidisciplinaire de ce projet est très important. En effet, l'expérience des archéologues et le suivi de la modélisation tout au long de son avancement est indispensable pour aboutir à un modèle à la fois justifiable, au niveau des propositions faites et suffisamment complet pour pouvoir être 'mis en valeur'.

La seconde partie du projet est donc la mise en valeur des édifices. Une fois les modèles validés, les maquettes 3D ont été intégrées de manière virtuelle dans la trame urbaine actuelle, par le biais d'une visite virtuelle interactive.

3. La restitution archéologique

3.1. Définition

La reconstruction 3D est une technique utile pour la présentation et l'interprétation. C'est la technique que l'on utilisera dans ce projet. Elle permet d'aboutir à un modèle 3D moins réaliste qu'un objet acquis par balayage laser ou par photogrammétrie. Néanmoins, un modèle reconstitué a l'avantage d'être facilement manipulable et permet de représenter des éléments perdus d'un site. Les reconstructions 3D peuvent montrer un site « tel qu'il était » alors que les deux technologies précédentes ne permettent que de montrer le site « tel qu'il est » (A. Fuchs, 2007). En effet, la photogrammétrie et le balayage laser sont des techniques d'acquisition de précision qui sont indiscutables en termes de réalisme. Là où la reconstruction 3D domine vraiment dans le domaine de la présentation et de l'interprétation. Pour le grand public, la reconstruction 3D est le moyen parfait pour présenter un site disparu ou détruit et faciliter la compréhension historique. Néanmoins, ces technologies ne s'excluent pas et un modèle peut être obtenu en combinant ces différentes techniques.

3.2. Principes

Ce projet s'adresse en premier lieu au grand public. La modélisation doit donc permettre de mettre en valeur le site en explorant et en interagissant avec des éléments, mais doit être réalisée dans un esprit de restitution archéologique et scientifique. En effet, si la 3D permet d'améliorer notre vision et notre compréhension de la réalité disparue, il faut aussi poser la question du rapport entre le réel et le modèle (Dufay, 2014).

L'avantage d'une maquette 3D, en plus de rendre état pour le grand public, est d'aider l'archéologue à visualiser un modèle au fur et à mesure de l'évolution des hypothèses. La maquette numérique peut ainsi être utilisée comme un outil de synthèse archéologique, en permettant d'identifier et de différencier ce qui est connu de ce qui ne l'est pas. Il faut garder à l'esprit qu'on ne peut jamais affirmer que le modèle proposé est tel qu'il était dans le passé. Rendre compte des incertitudes concernant la modélisation renforce donc la transparence et exprime une forme d'honnêteté.

En effet, un modèle ne présentant pas les incertitudes et les données utilisées, crée l'idée fausse que la reconstruction est absolument certaine. Alors qu'il s'agit d'une simple interprétation parmi tant d'autres. Les modèles étant basés sur une combinaison d'éléments précis et de créations plus hypothétiques, il est important d'établir une distinction claire entre les deux.

4. Modélisation et structuration

La modélisation est un travail progressif car pour modéliser chaque élément, un travail de recherche préalable doit être fait pour pouvoir faire une ou des propositions de restitution. Les propositions sont ensuite présentées aux archéologues qui donnent leurs avis sur chacune d'elles. Dans ce type de projet, les retours en arrière sur la modélisation sont inévitables et indispensables pour pouvoir aboutir à un modèle final dont on peut justifier la modélisation de chaque élément.

La démarche de restitution peut être décomposée en quatre étapes (Dell'Unto et al. 2012) :

1. **L'analyse des données** : Toutes les données récupérées au cours du projet ont été analysées et classées en fonction de leur nature (peintures, plans, photographies, ...).
2. **Discussions** : Au cours de ce projet, des spécialistes (M. Fuchs et J. Koch) ont été impliqués afin de discuter de l'interprétation des documents et de la représentation des édifices.
3. **Modélisation** : Après interprétation des données, le modèle 3D a été réalisé avec le logiciel de modélisation choisi (*Trimble Sketchup*).
4. **Validation** : Le modèle est finalement examiné et approuvé par les spécialistes.



Figure 3 - Proposition de restitution 3D du castellum

Le modèle 3D ci-dessus est une maquette 'blanche', sans textures ni couleurs. Pour l'habiller et lui donner une ambiance conforme à son époque, une trentaine de textures ont été appliquées, après concertation avec les archéologues. Cette maquette aura pris environ 4 mois pour être achevée, pour un temps total de modélisation estimé à plus de 200 heures.

D'un point de vue quantitatif, près de 300 composants *uniques* sont présents dans le modèle final, pour un total d'un peu moins de 18 000 *composants dupliqués*. Par ailleurs, 15 *calques* différents ont été créés pour permettre d'afficher le modèle en fonction du niveau de détail souhaité (3 calques), en fonction des 8 grands-groupes du modèle : bâtiments internes ; entrée ; rempart ; temple ; terrain naturel ; tour angle ; tour intermédiaire ; tour porte (8 calques) et en fonction des différents niveaux de certitude (4 calques). En effet, en vue de présenter les incertitudes liées aux hypothèses de restitution, la structure du modèle a été réfléchi de manière à pouvoir distinguer les éléments :

1. **Attestés par les fouilles et les travaux archéologiques** : S'appuie sur des preuves objectives d'éléments retrouvés et observés.
2. **Restitués par déduction logique** : Ce niveau correspond aux parties modélisées par déduction et prolongement entre deux éléments attestés.
3. **Restitués par analogie** : S'appuie sur des vestiges archéologiques similaires de la région, sur les styles romains et sur les ordres architecturaux.
4. **Restitués par hypothèses** : C'est le niveau de certitude le plus bas et le plus inexact.

Ces quatre niveaux de certitude, intégrés sous forme de calques dans le logiciel de modélisation, permettent de visualiser directement l'incertitude par un affichage colorisé du modèle.

Toujours dans un esprit de transparence liée à la restitution, des fiches récapitulatives sur la méthode de modélisation et sur les données utilisées ont été créées pour les 8 grands groupes du modèle. Ces fiches ont été liées interactivement dans le modèle *Sketchup* au moyen d'hyperliens, de sorte à pouvoir y accéder d'un simple clic sur un composant.

5. Mise en valeur du site

Si la modélisation 3D est un sujet qui porte beaucoup sur le visuel, l'objectif n'est pas seulement de regarder des images mais de proposer et de mettre en place des solutions interactives de valorisation, accessibles pour le grand public. Pour cela, deux parties ont été développées dans ce projet :

- Mise en ligne du modèle 3D

La mise en ligne du modèle sera faite grâce à la plateforme *Sketchfab* qui permet d'héberger le modèle sur les portails web d'Archéologie Alsace et de la commune d'Horbourg-Wihr.

Cette plateforme propose également une solution bon marché pour visualiser le modèle en réalité virtuelle grâce à un smartphone et un Google Cardboard ou bien grâce à un vrai casque de réalité virtuelle, plus performant.

- La visite virtuelle

Les visites virtuelles sont utilisées pour documenter les bâtiments historiques depuis plusieurs années. C'est un moyen interactif de découvrir un site et d'en apprendre plus sur son histoire grâce à l'intégration de documentation, de textes, d'images d'archives ou de vidéos dans la visite virtuelle.

La visite virtuelle proposée se basera donc sur des photos panoramiques fixes, sur lesquelles seront intégrées des rendus photoréalistes du modèle, dans le but de présenter l'édifice dans l'environnement urbain actuel.

6. Conclusion et perspectives

Ce projet a été initié par une volonté de mettre en lumière ce site historique de la commune d'Horbourg-Wihr, désormais disparu. L'enjeu final de cette restitution est donc de faire découvrir le site aux visiteurs et aux habitants.

L'un des grands enjeux d'un point de vue archéologique était de parvenir à restituer l'édifice dans son ensemble bien que les connaissances et les données sont parfois lacunaires et ne permettent pas de modéliser dans le détail et de façon homogène l'ensemble de l'édifice.

Il n'en reste pas moins que ce travail a été effectué dans une démarche scientifique, pour permettre l'exploitation, la visualisation et la mise à jour des données par d'autres intervenants.

Il faut garder à l'esprit qu'on ne peut jamais être sûr que le modèle proposé est tel qu'il était dans le passé. C'est pourquoi il a été important dans ce projet de rendre compte des incertitudes de restitution, liées à la fiabilité des données. Le but étant d'être transparent quant à la méthode de modélisation utilisée.



Figure 4 - Rendu photoréaliste de l'entrée sud du castellum

Pour répondre aux besoins de ce projet, il aura été nécessaire de développer de nouvelles compétences, en particulier dans les domaines de l'archéologie, de l'architecture et de l'informatique.

Ce projet peut néanmoins être approfondi. En effet, les découvertes archéologiques étant permanentes, de futures fouilles pourraient amener les archéologues à revoir certaines hypothèses concernant l'architecture du monument.

La modélisation du château comtal d'Horbourg-Wihr, construit dans l'angle nord-est du castellum au 16^{ème} siècle, est également envisagée. Cette modélisation pourra être intégrée dans la visite virtuelle pour présenter le site à différentes époques : IV^{ème} siècle pour le castellum, XVI^{ème} siècle pour le château comtal et XXI^{ème} siècle pour l'environnement contemporain. Cela fera probablement l'objet d'un futur projet.

Références :

Dell'Unto, N. et al. (2013) 'Digital reconstruction and visualization in archaeology : Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project', Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions fromCAA, Arqueologica 2.0 et al., 1(February), pp. 621–628. doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804.

Dufay, B. (2012) 'La modélisation 3D de grands ensembles monumentaux : de la restitution au public à la recherche scientifique', Actes des 3èmes Journées d'Informatique et Archéologie de Paris JIAP, pp. 265–277. doi: 149-163 LA 265–277.

Fuchs, A. (2007) Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique. Université Henri Poincaré, Nancy.

Mise en place de procédures automatisées pour les reports topographiques en milieu ferroviaire à partir de données photogrammétriques et LIDAR acquises par drones

PFE présenté par : **Marion HINAUX**

Société d'accueil : **ALTAMETRIS**

Directeur de PFE : **M. Pierre ASSALI**

Correcteurs : **M. Pierre GRUSSENMEYER**

Mme Tania LANDES

ALTAMETRIS

1. Introduction

Au cours des dernières années, ALTAMETRIS qui a pris la suite du pôle Drone SNCF Réseau, a pu démontrer l'intérêt et l'efficacité des levés par drones en milieu ferroviaire. Ils permettent en effet une souplesse d'intervention garantissant la sécurité des employés et ne nécessitant pas l'interruption du trafic ferroviaire. Ces levés sont réalisés dans le cadre de différentes missions telles que l'inspection d'ouvrages, la sûreté, les relevés topographiques ou la valorisation de sites.

Cette étude s'inscrit dans le cadre des missions topographiques et plus précisément dans la phase de report des données. L'amélioration des procédures de production des livrables topographiques représente un enjeu important pour ALTAMETRIS. En effet, si les méthodes de levé par LiDAR et photogrammétrie permettent aujourd'hui d'obtenir assez facilement des nuages de points et ortho-images, la difficulté réside principalement dans le traitement de ces données très denses visant l'extraction d'informations spécifiques propres à chaque métier (documents vectoriels simplifiés, tableaux de valeurs, etc.)

Une solution semi-automatisée d'assistance au report des voies est actuellement en cours de développement au sein d'ALTAMETRIS. Les travaux portant sur l'automatisation des procédures de contrôle des livrables topographiques réalisés au semestre précédent ont également constitué des développements importants qui ont servi de base à ce projet.

Cette étude s'est structurée autour de plusieurs objectifs. En préalable à tout développement, il s'agissait tout d'abord de dresser un bilan des méthodes de report qui étaient déployées de manière à fixer une procédure générale qui serait utilisée par l'ensemble des équipes de traitement et permettrait d'homogénéiser la réalisation des livrables. À partir de cet état des lieux, nous avons pu identifier les tâches critiques, présentant un fort potentiel d'amélioration, afin de proposer et, dans la mesure du possible, de tester, des alternatives plus efficaces.

2. Analyse des procédures de report

Avant de procéder à l'automatisation des tâches, il convient de faire un point sur la chaîne de traitement actuellement déployée afin de mettre en lumière les étapes les plus critiques à améliorer.

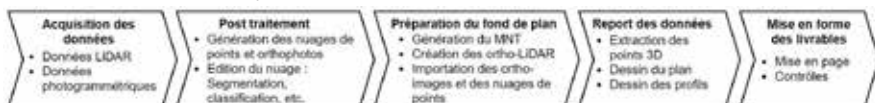


Figure 1 : Etapes principales des procédures de report

Afin de réaliser ces traitements, de nombreux logiciels commerciaux sont utilisés. En complément, plusieurs outils ont été ou sont en cours de développement au sein d'ALTAMETRIS :

- *Rodimus Prime* : permet de générer différents types d'ortho-LiDAR utilisées pour le report des données ;
- *Factotum* : application intégrée à l'environnement AutoCAD qui regroupe plusieurs outils de dessin, d'import et d'export de données permettant de faciliter le report ;
- *AltaTrack* : vise l'extraction automatique d'objets en environnement ferroviaire tels que les rails ou les caténaires.

L'analyse des procédures réalisée a permis d'identifier les étapes du report des données les plus problématiques et d'orienter les développements à réaliser. L'étape la plus chronophage identifiée est le report 3D. En effet, celui-ci nécessite la réalisation de multiples coupes dans le nuage afin d'en extraire les points caractéristiques. La génération du fonds de plan, la mise en page et le choix des ortho-LiDAR à utiliser pour le report constituent également des points à améliorer.

Avant de réaliser ces développements, une analyse des outils existants s'est imposée.

3. Analyse des outils existants

3.1 Validation d'AltaTrack

AltaTrack est un outil d'assistance au report des voies créé en interne chez ALTAMETRIS pour faciliter le report des données. En cours de développement, il permet aujourd'hui l'extraction automatique de rails et de câbles caténaires à partir d'un fond de plan raster et de nuages de points LiDAR. Son principe consiste à extraire les points d'intérêt à partir de boîtes de sélection disposées grâce aux indications du dessinateur (axe et sens de la voie). Afin d'insérer cet outil dans la chaîne de traitement, nous devons valider son efficacité et sa précision d'extraction. Pour cela, une comparaison a été réalisée sur une cinquantaine de profils entre des points extraits exactement aux mêmes endroits avec la méthode automatique et manuelle (Tableau 1). Cette analyse rigoureuse point par point est venue compléter un premier contrôle qui avait été effectué sur un échantillon de plus de 300 points. Celui-ci avait donné un écart-type d'1 cm sur les points de rails en calculant les écarts entre des points manuels et la surface de roulement interpolée à partir des points automatiques.

	Ecart rails (en m)			Ecart catenaires (en m)		
	DZ	Di 2D	Di 3D	DZ	Di 2D	Di 3D
Moyenne	0.004			-0.009	0.016	0.025
Moyenne (Abs)	0.005	0.012	0.014	0.015		
Max (Abs)	0.047	0.043	0.059	0.037	0.054	0.055
Ecart-type	0.007	0.010	0.012	0.018	0.014	0.022

Tableau 1 : Ecart obtenu pour l'extraction de rails et de caténaires avec l'outil AltaTrack

L'écart-type d'1 cm en planimétrie obtenu pour l'extraction des points de rails est satisfaisant au regard de la largeur de 6 cm d'un champignon de rail. L'écart-type en altimétrie reste quant à lui inférieur au centimètre. Les points de caténaires extraits par *AltaTrack* présentent des écarts un peu plus importants, souvent liés à la présence de plusieurs câbles caténaires proches dans la boîte de sélection. L'analyse de ces écarts a pu montrer l'impact de la densité de points et du bruit sur la qualité des extractions.

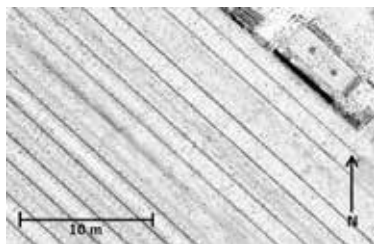
Compte tenu de la précision centimétrique attendue pour le report des rails, les résultats obtenus ont permis de valider leur extraction avec l'outil *AltaTrack*. Pour en améliorer encore la précision et mieux gérer les cas particuliers, les méthodes de sélection des points et les critères de validation de l'extraction pourront être affinés.

3.2 Analyse des Ortho-LiDAR

Actuellement le report des données s'effectue à l'aide des nuages de points et d'ortho-LiDAR utilisées comme fond de plan. Afin d'identifier les meilleures ortho-LiDAR à utiliser pour le report, nous allons analyser la visibilité des principaux objets à reporter sur les différentes combinaisons de filtres de points et représentations qui ont été implémentées dans *Rodimus Prime*.

Utilisations	Résolution pour une densité de 1000 pts/m ²	Type de représentation	Ensemble d'application
Report du relief	6 cm	Hillshade (Ombrage de surface)	Nuage de points du MNT
Visualisation/perception	5 cm	Sky View Factor (Portion de ciel visible)	Points hauts du nuage
Report poteaux et câbles caténaires	5 cm	Dz Voisinage/Hauteur locale	Points hauts du nuage
Report rails et mobilier ferroviaire	5 cm	Dz Voisinage	Filtre élévation 0.3 + Points hauts du nuage
Report végétation, murs et bâtiments	5 cm	Sky View Factor	Points hauts du nuage

Tableau 2 : Paramètres optimaux à la création d'ortho-LiDAR suivant leur utilisation



Cette analyse a ainsi permis de déterminer les paramètres optimums à utiliser suivant les éléments à reporter (Figure 2). Après avoir constaté que le report du relief restait difficile avec la représentation Hillshade, plusieurs perspectives qui permettraient d'avoir une meilleure visualisation des lignes de rupture de pente ont également pu être mises en lumière.

Figure 2 : Ortho-LiDAR adaptée au report des rails et du mobilier ferroviaire

4. Automatisation de la procédure de report

4.1 Digitalisation 3D

Afin de réduire les temps de traitement pour le report des données 3D, une nouvelle méthode de report semi-automatisée a été testée au travers d'un outil proposé par le module *TerraScan*. Les rails et les caténaires pouvant être traités avec *AltaTrack*, les tests se sont concentrés sur les éléments nécessitant encore aujourd'hui un report avec la méthode manuelle. Suivant l'environnement d'extraction et les points à extraire, trois catégories d'objets ont pu être identifiées :

- Les points de niveau situés sur : de la voirie, des zones en terre, de la végétation basse.
- Le point au sol des objets verticaux : bâtiments, poteaux.
- Les points supérieurs des caniveaux à câbles

Ces objets nécessitent une précision de 2 à 5 cm en planimétrie et de 5 à 10 cm en altimétrie.

La méthode proposée par *TerraScan* se base sur l'utilisation combinée d'une ortho-image et du nuage de point de la zone à reporter. Elle consiste, pour chaque point digitalisé sur l'ortho-image, à extraire l'altitude de son point correspondant dans le nuage suivant la zone de recherche et la méthode d'extraction choisies par l'utilisateur. Afin d'évaluer la précision de cette nouvelle méthode, celle-ci a été comparée à l'extraction manuelle, définie en tant que référence. La différence entre ces deux méthodes étant uniquement la détermination de l'altitude des points, seule celle-ci sera étudiée. Les écarts suivants ont été calculés sur des échantillons de plus d'une centaine de valeurs pour chaque type d'élément. Afin de déterminer les paramètres les plus adaptés pour l'extraction de chaque type d'objet plusieurs tests ont été réalisés (Tableau 3). Les points faux extraits conduisant à des écarts de plusieurs dizaines de centimètres pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres ont été supprimés avant de réaliser l'analyse de précision.

Types d'objets	Méthode d'extraction	Voisinage (en m)		Points extraits correctement		Origines des fautes	Ecart DZ sur les points correctement extraits (en m)					
							Moyenne		Moyenne (Abs)		Ecart-type	
Points de niveau	Point le plus bas	0.05		97%		Egouts dans la zone de recherche, végétation	-0.01		0.02		0.02	
Objets verticaux	Point le plus bas	0.05	0.1	72%	87%	Végétation, faible densité de points	0	-0.01	0.03	0.03	0.04	0.04
Caniveaux à câbles	Point le plus haut	0.05		91%		Câbles ou poteaux dans la zone de recherche	0.01		0.01		0.03	

Tableau 3 : Paramètres et résultats des tests effectués

Les écarts obtenus sur les points correctement extraits étant inférieurs aux tolérances, les méthodes pourront être validées sous condition de supprimer les fautes lors des extractions. Pour cela, différentes méthodes pourront être mises en place. Une classification des points du sol pourra être réalisée pour limiter le risque d'extraction de points n'appartenant pas au sol, mais le résultat dépendrait cependant de la qualité de la classification et rajouterait une étape supplémentaire. Ensuite, l'utilisation d'un diagramme de répartition des altitudes des points dans chaque zone de recherche pourra permettre d'identifier les pics correspondants aux altitudes du sol ou des toits de

bâtiments par exemple et d'extraire le point désiré. Enfin, dans le cas des caniveaux à câbles, avant d'extraire le point le plus haut, un filtre ne conservant que les points sous une certaine altitude par rapport au point le plus bas de la zone pourra être utilisé.

4.2 Aide à la génération des plans

La deuxième source d'automatisation envisagée s'appuie sur le développement de différents outils à intégrer à *Factotum* pour faciliter et contrôler le report des données. Ils se traduisent par la création d'un fichier gabarit, d'un cartouche ou de fonctions d'aide à la génération du fond de plan et de la mise en page.

Un outil de création automatique de profils à partir des données fournies par *AltaTrack* a ainsi été mis en place. En effet, celles-ci ne sont pas totalement adaptées à la mise en page des plans, notamment pour la création de profils alignés sur des faisceaux de voies. L'outil créé permet d'insérer des points 3D interpolés aux croisements des axes de profils et des voies pour matérialiser les profils. Une extension d'un outil d'insertion d'ortho-image a également pu être mise en place afin de pouvoir gérer les calques d'insertion des données.

4.3 Développement d'*AltaTrack*

Un autre aspect de l'automatisation du report concerne le développement d'*AltaTrack*. En effet, l'analyse de ses résultats réalisée précédemment a permis de l'identifier en tant que composant principal des futures procédures de report. Dans le cas de l'extraction des rails (Figure 3), qui constituent un des éléments les plus importants à reporter, les développements se sont orientés dans deux directions.

Tout d'abord, les méthodes d'extraction des points peuvent être améliorées. Pour rendre l'algorithme encore plus robuste, des restrictions supplémentaires sur le choix des points à extraire pourront être mises en place. Ces critères concerneront, par exemple, la densité des points ou leur répartition sur le champignon du rail. Ensuite, les critères qui sont à respectés pour qu'un profil soit validé doivent être affinés. En effet, les points extraits doivent respecter un certain nombre de tolérances pour être considérés comme conformes. Elles concernent : l'écartement des rails, les valeurs de rampes, le rayon de courbure et le devers.

Les travaux de développement d'*AltaTrack* sont toujours en cours lors de la rédaction de ce résumé et ne peuvent être présentés.

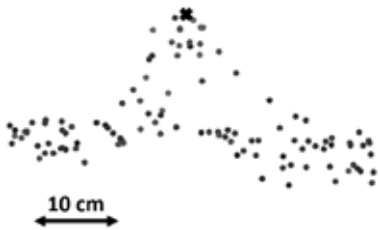


Figure 3 : Vue en coupe d'une extraction du point haut du champignon de rail (Coupe de 50 cm d'épaisseur)

5. Conclusion et perspectives

Les travaux réalisés ont tout d'abord permis d'établir un schéma précis des procédures de report actuellement utilisées au sein d'ALTAMETRIS et de faire un bilan des outils disponibles. Les recherches réalisées par la suite ont permis d'avoir un aperçu de l'étendu des possibilités d'amélioration à mettre en place sur la chaîne de traitement.

Au vu des résultats obtenus avec *TerraScan*, nous pouvons affirmer que l'utilisation des méthodes proposées présente, pour certains types d'objets, un gain de temps pour le report sans en diminuer la précision. Afin d'éviter l'utilisation d'un nouveau logiciel dans la chaîne de traitement, les techniques d'extraction pourront être intégrées à *AltaTrack*. En effet, la souplesse de développement de celui-ci pourra permettre leur implémentation et leur optimisation.

Le développement de nouveaux outils automatisés et l'amélioration des outils existants constitue un enjeu qu'il convient de poursuivre constamment, afin de pouvoir continuer à améliorer les procédures de report des données.

Analyse et contrôle de relevés de bâtiments par la technologie Zeb-Revo de Geoslam et mise en valeur de ces données via la maquette numérique



PFE présenté par : **Pierre PEGOSSOFF**
Société d'accueil : **PARERA**
Directrice de PFE : **Aurélien LABORDE**
Tuteur de PFE : **Florian PRUVOST**
Correcteurs(trices) : **Tania LANDES, Pierre GRUSSENMEYER**



1. Introduction

L'entreprise Parera, leader français de la cartographie, connaît une forte croissance depuis quelques années et poursuit sa lancée en se plaçant sur des marchés porteurs et innovants tels que le PCRS et le BIM. C'est dans ce cadre que l'entreprise a acquis, en juillet 2017, un Zeb-Revo qui est un scanner laser mobile portatif.

Cet appareil, développé par Geoslam, est un scanner laser dynamique (figures 1 et 2). De ce fait, il a la capacité de relever de grands bâtiments en l'espace de quelques heures seulement. Il s'agit d'un appareil tout à fait innovant reposant sur la technologie SLAM (*Simultaneous Localisation And Mapping*) initialement adaptée à la robotique. Grâce à un système de reconnaissance de géométries et d'une centrale inertielle, l'appareil permet de numériser l'environnement en marchant à vitesse normale dans le bâtiment et assure donc un rendement nettement supérieur aux scanners laser statiques. Le Zeb-Revo offre ainsi une excellente rentabilité tout en maintenant une précision centimétrique et peu de post-traitements en bureau.



Figure 1 : Ensemble du système du Zeb-Revo

Il s'agit toutefois d'une technologie récente qui est donc fortement observée et discutée. Après six mois d'utilisation, Parera a souhaité avoir une analyse sur les retours d'expérience des techniciens et sur les possibles utilisations de ces nuages de points pour éventuellement réaliser aussi des maquettes numériques. Ayant réalisé mon stage de 4^{ème} année chez Parera durant l'été 2017, j'avais pu contribuer à la mise en place la première méthodologie de terrain, ce qui m'a permis d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement de l'appareil. C'est ce qui a conduit Parera à me proposer ce PFE pour leur permettre d'avoir un état des lieux de ce qui avait été fait et d'entrevoir les possibilités futures.



Figure 2 : Tête du scanner laser

2. Objectifs du PFE

La problématique de ce PFE est double. Il s'agit en premier lieu de capitaliser l'expérience de Parera sur le Zeb-Revo pour en tirer les principales améliorations. J'ai aussi travaillé sur l'utilisation combinée d'un scanner laser statique et du Zeb-Revo, ainsi que sur l'influence de divers paramètres afin d'optimiser l'utilisation de ce dernier.

La seconde partie du PFE concerne les maquettes numériques et le BIM tel que construit. Parera réalisant de nombreux relevés de bâtiments et de gestion patrimoniale, un très grand nombre de plans 2D sont réalisés et sont faits à la main en digitalisant des orthophotos à partir des coupes de nuages de points. La production de dessins reste assez fastidieuse et demande des dessinateurs expérimentés pour être productive. Ce faisant, le nuage de points n'est pas pleinement utilisé mais

possède pourtant des atouts certains. L'entreprise étant déjà équipée de Revit, il s'agit là de trouver un logiciel complémentaire à ce dernier permettant d'utiliser le nuage de points et d'optimiser le dessin avec des outils automatiques ou semi-automatiques.

3. Analyse et résultats des tests du Zeb-Revo

De par sa mobilité, le Zeb-Revo nécessite une méthodologie de terrain particulière et très différente de celle des scanners statiques. Les premiers bâtiments relevés après l'achat de l'appareil ont montré quelques déformations telles que des murs qui ne se superposent pas d'un étage à un autre, des décalages et des déformations angulaires. Il s'avère qu'avec l'expérience et des modifications de la méthodologie initiale, ces déformations ont cessé, confirmant la forte influence de la méthodologie sur la qualité du nuage de points. Afin de quantifier cette influence, j'ai procédé à l'analyse des rapports de recalage des nuages de points au sein de plusieurs bâtiments d'un même genre, disposant d'une architecture complexe car anciens. Il s'agit des magasins des Galeries Lafayette qui ont été relevés durant la deuxième partie de l'année 2017. Pour les derniers magasins relevés, la nouvelle méthodologie de terrain avait été appliquée et c'est ce qui a rendu possible la comparaison entre l'ancienne et la nouvelle méthodologie.

Il ressort de cette analyse que la méthodologie influe pour 19% sur la qualité de recalage des nuages de points. Cela représente une hausse conséquente au vu de la précision du Zeb-Revo. Parmi les facteurs d'influence se trouve l'orientation de la tête du scanner laser, ceci joue un rôle important du fait que l'algorithme SLAM repose sur la détection d'objets (figure 3). Ce n'est toutefois pas le seul facteur d'influence. En effet, l'architecture des lieux, simple ou complexe, est également une source de difficultés comme dans le cas d'anciens bâtiments (Galeries Lafayette). Ainsi, en comparant des collèges (géométrie et architecture simple) et les magasins, tous deux relevés avec la nouvelle méthodologie, on observe un gain supplémentaire en qualité de recalage en faveur des collèges (figure 4).

	EMQ (mm) ancien procédé	EMQ (mm) nouveau procédé	
Magasin1	30,1	Magasin6	26,7
Magasin2	30,5	Magasin7	27,0
Magasin3	30,8	Magasin8	27,0
Magasin4	31,0	Magasin9	26,2
Magasin5	32,3	Magasin10	23,0
Moyenne	31,0	Moyenne	26,0

Figure 3 : Emq de recalage des nuages de points selon la méthode de levé

	Différence d'EMQ (mm)	Gain en précision de recalage
Collège/Ancien	-6,5	26%
Collège/Nouveau	-1,5	6%
Ancien/Nouveau	-5,0	19%

Figure 4 : Emq de recalage des nuages de points selon la méthode et la géométrie des lieux

Ces premières constatations ont conditionné les tests réalisés par la suite. J'ai en effet cherché à démontrer l'effet de la méthodologie de terrain sur le rendu final des nuages de points. Le premier test aura été de quantifier l'influence de l'orientation du scanner laser. Ce test montrera qu'il s'agit en effet d'un paramètre très important tant lors de l'analyse des nuages de points de la qualité de l'algorithme SLAM que lors de la comparaison nuage-nuage entre un nuage de points de référence pris au scanner statique et celui du Zeb-Revo. La vitesse de marche et le multi-passage n'influent que peu sur la qualité du recalage. Cependant, ils ont des effets sur la densité du nuage de points, sur la présence de doublons ainsi que sur le bruit. Dans le but de densifier le nuage de points, il ressort de ces deux derniers tests, qu'il vaut mieux marcher plus lentement en ne réalisant qu'une seule boucle plutôt que de faire de multiples passages dans une même pièce.

Par la suite, j'ai cherché à valider la précision donnée par les constructeurs en comparant un grand nombre de cotes de contrôle prises sur le terrain aux mêmes cotes dans le nuage de points. Ce

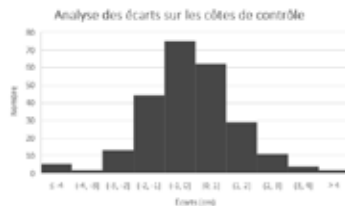


Figure 5 : Répartition des écarts selon leur nombre

test aura permis de mettre en évidence que 95% des écarts sont entre 0 et 3 cm avec une emq de 2,7 cm (ellipse de confiance de $p=6\sigma$). Ce qui permet de valider la précision relative de l'appareil qui est de 2-3 cm.

Afin de déterminer la taille minimale des objets pouvant être repérés par le Zeb-Revo, j'ai numérisé une série de cubes de tailles différentes en vue de les modéliser par maillage et par primitives géométriques pour en tirer des statistiques sur les dimensions des cubes et la capacité à les modéliser. Ceci aura permis de remarquer que seuls les objets de taille plus importante que 5 cm pourront être vus et modélisés, ceci correspondant globalement à un niveau de détail LOD200 pour les maquettes numériques.

Mes derniers tests ont concerné la combinaison de données issues de scanners statiques et du Zeb-Revo. Il s'agit là d'une des principales attentes de Parera. En effet, l'objectif serait de réaliser des acquisitions au Zeb-Revo avec une association ponctuelle du scanner statique principalement en extérieur. Il s'avère que le Zeb-Revo est beaucoup moins précis en extérieur qu'en intérieur. Une étude nuage-nuage montre une emq de 5,9 cm en extérieur contre 1,6 cm en intérieur. Afin de palier à cette baisse de précision du Zeb-Revo en extérieur, l'association des deux types de scanner laser revêt donc un fort intérêt. Pour ce qui est de l'étude nuage-nuage en intérieur, les deux types de données se recalent facilement et avec qualité tant que le recouvrement est suffisant.

4. De la 2D à la 3D : la maquette numérique

Dans cette deuxième partie, j'ai cherché à mettre en valeur les données acquises au Zeb-Revo. En effet, à ce jour, celles-ci sont utilisées essentiellement pour réaliser des plans 2D à partir d'orthoimages et non des maquettes numériques. L'objectif était donc de proposer une solution logicielle permettant d'associer Revit à un plug-in extérieur en vue d'automatiser autant que possible la production de maquettes numériques et de documents liés (plans).

Dans cette optique, j'ai pu tester deux logiciels différents venant s'intégrer à Revit : PointSense for Revit et PointCab for Revit. Les deux logiciels ont été testés sur un même jeu de données qui correspond à une piscine relevée pour un client de Parera en combinant scanner statique et dynamique. Je leur ai attribué une note en fonction de leurs performances (voir figure 6) sur les critères suivants : interface, service client, manipulation des nuages de points, construction architecturale, MEP, escaliers, portes/fenêtres et poutres. Le prix des logiciels fut également pris en compte dans les études économiques mais non intégrés à la note finale.

Notes logiciels /20	Focus 3D	Zeb-Revo
PointSense	13,3	9,2
PointCab	15,8	14,2

Figure 6 : Attribution des notes aux logiciels

Le premier logiciel testé, PointCab, présente de nombreux avantages comme son entière compatibilité avec le Zeb-Revo, sa rapidité à importer les nuages de points (qui ne sont donc pas à insérer dans Revit), une meilleure qualité d'ortho-images comparé aux autres logiciels avec les mêmes paramètres et enfin sa simplicité d'utilisation. De plus, il faut savoir que ce logiciel est indépendant des constructeurs d'appareils, il permet donc d'utiliser toute sorte de données quel que soit le mode d'acquisition (statique ou dynamique) et quel que soit la marque de l'appareil. Il possède également un panel de fonctions permettant le traitement de nuages de points de scanners statiques (du recalage jusqu'à la modélisation 3D via des vues planaires). L'une des dernières nouveautés est la possibilité de reconnaître automatiquement des sphères dans les nuages de points du Zeb-Revo et de pouvoir donc proposer un recalage automatique de ces données. Toutefois, il ne dispose pas de module MEP ni d'outil de contrôle de la maquette et son service client est onéreux.

Le second logiciel, PointSense s'accompagne d'un outil appelé Virtusurv. Ces logiciels étant des produits de Faro, ils sont principalement pensés pour l'utilisation de scanners lasers statiques et principalement de Faro. Et à la différence de PointSense, Virtusurv est entièrement incompatible avec le Zeb-Revo en plus de nécessiter un temps non négligeable pour l'import des fichiers. Certains outils sont toutefois intégrés à Revit et permettent donc de lier le nuage de points dans Revit et de modéliser sur cette base. Malheureusement, la gestion des nuages de points par Revit est mauvaise. Cela rend la plupart des opérations difficiles et fastidieuses en plus de demander un temps conséquent à l'importation du fichier. En revanche, cette suite logicielle présente de nombreux atouts pour les scanners statiques, dont un outil MEP et un puissant outil de comparaison nuage de points/maquette.

Pour le traitement de nuages de points issus du Zeb-Revo, PointCab for Revit permet un gain de 24% en production par rapport à PointSense. C'est en effet le logiciel qui permet d'utiliser aussi bien les données issues de scanners statiques que dynamiques. Ceci sans certains inconvénients de PointSense, tout en apportant davantage de flexibilité et de possibilités de modélisations pour le Zeb-Revo. Pour des numérisations au scanner statique, les deux logiciels semblent équivalents et présentent tous deux des avantages propres. PointCab est toutefois un peu plus cher que PointSense mais la différence de prix (249€) est rapidement compensée par la hausse de productivité au bout d'une vingtaine de plans d'étage. La solution logicielle retenue et proposée est donc PointCab for Revit.

5. Etude économique

Afin de déterminer les retombées économiques de la solution retenue, j'ai analysé la production actuelle et théorique.

- 1- **Le Zeb-Revo**, de par sa mobilité et son logiciel dédié (Geoslam Desktop), permet une diminution du temps d'acquisition et de traitement de 70% en moyenne par rapport à une acquisition au scanner statique. Ce net gain de temps permet à lui seul d'importantes économies pour Parera.
- 2- **PointCab for Revit** permet de créer une maquette en 15h (visible en figure 7). Les documents liés ont engendré un surplus de 15h pour le contrôle des plans (temps maximal). Au final, le gain reste important comparé au dessin manuel des plans 2D qui nécessite 120h. Le passage à la 3D permet de réduire les temps de production de plans d'environ 75% tout en produisant une maquette numérique.
- 3- **La rentabilité de la solution** est également élevée. En effet, les gains sont proportionnels au nombre de plans dessinés par rapport au dessin manuel des plans. En théorie, l'achat d'une licence permet d'économiser 13405€ et ce dès la 1^{ère} année sur la base de la production actuelle. Si cette production augmente de 75% grâce à la maquette numérique dès le début, ce sont 37100€ d'économies qui peuvent être réalisées. PointCab for Revit permet donc un gain de temps et d'économies conséquent.

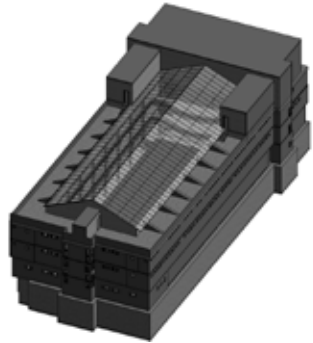


Figure 7 : Maquette obtenue avec PointCab

6. Conclusion et perspectives

Nous avons donc vu que le Zeb-Revo, bien que récent, est un appareil fiable et tenant ses promesses de rentabilité. Il faut toutefois veiller à ce que la méthodologie de terrain soit respectée, sinon cela peut mener à des déformations conséquentes du nuage de points.

PointCab remporte les tests de comparaison pour la modélisation au Zeb-Revo grâce à de nombreux atouts, un investissement rentable, une forte polyvalence et peu d'inconvénients. Son alliance avec le Zeb-Revo permet d'obtenir des résultats tout à fait respectables. Nous pouvons alors modéliser des bâtiments au LOD200 avec une précision centimétrique

Ce PFE aura permis de mettre en évidence le fort potentiel du Zeb-Revo. C'est un outil à suivre de près, notamment avec ses nouvelles mises à jour dont le Zeb-Revo RT. Celui-ci réduit encore plus les temps de traitements tout en apportant des moyens de contrôle en temps réel sur le terrain. Du côté logiciel, de nombreux progrès sont encore à faire car peu de solutions sont compatibles avec les scanners laser dynamiques qui pourtant, représentent potentiellement le futur de la profession.

Convergence BIM-SIG ; Une maquette des références pour les permis de construire numériques

PFE présenté par : **Marion KANNENGIESSER**
Société d'accueil : **INSER SA**
Directeur de PFE : **Jean-Luc MISEREZ**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



1. Introduction

Actuellement, le domaine de l'architecture, l'ingénierie et la construction (AEC en anglais) connaît de nombreux bouleversements notamment par l'introduction du *Building Information Modeling* (BIM) au sein de nombreux projets d'architecture. Le BIM, se définissant comme un moyen de collaborer à tous les niveaux d'un projet de construction, s'annonce comme un outil pouvant simplifier le traitement de procédures actuellement non numériques et chronophages dans les administrations.

Depuis 2015, le Canton de Genève procède à des travaux de dématérialisation dans l'optique de simplifier le processus de vérifications des demandes d'autorisations de construire à l'Office des Autorisations de Construire (OAC). Ce projet d'intégration du BIM au sein de l'administration s'appuie notamment sur le projet de loi PL 12145 adopté en janvier 2018 par le secrétariat du Grand Conseil.

2. Contexte

Ce Projet de Fin d'Etudes (PFE) a été initié par la Direction de l'information du territoire du Canton de Genève (DIT) et s'est déroulé dans le « service SIG » (Système d'Information Géographique) de la société anonyme INSER. Cette dernière est dotée d'une expertise dans les domaines tels que les infrastructures, de l'environnement, de la gestion du territoire et de la mensuration.

Le Canton de Genève dispose d'un large éventail de données 2D, 3D et 4D qui couvrent de nombreuses thématiques. La DIT gère la saisie, la gestion, la mise à jour ainsi que la diffusion des données liées à la mensuration du territoire. Aujourd'hui, la DIT est le coordinateur du groupe de travail de la charte 3Dok qui est une charte d'éthique de la 3D initiée en 2008. Cette dernière vise à assurer une utilisation des données 3D de manière déontologique et fiable.

De nos jours, il n'existe aucune maquette de référence pour les données de la Mensuration Officielle. Ce PFE s'inscrit dans le projet d'introduction de l'architecture BIM au sein du Système d'Information du Territoire à Genève (SITG). Cet organisme est basé sur un réseau de partenaires publics qui permet une centralisation des données du territoire avec un partage entre les différents acteurs du réseau et le public via le site web du SITG. La plupart des géodonnées sont accessibles en *Open Source*, gratuitement sur le géoportail.

Aujourd'hui, le système d'information de l'Office des Autorisations de Construire est en pleine évolution dans le but d'informatiser les procédures de demande de permis, et notamment de donner la possibilité de travailler sur des maquettes numériques tridimensionnelles. Le BIM, couplé au SITG, permettrait une automatisation de certaines étapes du processus de délivrance des permis et une amélioration globale de celui-ci. Le projet de loi, PL 12145, allant dans ce sens a été déposé en juin 2017 et adopté en janvier 2018 avec l'attribution d'un tiers du budget au chantier BIM.

Le but de ce travail est de créer une maquette des références contenant les informations nécessaires à l'architecte pour construire son projet en respectant notamment les Restrictions de Droit public à la Propriété Privée Foncière (RDPPF). Le fichier obtenu doit fournir un gabarit à charger dans un logiciel BIM et intégrer toutes les données nécessaires pour des procédures de demandes d'autorisations. La maquette serait donc prête à l'emploi.

Ce PFE est conduit en parallèle de celui de F. Blanc--Contet, étudiant à l'Ecole Supérieure des Géomètres Topographes (ESGT) et stagiaire chez MBC-Ingéo. Son rôle est de créer le catalogue des objets standards à intégrer dans la maquette.

3. Objectifs

Les attentes de la DIT pour ce projet ont conduit tout d'abord à se pencher sur la chaîne de traitement à mettre en place. Celle-ci est présentée sur la figure 1 et met en évidence l'interaction des PFE.

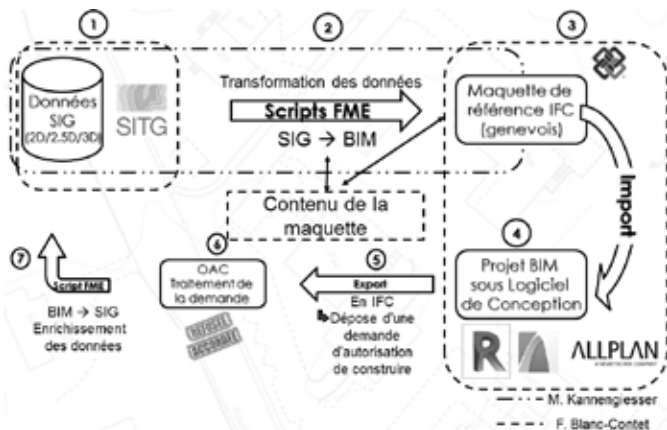


Figure 1 : Chaîne de traitement (Blanc-Contet F., 2018)

Une méthodologie a été mise en place en amont de l'étude et de la manipulation des données. Une équipe de suivi a été composée afin de mener à bien les différentes étapes et les premières réflexions ont permis de dégager les enjeux suivants à considérer avant la réalisation du prototype :

- Définir les données à traiter et qui seront intégrées dans la maquette, leur potentiel de valorisation et leur dimension, c'est-à-dire dans quelle mesure elles seront fournies.
- Définir quelles sont les données modélisables en 3D, notamment les éléments surfaciques et linéaires.
- Intégrer des familles d'objets qui contiennent les données et leurs attributs.
- Évaluer les formats disponibles dans le géoextracteur du SITG et voir s'il n'en existe pas de mieux adaptés.
- Déterminer les formats dans lesquels seront disponibles les données et les logiciels qui serviront aux tests du prototype.

La problématique essentielle de ce PFE consiste à la transformation des données issues du SITG en données au format *Industry Foundation Classes* (IFC) issu du *STandard for Exchange of Product* (STEP) et développé par BuildingSMART. Dans le cadre de ce travail, nous utilisons l'IFC2x3 qui semble être le plus opérationnel et privilégié par la plupart des intervenants du domaine de la construction.

4. BIM, SIG, Géoinformation

Le terme BIM apparaît pour la première fois en 1986. En 1996, un consortium international, aujourd'hui connu sous le nom de BuildingSMART, crée le standard d'échange informatique IFC. Il faudra attendre le début des années 2000 avant que le terme BIM ne se popularise. Le BIM est généralement utilisé pour représenter un projet de bâtiment en 3D ainsi que toutes ses composantes. Cette modélisation est en quelque sorte le jumeau numérique du bâtiment qui va évoluer en fonction des modifications apportées par les différents intervenants. Les données intégrées au sein du modèle peuvent couvrir les dimensions allant de la 2D à la 7D. Cette dernière correspondant au modèle tel que construit et contenant toutes les informations nécessaires à la vie du bâtiment après la fin des travaux. À l'échelle du territoire, les SIG, largement utilisés actuellement, sont des outils permettant de représenter des données regroupées la plupart du temps au sein de bases de données (BD). Ils

permettent une visualisation graphique de ces dernières et sont couramment employés dans les administrations.

Actuellement, les *Smart cities* ou villes intelligentes se développent et ont pour principaux objectifs de concilier les aspects sociaux, environnementaux et culturels, de répondre à l'urbanisation croissante, aux besoins de transport et mobilité, et de faire du citoyen un pilier central de la ville. Ce principe consiste à intégrer les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NITC) au sein des villes pour créer des structures durables impliquant acteurs publics et privés. Récemment, le SITG a redéfini sa stratégie pour aller dans le sens des *Smart Cities* et c'est dans cette optique que ce projet a été mis en place par l'Etat de Genève. Ceci conduit d'une part à faire interagir les SIG et le BIM, et d'autre part, à créer un modèle commun regroupant des informations provenant de différentes professions. Il est courant de parler d'interopérabilité mais également de *City Information Modelling*, ou CIM, qui consiste à faire converger les SIG et le BIM afin de produire des modèles à plus grande échelle que le bâtiment. Le passage du BIM vers le SIG a déjà été étudié et mis en pratique au cours des dernières années. Il s'agit actuellement de trouver quels standards sont appropriés pour résoudre les difficultés d'interactions entre les deux systèmes.

5. Inventaire des données et outils

La plupart des données sont disponibles en 2D et nécessitent d'être transformées en 3D grâce aux attributs de hauteur et d'altitude renseignés à cet effet. Grâce au Géoextracteur du site du SITG, il est possible d'obtenir des données sous un certain nombre de formats. Celui utilisé pour ce travail fut en majeure partie le *.gdb correspondant aux géo-bases de données.

Le choix du format IFC pour le partage des données semblait être une évidence du fait de son statut de standard. Le logiciel Revit d'Autodesk est choisi comme premier logiciel de test pour l'ouverture des IFC produits, tout en gardant à l'esprit l'adaptation future aux autres logiciels du marché. L'Etat ne peut effectivement pas obliger les utilisateurs à ne se servir que d'un logiciel et de son format propriétaire. La transformation des données est rendue possible via le logiciel FME de Safe Software. Il s'agit d'un moyen d'extraire, de transformer et de charger des données en passant d'un format à un autre et donc d'un procédé permettant la résolution des problèmes d'interopérabilité.

Avant d'intégrer des données au format IFC dans Revit, il est nécessaire de procéder à des visualisations dans un Viewer afin de confirmer le bon déroulement de l'exportation. BIMVision s'avère intéressant car il permet facilement et rapidement de manipuler certaines informations, mais aussi d'effectuer des mesures de distances permettant le contrôle et la validation du modèle créé.

6. Grands axes de l'étude

De la hiérarchie complexe ainsi que de la structure des données IFC, il découle un bon nombre de problématiques à considérer afin de garantir la qualité et la cohérence des fichiers obtenus en fin de traitement.

Il faut définir quelles données sont modélisables en 3D et comment les transcrire dans le format IFC. Ainsi, il s'agit notamment de définir en volumétrie les parcelles, les servitudes et autres objets surfaciques rencontrés. Pour certaines couches de données il faut faire face au manque d'attributs de hauteur et de profondeur permettant la transformation en donnée 3D, et donc évaluer des dimensions standards. Le défi majeur de ce prototype est d'intégrer un certain nombre d'éléments qui ne sont actuellement pas pris en charge par l'IFC et qui sortent des frontières habituelles du BIM.

La maquette obtenue doit être représentative des contraintes environnantes tout en restant épurée. Le but n'est pas de créer une simple copie du SIG en format IFC. La solution est de connecter les SIG par le biais de leurs identifiants fédéraux uniques.

Il a été choisi de travailler sur deux zones distinctes l'une au cœur de Genève, du fait des nombreux projets en cours et du caractère urbain. La seconde zone, moins urbanisée, se situe à Veyrier et permet de travailler avec des limites de forêt, de cours d'eau, des bâtiments existants et projetés.

7. Résultats et perspectives

Plusieurs problèmes concernent les propriétés à faire figurer pour chaque objet. Le *mapping* entre Revit et le fichier IFC est compliqué car il est possible de ranger les objets Revit dans les classes IFC mais l'inverse est quasi impossible. Chaque famille est destinée à recevoir des objets affectés à une même utilisation, de même que pour les classes IFC.

Les multiples essais ont démontré la complexité liée au traitement des géométries des objets afin d'avoir un résultat cohérent dans Revit. En effet, il est indispensable d'analyser les géométries, de procéder à de nombreux ajustements et corrections pour satisfaire les exigences du logiciel.

Divers objets non considérés comme prioritaires ont été étudiés dans le but de voir comment se comportent les classes telles que *l'IfcProxy* et *l'IfcBuildingElementProxy*. *l'IfcProxy* est un conteneur de tout type d'objets ne faisant pas partie du modèle IFC tandis que *l'IfcBuildingElementProxy* est la classe qui accueille tous les éléments d'un bâtiment qui n'ont pas de classe propre. Pour respecter la définition des classes IFC, la majorité des données à intégrer à la maquette sont envoyées dans *l'IfcProxy*. Les éléments de cette classe sont visibles dans les *viewers* mais ne sont pas retranscrits dans Revit. Son utilisation engendre une perte d'informations et n'est donc pas une solution viable. Pour éliminer les contraintes dues à l'utilisation de *l'IfcProxy* pour la plupart des données, il pourrait être créé un IFC Genevois, l'IFC-G. Cette solution nécessite l'implication de développeurs spécialisés dans les IFC voire un partenariat avec BuildingSMART directement puisque son statut de standard nécessite un respect de la normalisation ISO.

L'aspect visuel et l'esthétisme de la maquette est au cœur des expérimentations puisqu'une maquette épurée facilite la compréhension. L'attribution de couleurs et l'affichage des lignes de triangulation restent problématiques et alourdissent la maquette. Le processus de coloration des éléments est contraignant et n'a pas conduit à des résultats satisfaisants sur toutes les données.

8. Conclusion

Le BIM, bien que présent depuis le début des années 2000, reste encore jeune et peu de projets peuvent se vanter d'avoir été réalisés entièrement en BIM et se doter du statut « Full-BIM ». Le format IFC n'a pas encore atteint une maturité suffisante et est amené à beaucoup évoluer dans le futur. Sa prochaine version l'IFC5 intégrera des classes liées à l'infrastructure et peut-être plus tard apparaîtront des classes adaptées à l'environnement dans lequel s'implante un bâtiment. De plus, la plupart des logiciels dédiés au BIM ne semblent pas gérer toutes les possibilités offertes par ce format et restreignent ses capacités par un manque de compatibilité. Actuellement les soucis concernent la géométrie qui ne s'importe pas toujours correctement dans Revit et nécessite de la contrôler minutieusement.

Toutes les possibilités offertes par les IFC n'ont pas été explorées mais il a été mis en évidence la grande complexité d'un tel projet. Le travail doit être approfondi en ce qui concerne l'attribution de paramètres IFC et le *mapping* des éléments dans une classe IFC adaptée. Plus de 800 classes et sous-classes existent pour obtenir une donnée riche et une représentation exacte. Cependant, peu d'entre elles sont rendues accessibles par FME et nous ne trouvons pas encore le moyen de les intégrer.

La transformation des données 2D en 3D est une étape pour l'instant chronophage dans le processus. En parallèle du développement de la maquette BIM, il faudrait impliquer les autres partenaires du SITG afin qu'ils fournissent des données plus facilement transformables en 3D donc plus complètes. Une autre solution serait de demander des données directement en 3D qui génèrent, comme pour les bâtiments projets, beaucoup moins de manipulations. Le passage vers la 3D nécessite l'intervention des politiques afin d'adapter les règles et normes et permettre de cadrer son utilisation. Ces règles doivent fournir des standards pour créer une base 3D complète permettant d'intégrer efficacement les données dans le BIM et assurer l'exactitude de celles-ci.

La plupart des projets sont au stade de prototypes et dans des phases d'expérimentation. Il est nécessaire de continuer et d'encourager le développement des projets full-BIM qui représentent l'avenir dans le domaine de l'AEC. Les travaux sur l'interopérabilité et les IFC deviennent les moteurs de ce changement de paradigme institué par l'introduction du BIM. Pour Genève et L'OAC, il s'agit d'explorer de nouvelles pistes allant dans le sens de la dématérialisation des procédures grâce aux SIG, à la 3D et peut-être à terme au BIM.

Développement d'un dispositif de mesures topographiques automatiques nadirales



PFE présenté par : **Xavier-Pierre ROSSI**
Société d'accueil : **Itmsol**
Directeur de PFE : **Mohamed BOUCHTAT**
Correcteurs : **Jacques LEDIG**



1. Introduction

Depuis le courant de l'année 2016, le plus gros chantier d'Europe en matière de transports en commun a vu le jour à Paris. Il s'agit d'un métro, en rocade, tout autour de Paris. De nouvelles lignes qui desserviront des quartiers de banlieue mal reliés entre eux et permettront les développements économiques et immobiliers de ces mêmes banlieues. Le pari pouvait paraître un peu fou mais après quelques années, le Grand Paris Express s'est imposé comme le projet phare de transports en commun qui doit façonner la métropole parisienne de demain.

Ce projet de fin d'étude a vu le jour car actuellement, il n'existe pas de dispositifs topographiques permettant de mesurer des points à l'intérieur d'un puit. Pour ausculter un puit, les techniques les plus utilisées sont l'emploi de chaîne inclinométrique ou de tiltmètre. La société Itmsol a décidé de développer un système permettant d'ausculter des puits de 15 à 50 mètres de profondeur ayant un diamètre de 9 à 16 mètres. Dans un premier temps, cela leur permettra de disposer d'une palette d'outils plus larges pour ausculter un ouvrage, puis, cela offre en plus de la compétitivité grâce à la différenciation vis-à-vis de ses concurrents.

Traditionnellement, lors des auscultations de puits, nous observons la convergence au sein de celui-ci. Les mesures sont réalisées depuis l'intérieur du puit. La position de la station d'observation évolue continuellement au fur et à mesure que l'ouvrage prend forme. La station est descendue par paliers successifs au cours du terrassement. De plus les cibles sont constamment ré-orientées afin d'être visibles depuis la nouvelle position de la centrale. Cela peut introduire des erreurs non négligeables dans l'observation des convergences.

Pour contourner ce problème, il a alors été question de réaliser ces mesures depuis l'extérieur du puit. Or en utilisant un théodolite classique, nous ne pouvons observer que la partie la plus haute du puit. Il a donc fallu trouver une solution qui puisse permettre de viser les puits dans leur totalité. La première idée consistait à utiliser des théodolites à l'envers pour diminuer la zone d'ombre. Or, au cours de ce test, les moteurs de l'appareil ont cessé de fonctionner après seulement quatre heures de test. Le poids de l'appareil a trop usé les moteurs. La seconde idée consistait à placer un miroir au-dessus du théodolite pour simuler la position du théodolite. Des tests ont été réalisés au bureau et ont permis la rédaction du cahier des charges ci-dessous.

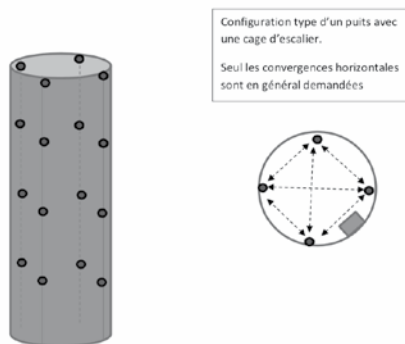


Figure 1 : Position des prismes à l'intérieur d'un puit

Au cours de ce projet de fin d'étude, j'ai eu l'occasion de réfléchir sur des problématiques qui sortent des sentiers battus en termes de topographie. En effet, ce projet est un mélange hétéroclite entre de l'optique, de la topographie mais aussi sur les déformations des matériaux.

2. Développement de plusieurs prototypes

Lors de mon arrivée au sein de l'entreprise, une ébauche du projet m'a été présentée. Le projet consistait à disposer un miroir au-dessus du théodolite et d'essayer de viser à travers celui-ci. Nous avons dans un premier temps approfondi cette solution avant d'envisager une seconde option. Nous avons alors exploré ces deux pistes en parallèle avant de sélectionner la solution qui permettait d'offrir le maximum de satisfaction. Dans cette partie, nous allons détailler les deux moyens que nous avons envisagés, le premier prototype appelé "Miroir fixe" et un second prototype appelé "Lunette nadirale".

Un des points importants à prendre en compte est le fait qu'il n'est pas nécessaire de rattacher les résultats obtenus dans un système de coordonnées défini. Il nous suffit de fournir les déplacements de chacun des prismes afin de déterminer des mesures de convergences.

2.1 Miroir Fixe

Cette solution est à l'origine de ce projet, elle consiste comme son nom l'indique à disposer un miroir fixe au-dessus du théodolite, lui-même étant situé au-dessus ou à proximité des puits. Le miroir serait intégré dans le casque de protection du théodolite. Avec ce procédé, nous pourrions mettre au point deux types de mesures. Premièrement des visées directes, c'est à dire que le théodolite viserait certains prismes de manière traditionnelle. Ces cibles seraient typiquement les références ou les prismes situés en haut du puit. Le second type de visée utilisé est ce que nous appelons ici, des visées indirectes car le prisme serait observé à travers le miroir. Ces mesures ne seraient pas la position réelle du prisme mais son reflet à travers le miroir. Le miroir permet de simuler une position de théodolite que nous n'arrivons à mettre en œuvre.

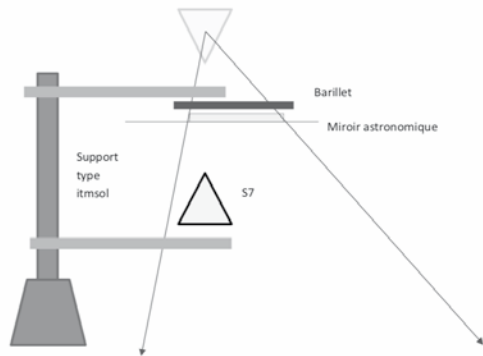


Figure 2 : Position du miroir cas n°1

Le miroir permet de simuler une position de théodolite que nous n'arrivons à mettre en œuvre.

Puisque le miroir est fixe par rapport au théodolite, si celui-ci venait à bouger à cause des vibrations ou autres sur le terrain. Les résultats ne devraient pas en être affectés. Une fois le système opérationnel, le théodolite effectuerait des cycles d'observations en combinant les deux types de mesures. Il serait même envisageable de faire en sorte que certains prismes soient visés de manière directe et indirecte. Cela permettrait d'ailleurs d'obtenir la totalité des observations dans le même système par transformations de coordonnées même si cela n'est pas impératif, ni impératif.

Pour concevoir un prototype optimal, nous avons listé la totalité des paramètres intervenants dans le système. Ils sont nombreux. Nous les avons donc répartis dans plusieurs catégories :

- les paramètres fixes
- les paramètres variables
- les paramètres dépendant du système.

Dans un premier temps nous avons réalisé des simulations en utilisant des modèles mathématiques afin d'optimiser chacun des paramètres intervenants dans le système et ainsi trouver un moyen de mettre en œuvre le système facilement peu importe la taille et la profondeur du puits à ausculter.

2.2 Lunette nadirale

Cette deuxième option consiste à utiliser un miroir à 45° par rapport à l'axe de visé pour dévier le faisceau laser de 90°. La position du miroir dépend du point visé et sera déterminée par construction mécanique. Cela implique qu'il sera possible de viser à l'intérieur et à l'extérieur du puit en utilisant un seul miroir qui s'adapte à n'importe quelle situation.

Ce prototype présente bien des avantages sur le papier mais en revanche il ne sera plus possible de réaliser un double retournement car la lunette ne permettra de voir que d'un seul cercle. Nous pouvons nous affranchir de cette correction car nous ne fournissons à nos clients que la variation des mesures. Ces mesures peuvent être entachées d'une erreur pour vu que celle-ci soit constante au court du temps et donc négligeable.

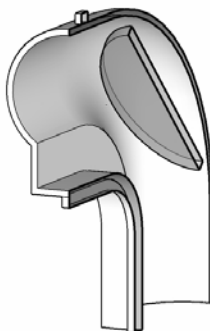


Figure 3 : Coupe de la lunette

Là aussi, afin de concevoir un prototype nous permettant de répondre au mieux à nos attentes, nous avons repris les mêmes catégories pour classifier chacun des paramètres du système selon trois catégories :

- les paramètres fixes
- les paramètres variables
- les paramètres dépendant du système.

A partir de ces différents paramètres, nous avons pu réaliser plusieurs simulations et voir l'impact de chacun des paramètres sur le système. Pour la première version du prototype, nous avons sélectionné plusieurs paramètres en fonction des résultats des simulations.

Un des points les plus importants dont il a fallu tenir compte dans cette solution, est qu'il a fallu modifier le logiciel d'acquisition afin d'empêcher certains cas de figure de se produire tel que les doubles retournements ou encore la prise de mesures entre 105 et 295 grades car le support du miroir se heurterait au théodolite.

3. Conception du prototype

Après avoir étudié chacune des deux solutions, nous avons choisi de nous concentrer sur l'élaboration d'un seul prototype. Nous avons sélectionné le second projet nommé « Lunette nadirale ». Ce choix a été motivé par le fait que cette solution nous offre une plus grande souplesse dans son utilisation et sa mise en œuvre sur chantier même si certaines contraintes existent tout de même.

La figure n°3 n'est qu'une ébauche pour donner suite à notre réflexion. Nous avons réfléchi à plusieurs contraintes tels que le poids du système qui pourrait user les moteurs de façon plus importante que prévue, le type de matériaux utilisé car celui-ci ne doit pas se déformer lors des changements de température. Nous avons aussi réfléchi à l'emplacement des fixations de la lunette sur le théodolite. Après avoir longuement réfléchi à ces problématiques, nous avons souhaité faire appel aux dessinateurs industriels présents dans les locaux de notre maison mère Spie Batignolles Fondations. Pour ce faire, nous leur avons présenté notre problématique, ensuite nous leurs avons montré le matériel dont nous disposions à savoir des miroirs de 5 cm de diamètre et un théodolite robotisé (TRIMBLE S7). Pour finir, nous leur avons présenté les pistes que nous avons explorées pour répondre à nos attentes.

En tenant compte de ces différents éléments, ils nous ont conseillé et fait part de leur expérience dans ce domaine, expérience dont nous manquions cruellement car aucun de nous n'a les compétences pour concevoir un tel support. Lorsque leur réflexion fut aboutie, ils nous ont présenté un support dessiné sous le logiciel CATYA. A partir de ce dessin, nous avons pu lancer la fabrication du premier prototype.

4. Validation de la conception

Afin de valider le choix de la qualité du miroir, nous avons comparé les résultats obtenus avec deux miroirs. Il s'agissait des mêmes miroirs, seule la qualité de surface variait. Pour cela nous avons acquis des observations pendant plusieurs heures avec chacun des miroirs. Ensuite nous avons calculé les précisions des mesures selon trois critères (la distance, l'angle horizontal et l'angle vertical). Nous avons aussi observé un prisme sans passer par l'intermédiaire d'un miroir pour calculer nous-mêmes la précision de l'appareil.

Lorsque les tests portant sur les miroirs furent terminés et que nous avons reçu notre premier prototype, nous avons décidé de le tester au bureau sur des distances relativement courtes de 2 à 10 mètres. Une fois cette étape terminée, nous avons procédé à des mesures réalisées sur des sites pouvant recréer les conditions que nous rencontrerons sur chantier afin de valider définitivement la conception du prototype.

Avant de sortir le produit sur chantier, nous avons aussi réfléchi à certaines modifications que nous devons apporter au casque de protection ainsi qu'au mat qui viendront soutenir l'ensemble du système.

5. Conclusion & Perspectives

Au cours de ce projet, nous avons développé un outil permettant de réaliser des mesures topographiques nadirales de précision. Cet outil nous permet de répondre à la problématique qui a vu le jour dans le cadre des auscultations des travaux souterrains du Grand-Paris. Lorsque nous comparons la précision des mesures topographiques classiques avec les mesures réalisées par le biais de ce système nous ne remarquons de différences.

Ce projet m'a permis de confirmer mes connaissances acquises au cours de ma formation, de découvrir ou redécouvrir certains domaines de compétences tels que l'optique, la mécanique ou la programmation. Le tout avec une totale liberté dans les décisions à prendre pour mener à bien ce projet. J'ai aussi pu faire appel à des spécialistes qui m'ont conseillé et aidé à avancer.

Cependant, ce projet n'est pas terminé et plusieurs pistes peuvent être explorées pour améliorer et essayer de simplifier la mise en place et l'automatisation des mesures. De plus les protections du miroir peuvent être repensées pour limiter les agressions venues de l'environnement du chantier à la surface du miroir.

Pour finir, un paramètre à contrôler est l'usure possible des moteurs due à un poids plus important que ce que le constructeur avait prévu. Au cours des essais, nous n'avons pas remarqué de problème majeur, mais une révision plus fréquente des théodolites est envisagée pour surveiller et prévenir les éventuels problèmes.

Mise en place d'un SIG pour le Syndicat Mixte Moselle Aval

PFE présenté par : **Célia BRESSON**
Société d'accueil : *Syndicat Mixte Moselle Aval*
Directeurs de PFE : *Mme. Marianne PERRIN & M. Joël STROZYNA*
Correcteurs : *M. Mathieu KOEHL & M. Jacques LEDIG*



1. Contexte

Parmi les événements climatiques extrêmes, les inondations sont dans leurs conséquences les plus destructeurs pour la population mondiale. Ce phénomène se traduit par une submersion d'une portion d'un territoire normalement hors d'eau. Les dommages provoqués par les inondations sont considérables : les impacts sont à la fois sociaux, économiques, politiques et fonciers.

La fin de l'année 2017 ainsi que le début de l'année 2018 ont été marqués par de fortes précipitations, en France mais pas uniquement : l'Europe centrale a été largement touchée. Ces faits marquants ne sont pas nouveaux, mais semblent reproduisent de plus en plus fréquemment. La récente étude de [Alfieri et al., 2018] annonce que le risque d'inondations est amené à plus que doubler en Europe dans les années à venir en raison du dérèglement climatique. Cette hypothèse est pourtant la plus optimiste parmi celles évoquées par les climatologues.

Pour y faire face, la directive européenne 2007/60/CE, dite « directive inondation », a été adoptée en 2007. Relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, celle-ci est transposée en droit français quelques années plus tard par les textes suivants :

- L'article 221 de la Loi d'Engagement National pour l'Environnement dite « LENE » du 12 juillet 2010.
- Le décret n° 2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.

Localement, à l'échelle du bassin versant, cette politique se décline en Stratégie Locale de Gestion des Risques d'Inondation (SLGRI). La SLGRI Moselle Aval a été approuvée par arrêté le 18 septembre 2017. L'émergence du Syndicat Mixte Moselle Aval, créé par arrêté préfectoral le 14 décembre 2017, s'inscrit dans la volonté de faire émerger une structure porteuse à échelle adaptée pour l'animation et la mise en œuvre de cette SLGRI. Quatre grands objectifs ont été ainsi fixés :

- Le développement d'une gouvernance adaptée au risque à l'échelle du bassin versant ;
- L'amélioration de la connaissance fine à l'échelle du bassin ;
- L'amélioration de l'alerte et de la gestion de crise ;
- La prise en compte du risque inondation dans l'urbanisme.

Ainsi, le syndicat souhaite porter la proposition et la rédaction d'un Programme d'Actions et de Prévention des Inondations (PAPI), outil de mise en œuvre d'une SLGRI par excellence.

À ce jour, douze Établissements Public de Coopération Intercommunale (EPCI) et la région Grand Est sont membres du Syndicat. Le département de la Meurthe-et-Moselle devrait prochainement les rejoindre.

2. Objectifs et enjeux du projet

Le Syndicat Mixte Moselle Aval est une organisation récente. C'est dans ce contexte de développement que le Président du syndicat, M. STROZYNA, géomètre-expert diplômé de l'INSA Strasbourg et vice-président au sein de Metz Métropole, a souhaité proposer un PFE dont le sujet serait la mise en place d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) pour le Syndicat.

L'objectif majeur du projet est de consolider l'ensemble des données utiles à la bonne réalisation des missions du Syndicat. La gestion efficace d'un volume important d'informations géographiques et non géographiques passe par leur regroupement, leur tri, leur homogénéisation et leur organisation. La mise en place d'un SIG pour le Syndicat Mixte Moselle Aval a aussi pour but de fournir une vision cartographique de l'ensemble du bassin concerné.

En plus d'être un outil pour le fonctionnement interne du Syndicat, le SIG aura une composante externe pour le partage de certaines informations à différents niveaux : membres, services de l'État, partenaires, ou encore population concernée et grand public à terme.

3. Méthodologie

Il est possible de considérer cinq étapes comme fondamentales dans la mise en place d'un SIG comme l'illustre la figure 1. Ces phases préalables sont indispensables pour l'aboutissement d'un système cohérent, et ce, indépendamment de sa thématique.



Figure 1 : les 5 étapes fondamentales de la mise en place d'un SIG (Région Bretagne / C. Menguy - Géomatique appliquée à l'Environnement SCOP SARL Avant-Premières®, 2012)

3.1. Définition des objectifs

L'ensemble de la procédure est rendue difficile compte tenu du contexte particulier du Syndicat. Suite à une procédure de recrutement menée durant le mois d'avril, une équipe opérationnelle a été constituée et se compose à compter du 1^{er} juillet de trois chargés de missions spécialisés dans la gestion intégrée du risque inondation. La définition des contours de l'outil à mettre en place se fait en étroite relation avec l'équipe, mais avec l'appui de la Directrice en charge de la gouvernance. Ainsi, l'analyse des besoins a évolué à plusieurs reprises afin de répondre aux attentes de chacun.

Dans la situation idéale, les choix concernant les aspects matériels et logiciels sont effectués suite à l'analyse des besoins. Cela est délicat dans une structure en plein développement. Ainsi, les moyens matériels utilisés ne sont que temporaires et ne sont pas forcément les plus optimisés. En ce qui concerne le volet logiciel, un partenariat a été passé avec la société Esri. Le logiciel utilisé dans le cadre du projet est ArcGIS Desktop.

3.2. Inventaire des données existantes

Les données, quelle que soit leur nature, constituent les éléments fondamentaux dans un SIG. Comme le rappelle [Koehl, 2017], l'étape la plus longue lors de la mise en place d'un SIG réside dans l'acquisition de celles-ci. Dans le cadre de ce projet, la plupart des données nécessaires existent déjà mais sont réparties entre de nombreux acteurs à la fois publics et privés. Pour les recenser, un catalogue a été élaboré. Cet inventaire n'est pas figé et a pour vocation d'être évolutif.

Ce travail a permis de faire un constat regrettable concernant les métadonnées associées aux jeux de données existants. En effet, elles ne sont que rarement renseignées et lorsqu'elles le sont, celles-ci sont souvent complétées de façon partielle. Dans ces situations, il est difficile de se faire une idée sur leur qualité.

Cet inventaire permet également d'estimer les besoins nécessaires quant au choix d'une solution de stockage (disque dur, serveur, etc.). Le dimensionnement de cette dernière dépend du volume des données à stocker et constitue par conséquent un enjeu important. Alors que les données disponibles dans des formats vecteurs ne sont généralement pas encombrantes en termes de stockage, celles sous forme de rasters ou de Modèle Numérique de Terrain (MNT) sont bien plus volumineuses.

3.3. Définition de l'espace et du temps

Le périmètre d'action du syndicat s'étend sur plusieurs départements : la Moselle, la Meurthe-et-Moselle et la Meuse, situés dans un espace frontalier. Le cours d'eau principal du bassin versant, la Moselle, est une rivière transfrontalière dont le linéaire français représente environ 300 kilomètres sur un total de 520. C'est d'ailleurs sur cette rivière qu'est situé le tripoint Allemagne/France/Luxembourg. Cette diversité des espaces multiplie les interlocuteurs et les problématiques qui en découlent.

L'évolution de la donnée dans le temps constitue également une problématique importante à considérer. En effet, il est légitime de se questionner par rapport à la qualité de la donnée après plusieurs mises à jour notamment.

3.4. Choix d'un référentiel

Il existe à ce jour deux jeux de données principaux en termes d'hydrographie sur le territoire français, diffusés par l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) :

- La BD Carthage ® (Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère chargé de l'environnement). Produite à partir des données cartographiques de la BD CARTO ® de l'IGN par les Agences de l'eau, cette base de données n'est plus mise à jour depuis la dernière version datant de 2013.
- Le thème Hydrographie de la BD TOPO ®, composante topographique du Référentiel à Grande Echelle (RGE).

Cependant, bien qu'ils soient diffusés tous deux par l'IGN, ces deux référentiels ne sont pas totalement équivalents comme le montre le tableau 1.

	BD Carthage ®	BD TOPO ® Hydrographie
Précision (d'après la base de production associée)	Décamétrique	Métrique
Longueur du réseau hydrographique	Environ 510 000 km	Environ 800 000 km
Avantages	Logique métier (codification, zones hydrographiques...)	Exhaustivité

Tableau 1 : Comparaison rapide des deux bases de données principales relatives à l'hydrographie diffusées par l'IGN

Plus précise et complète, le thème hydrographie de la BD TOPO ® manque cependant d'une réelle logique métier par rapport au domaine de l'eau. Le choix d'un référentiel n'est donc pas évident.

Par ailleurs, dans une instruction rendue publique le 3 juin 2015, le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDEE) a demandé aux services de l'État de réaliser une cartographie des cours d'eau, selon une nouvelle définition, dont l'objectif à terme est de couvrir la totalité du territoire métropolitain. Cependant, les travaux n'avancent pas à la même vitesse dans tous les départements et ces nouveaux jeux de données ne sont donc pas encore exploitables dans leur globalité.

3.5. Structuration et création de la base de données

Plusieurs possibilités sont envisageables en ce qui concerne la structuration de la base de données. La phase de réflexion qui la précède est essentielle afin d'éviter au maximum des déplacements de fichiers qui pourraient rompre par la suite les chemins d'accès dans le logiciel utilisé. Dans de nombreux SIG, on retrouve une organisation principale très fonctionnelle qui divise les données produites des données « brutes », utilisées comme références.

Les sous-niveaux de l'arborescence apparaissant comme les plus pertinents dans le cadre de ce projet sont les suivants :

- Thématique : hydrographie, hydrométrie, ouvrage de protection, etc.
- Zone géographique : sous bassins-versants, bassins-versants, cours d'eau principal, etc.

D'autres alternatives sont néanmoins concevables : type de données, temporalité, etc. En fonction de la décomposition en sous-niveaux, ces propositions peuvent donc être utilisées selon différentes dispositions.

Enfin, afin de mettre en place une organisation durable et efficace des données, il faut apporter une attention particulière à la nomenclature des noms de fichiers. Un plan de classement des fichiers est également réalisé dans une optique de Gestion Électronique des Documents (GED). Les déploiements d'un SIG d'une part, et d'une GED d'autre part, sont des procédés complémentaires.

4. Création d'un portail en ligne

Le Syndicat Mixte Moselle Aval est une structure réalisant une mission de service public. Ainsi, la diffusion de certaines informations consolidées et intégrées dans la base de données du système mis en place apparaît comme essentielle.

Pour mener à bien ce projet, le service évolutif d'ArcGIS Online proposé par Esri a été choisi. ArcGIS Online est basé sur l'utilisation d'une monnaie virtuelle : les crédits. Ceux-ci sont consommés, entre autres, pour le stockage des données et la réalisation d'analyses, telles que du géocodage ou encore des calculs d'itinéraires. Il faut donc veiller à sélectionner avec soin les données diffusées qui doivent être correctement préparées en amont, et ce afin d'optimiser au mieux la gestion des crédits.

Cette solution permet d'aller plus loin que le visionnage de cartes partagées sur la plateforme. Parmi les nombreuses fonctionnalités proposées, l'intégration d'applications principalement destinées aux chargés de missions lors de leurs travaux sur le terrain apparaît comme très intéressante.

5. Conclusions et perspectives

La mise en place d'un SIG est un processus complexe. Pour assurer la réussite du projet, surtout dans ces conditions particulières de création de structure, il convient de poser des fondations solides.

Le système doit être souple et simple d'utilisation, en interne d'une part pour permettre aux chargés de missions de s'en servir comme d'un réel outil pour atteindre leurs objectifs, et en externe d'autre part comme un outil de communication.

Le SIG déployé concerne le domaine de l'eau et plus particulièrement les thématiques liées aux inondations et à la gestion des milieux aquatiques. Les législations en vigueur font intervenir de différents acteurs dans ce milieu, d'autant plus nombreux que l'emprise géographique du périmètre d'action du Syndicat est importante.

En ce qui concerne les jeux de données existants, des problématiques d'actualisation, d'exhaustivité et d'homogénéité sont rencontrées. Il apparaît judicieux de sensibiliser les différents interlocuteurs participant à la production et aux échanges de ces données quant à l'importance des métadonnées notamment. Le développement de groupes de travail regroupant les responsables géomatiques est fortement souhaitable dans une optique d'efficacité pour l'ensemble des organisations dans lesquelles ils travaillent.

L'arrivée des chargés de missions apporte une nouvelle dimension à l'étude car cela implique de considérer des nouveaux besoins en plus de ceux déjà définis avec la Directrice et le Président du Syndicat initialement. L'outil mis en place leur étant destiné, il doit évoluer en fonction de leurs attentes.

L'environnement dans lequel est réalisé ce PFE est très formateur. En plus des travaux scientifiques, les activités menées, à la fois administratives et juridiques, ont permis de mobiliser des compétences transverses.

Références : Alfieri, L.; Dottori, F.; Betts, R.; Salamon, P.; Feyen, L. Multi-Model Projections of River Flood Risk in Europe under Global Warming. *Climate* 2018, 6, 6.

Koehl, M., 2017 Cours de SIG. Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Spécialité Topographie.

Région Bretagne, Menguy, C., Géomatique appliquée à l'Environnement SCOP SARL Avant-Premières®, 2012. Guide d'aide à la structuration, la création et la gestion des données géolocalisées dans le cadre d'actions en faveur du remailage bocager. Document publié en décembre 2012.

Automatisation du traitement de données « Mobile Mapping » : extraction d'éléments linéaires et ponctuels

PFE présenté par : **Loïc ELSHOLZ**
Société d'accueil : **FUTURMAP DATA**
Directeur de PFE : **Florent MICHELS**
Corretrice : **Tania LANDES**



1. Introduction, contexte et objectifs du projet

La société FUTURMAP, jeune entreprise spécialisée dans le domaine du traitement de données géographiques, souhaite améliorer ses rendements de production dans le domaine du « Mobile Mapping », secteur connaissant actuellement une considérable croissance.

Le terme usuel « Mobile Mapping », Cartographie Mobile ou Scanner Dynamique en français, se rapporte au procédé de l'acquisition de données géographiques à partir d'un véhicule mobile équipé de différents systèmes de télédétection.

Dans notre étude, nous nous intéressons principalement à des systèmes terrestres composés de scanners laser et d'appareils photographiques, ce type d'appareillage étant la source principale des données traitées par la société en vue de la réalisation de plans.

Ces systèmes permettant d'acquérir d'énormes quantités de données en peu de temps (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de levé en une journée), il est crucial de mettre en œuvre des méthodes toujours plus innovantes afin de répondre rapidement et à faible coût aux demandes des clients, tout en assurant la qualité du produit final.

S'il existe plusieurs logiciels propriétaires permettant, en fonction du système d'acquisition, le traitement partiel des données, il est néanmoins essentiel pour une société telle que FUTURMAP, ayant affaire à différentes sources de données dans le cadre d'une production de masse, de développer ses propres méthodes de traitement afin de s'affranchir du type de système utilisé et d'obtenir ainsi une chaîne de production généralisée.

Ainsi, la présente étude, réalisée au sein de la cellule de Recherche et Développement de la société, vise à automatiser les procédés de traitement de données de type Mobile Mapping en vue de l'amélioration des rendements de production, quel que soit le système utilisé. De manière plus précise, nous nous intéressons particulièrement à l'extraction et au dessin automatique d'éléments linéaires et ponctuels afin de réaliser cet objectif global.

2. Extraction et dessin automatique d'éléments linéaires

Dans la plupart des plans réalisés par la société, la majeure partie du travail réside dans le dessin des éléments linéaires (bordures, murs, marquages au sol). Ainsi, il peut être particulièrement intéressant pour la production d'obtenir une ébauche des éléments linéaires d'un projet de manière automatique.

Dans cette optique, nous proposons une méthode permettant, à partir de nuages de points issus des systèmes Mobile Mapping, d'extraire et de dessiner automatiquement une partie des éléments linéaires afin d'obtenir un canevas au format .dwg.

Le logiciel libre de système d'information géographique SAGA GIS étant déjà utilisé pour la production des ortho-images servant de base aux dessinateurs pour la réalisation des plans, celui-ci a également été retenu pour les traitements d'images nécessaires à l'extraction des linéaires.

2.1. Bordures

Pour les bordures, nous utilisons principalement les données de classification du nuage (effectuée au préalable automatiquement selon une routine développée l'an passé au cours du Projet de Fin d'Etudes de Marine FORRLER) afin d'extraire la majorité des points appartenant aux catégories voulues.

Ainsi, nous isolons deux classes : la première correspondant aux bordures et pieds de murs, la deuxième concernant les autres éléments situés entre le sol et une hauteur de 2m.

Les ensembles de points extraits sont ensuite convertis en grilles (ortho-images), traitées a posteriori par des processus de morphologie mathématique de manière à obtenir des linéaires homogènes.

Afin d'éliminer les lignes correspondant aux pieds de murs dans la première grille et ainsi isoler les bordures, nous utilisons la deuxième grille en tant que masque.

En effet, la deuxième grille contenant les éléments situés entre le sol et une hauteur de 2m, celle-ci contient nécessairement les murs. Il suffit alors de soustraire les deux grilles afin d'obtenir finalement exclusivement les bordures.

La grille restante est ensuite vectorisée via un algorithme de squelettisation (*Skeletonization*), et nous obtenons alors un modèle au format .shp.

Celui-ci est par la suite converti au format .dxf, puis simplifié, nettoyé et complété sous AutoCAD à l'aide d'une routine automatique, afin d'obtenir finalement un dessin des bordures exploitable.

Le modèle ainsi créé contient une très large partie des bordures, avec des écarts par rapport au nuage de l'ordre de 5 cm dans les cas défavorables (courbes p. ex.), ainsi que de rares lignes erronées que l'opérateur devra éliminer manuellement, notamment dans le cadre d'une végétation dense, où la classification des nuages s'avère parfois inexacte.

Figure 1 : dessin automatique de bordures (en blanc)
Résultat final après nettoyage automatique



2.2. Marquage au sol

Dans le cas de la signalisation horizontale, nous nous basons sur un seuillage de l'intensité ou sur des méthodes de segmentation en utilisant les ortho-images d'intensité issues du nuage (p. ex. ISODATA).

La vectorisation est ensuite réalisée à l'aide de morphologie mathématique et d'un algorithme de squelettisation, puis nous utilisons également une routine automatique sous AutoCAD afin d'obtenir un modèle directement exploitable.

L'extraction et le dessin du marquage au sol n'est cependant utile que dans le cadre de projets particuliers (levés autoroutiers p. ex.).

3. Extraction et dessin automatique d'éléments ponctuels

Le tracé des éléments ponctuels (regards, plaques, coffrets, mobilier urbain etc.) constitue la deuxième partie essentielle du travail des dessinateurs, et suscite par ailleurs la majorité des retours clients, pour cause d'oublis ou d'erreurs de nature.

Nous proposons ainsi une méthode permettant d'obtenir automatiquement le tracé d'une partie des éléments ponctuels du dessin.

3.1. Extraction des ponctuels

Afin d'extraire les éléments ponctuels, l'apprentissage automatique (*Machine Learning*), et plus précisément l'apprentissage profond (*Deep Learning*), a rapidement été considéré comme la méthode la plus adaptée.

En effet, il est particulièrement difficile d'extraire des objets aux caractéristiques très variables (forme, couleur dans le cas de détection sur photographie, intensité dans le cas des ortho-images issues de nuage de points) avec des techniques traditionnelles de traitement d'image.

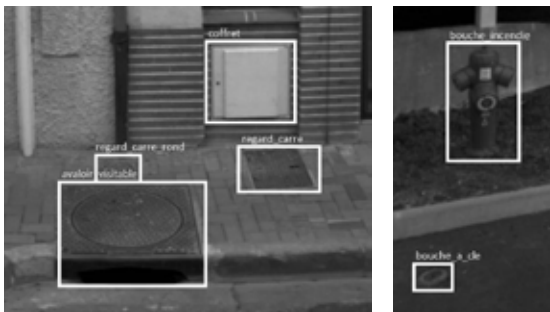
Après avoir étudié et testé certains des algorithmes d'apprentissage profond disponibles en open-source, le détecteur YOLO (You Only Look Once) a été retenu pour son excellent compromis entre rapidité et précision, ainsi que pour sa relative accessibilité.

Il s'agit d'un système basé sur les Réseaux de Neurones Convolutifs (*Convolutional Neural Networks, CNN*), technologie en remarquable évolution depuis ces dix dernières années, et étant actuellement à la source des algorithmes les plus performants dans de nombreux domaines de l'intelligence artificielle, notamment en vision par ordinateur.

Après plusieurs tests avec des bases de données restreintes, le choix s'est porté sur la détection des ponctuels sur photographies au détriment des ortho-images, dont les caractéristiques sont trop variables (intensité, densité) et au sein desquelles certains objets sont peu différenciables (regards, plaques) ou invisibles (coffrets, bouches à clé dans le cas d'une densité faible).

L'algorithme a été entraîné sur une base de données photographique créée au cours de l'étude, contenant plus de 17400 occurrences d'objets appartenant à 18 classes prédéfinies.

La validation a par la suite été effectuée sur un jeu de données indépendant contenant près de 1000 occurrences d'objets, et l'algorithme a prouvé son efficacité en affichant une précision¹ et un rappel² (recall) de l'ordre de 70%.



Figures 2 et 3 : détection d'objets via l'algorithme d'apprentissage profond YOLO

3.2. Dessin des ponctuels

Afin d'obtenir les coordonnées tridimensionnelles de l'objet à partir des coordonnées-images obtenues via l'algorithme YOLO, la méthode suivante a été développée :

- Au moyen des équations de colinéarité (cf. photogrammétrie générale) et des données issues du système Mobile Mapping, il est possible de calculer l'équation tridimensionnelle de la droite reliant le centre de projection de la caméra au point 3D recherché, sans toutefois connaître la distance entre le centre de projection et ce point.
- Nous résolvons ensuite le problème lié à cette inconnue en utilisant le nuage de points : nous recherchons l'intersection entre la droite calculée et le nuage, et nous obtenons dès lors les coordonnées 3D du point considéré.

La précision du tracé dépend alors principalement de la précision de la détection de YOLO, du calage des photographies et de la qualité de l'orientation interne des caméras, ainsi que du calage et de la densité du nuage de points pour le calcul d'intersection.

Nous obtenons finalement des écarts très variables entre la position dans le nuage et la position calculée de l'objet, pouvant aller jusqu'à 50cm dans les cas les plus défavorables.

Cette faible précision est très largement améliorée grâce à l'importante redondance dans la détection : les systèmes de cartographie mobile disposent généralement d'au moins quatre caméras, dont la fréquence de prise de vue permet d'observer le même objet à plusieurs reprises, et les levés sont le plus souvent réalisés en aller-retour, accroissant encore l'abondance d'observations.

Ainsi, nous observons en moyenne les objets sur 6 photographies différentes, ce chiffre étant bien entendu dépendant de l'emplacement usuel de l'objet aux alentours de la voirie (plus l'objet en est éloigné, moins nous obtiendrons d'occurrences de celui-ci).

Nous regroupons alors les observations identiques à l'aide d'un algorithme de partitionnement (l'algorithme classique *Mean Shift Clustering* est utilisé), puis nous effectuons un ajustement par les moindres carrés afin d'obtenir la position la plus probable de l'objet.

Nous observons finalement des écarts moyens entre la position de l'objet dans le nuage et la position calculée de l'ordre de 8 cm. En l'état, ce processus de dessin automatique ne pourra donc être utilisé que dans le cadre de plans n'exigeant pas une précision élevée, tels que les Plans de Corps de Rue Simplifiés (PCRS).

¹Précision_i = $\frac{\text{nb d'objets correctement attribués à la classe } i}{\text{nb d'objets attribués à la classe } i}$

²Rappel_i = $\frac{\text{nb d'objets correctement attribués à la classe } i}{\text{nb d'objets appartenant à la classe } i}$

Avec l'évolution des algorithmes d'apprentissage profond, des systèmes Mobile Mapping, et l'amélioration de la méthode par l'utilisation des techniques de stéréophotographie multi-vue par exemple, il sera possible d'obtenir des résultats nettement plus favorables, et ainsi d'utiliser cette méthode dans le cadre de projets exigeant une précision plus élevée.

4. Processus de contrôle via projection sur photographies

Avant la réalisation de la présente étude, un assistant qualité effectuait le contrôle des plans sur deux écrans en comparant les éléments dessinés avec les objets présents sur les photographies, ou utilisait en parallèle, en fonction du système d'acquisition, un logiciel propriétaire, occasionnant des va-et-vient laborieux.

Une méthode a dès lors été développée afin de contrôler les livrables directement sur les photographies, en y projetant les éléments du plan. Nous utilisons pour cela les équations de colinéarité ainsi que les données issues des systèmes Mobile Mapping, afin de transformer les coordonnées 3D des objets du plan en coordonnées-images.

Dans le cas de systèmes fournissant des photographies panoramiques (p. ex. système LadyBug), d'autres formules de projection, présentes dans la littérature spécialisée, sont à utiliser.

Afin d'obtenir une précision intéressante pour le contrôle ($< \sim 10$ pixels), il est crucial de modéliser les distorsions des lentilles des caméras.

Les éléments du plan sont dès lors projetés automatiquement sur les photographies, et l'assistant qualité fait simplement défiler celles-ci en contrôlant l'exhaustivité ainsi que l'emplacement approximatif des objets à même les images, optimisant le temps ainsi que la qualité du contrôle.



Figure 4 : projection automatique d'objets du plan sur photographie

En blanc : éléments linéaires
En noir : éléments ponctuels

5. Système de contrôle automatique des ponctuels

Il s'agit, à partir de l'extraction des éléments ponctuels via apprentissage automatique (cf. §3), de contrôler l'exhaustivité des livrables automatiquement. Cette méthode est destinée à l'ensemble des projets où le dessin automatique des ponctuels est à proscrire en raison d'une précision élevée exigée par le client.

De manière succincte, nous utilisons les procédés d'extraction et de dessin automatiques des ponctuels déjà développés, et comparons finalement le résultat obtenu avec les plans réalisés par les dessinateurs.

Un indice de confiance est calculé en fonction notamment de la redondance des détections, et l'assistant qualité se contente alors de contrôler les ponctuels dont la probabilité d'erreur sur la nature ou d'oubli est élevée.

Ce système ne sera néanmoins réellement intéressant que lorsque l'intégralité des objets sera détectée par l'algorithme, ce qui n'est pas encore le cas : malgré la redondance dans la détection, les objets de petite taille (bouches à clé notamment) ou étrangers à la base de données (type de plaque, coffret, ou mobilier urbain atypique p. ex.) sont souvent oubliés par l'algorithme.

L'utilisation d'une base de données plus large, ainsi que l'entraînement de l'algorithme à une résolution photographique supérieure pourront cependant certainement pallier ces difficultés.

6. Conclusion

Dans le cadre de cette étude concernant l'automatisation des procédés de traitement de données de type Mobile Mapping, plusieurs axes de recherche ont été développés, améliorant et optimisant les rendements de production. Il est ainsi possible d'obtenir de manière automatique un plan contenant une partie des éléments linéaires et ponctuels, d'effectuer un contrôle optimisé du tracé, voire même semi-automatique dans le cas des éléments ponctuels, et ce quel que soit le système d'acquisition utilisé.

Avec l'évolution des systèmes de levé, des algorithmes et des bases de données, l'avènement de la technologie du blockchain associée à l'apprentissage automatique ainsi qu'en s'intéressant à des procédés opérant directement au sein des nuages de points, il est assurément possible d'améliorer encore largement les processus de traitement et de se rapprocher finalement de réalisations exclusivement automatiques.

Perfectionnement de la procédure de calibration des systèmes LiDAR pour drones de l'entreprise YellowScan

PFE présenté par : **Kyn-Do LU**
 Société d'accueil : **YellowScan**
 Directeur de PFE : **Julien BERNARD**
 Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte et objectifs du projet

Le marché du levé LiDAR en France et à l'international a connu un regain de croissance avec l'arrivée récente des drones. Basée à proximité de Montpellier, la société YellowScan a été fondée dans le but de répondre à la forte demande qui en a émergé. Son équipe développe et vend des solutions LiDAR à monter sur drone prêtes à l'emploi et simples d'utilisation, pour la réalisation de projets aussi divers que le relevé d'infrastructures linéaires, de sites archéologiques ou encore de zones forestières.

Ces solutions sont composées principalement de trois éléments : un scanner laser, un système de positionnement ainsi qu'un système de navigation inertielle (INS/IMU). Plusieurs qualités de produits sont proposées : la densité de points, la portée ou encore la précision est alors différente en fonction de la solution.

Une fois le système entier monté dans les locaux de production, il n'est pas encore opérationnel. Il suffira d'effectuer des acquisitions avec plusieurs lignes de vol pour repérer des décalages significatifs dans le nuage de points final. Afin d'obtenir des données cohérentes avec le système, celui-ci doit être calibré en prenant en compte ses paramètres de montage ou « paramètres de calibration » correspondant aux biais d'alignement (bras de levier et biais angulaires) entre les composants principaux (Fig. 2).

Ces paramètres sont déterminés principalement par l'intermédiaire d'un vol de calibration : une acquisition avec le système monté sur drone est réalisée sur un terrain de calibration comportant des cibles ainsi qu'un nombre important de pentes. Le traitement post-acquisition sur Terrasolid, applicatif fonctionnant sous Microstation, fournit alors les valeurs de calibration.



Figure 1: Système LiDAR « YellowScan Surveyor »

Ce Projet de Fin d'Etudes a pour objectif d'optimiser la procédure actuelle permettant la détermination de ces paramètres de calibration en termes de temps et de lourdeur d'exécution. L'étude s'est tournée vers les points suivants :

- l'amélioration du test de validation du scanner,
- l'amélioration de la méthode de détermination des paramètres de calibration.

Les expérimentations concernent particulièrement la calibration du système « Surveyor », le module le plus vendu par YellowScan. Ce dernier est composé principalement d'un scanner laser multi-faisceaux Velodyne Puck VLP-16, ainsi que d'une solution GNSS/IMU Applanix APX-15.

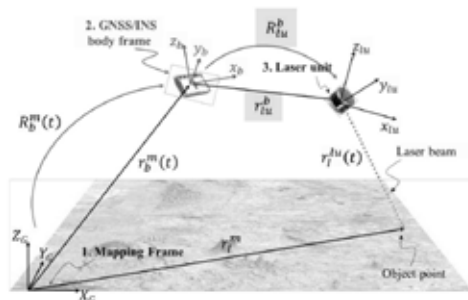
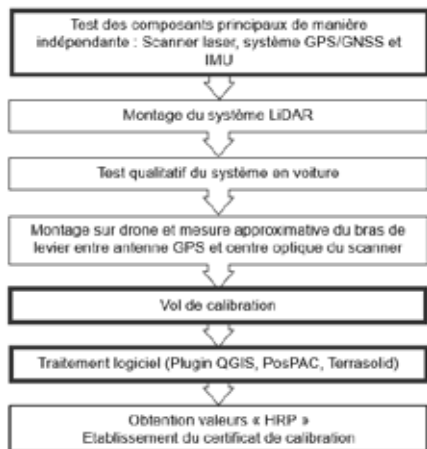


Figure 2: Transformations impliquées dans le géoréférencement d'un point levé par système LiDAR aéroporté (Ravi et al., 2018)

2. Procédure de calibration initiale



La partie la plus importante de la procédure actuelle de calibration chez YellowScan se situe à partir du montage du système LiDAR sur drone jusqu'au vol suivi d'un traitement sur logiciel. Cependant certaines étapes sont également à prendre en compte, car elles influencent directement la qualité des résultats finaux, notamment celle du test des composants et celle du test qualitatif en voiture.

Les étapes pour lesquelles des améliorations ont été recherchées durant ce projet apparaissent en encadré. Pour ce qui relève du test composant, l'accent a été mis sur l'étude du capteur LiDAR Velodyne Puck VLP-16. En ce qui concerne le vol de calibration, une nouvelle méthode est proposée. Les solutions validées pourront ensuite être adaptées aux autres systèmes développés par YellowScan.

Figure 3 : Procédure de calibration des systèmes LiDAR chez YellowScan

3. Contrôle du scanner laser

3.1. Le capteur Velodyne Puck VLP-16

Le système Puck VLP-16 de Velodyne est un scanner laser 16 faisceaux à impulsions, pouvant scanner à 360°, couramment employé pour des applications de robotique, de véhicules autonomes, des applications industrielles nécessitant une détection 3D ou encore des applications de levés mobiles en dynamique, notamment avec les drones aériens grâce à sa compacité. Sa technologie double-écho en fait une solution efficace pour la réalisation de levés sous couvert végétal.

Vitesse d'acquisition	~300 000 pts/sec
Champ de vision	Horizontal 360°
	Vertical 30° (+15° à -15°)
Résolution angulaire	Horizontale De 0.1° à 0.4°
	Verticale 2°
Exactitude des mesures de distance	± 3 cm
Vitesse de rotation	5 à 20 Hz
Retours en intensité	0 - 255
Portée	100 m



Figure 4 : Capteur Puck VLP-16 multi-faisceaux de Velodyne

Tableau 1 : Spécifications techniques du capteur Velodyne VLP-16 (VLP-16 User's Manual and Programming Guide, 2015)

3.2. Procédure de test employée

L'étude s'est tout d'abord tournée vers l'élaboration d'une procédure de test plus avancée pour les scanners laser des systèmes LiDAR proposés par YellowScan, en particulier pour le scanner Puck VLP-16. Il est déjà arrivé que des défauts du scanner soient détectés seulement en phase de vol, une fois le système déjà monté. Cette procédure de test servira alors, à l'aide de critères de qualité, à valider ou non la viabilité d'un scanner réceptionné avant montage.

Pour le moment, une simple procédure de visualisation des données sur logiciel, peu rigoureuse, est employée pour la vérification du scanner. La nouvelle procédure consiste en l'acquisition d'un nuage de points d'une surface plane comme un mur ou une planche, dont la verticalité aura préalablement été vérifiée. Le scanner doit être monté sur trépied à l'aide d'une embase à vis calantes, assurant également la verticalité du capteur.

Un programme codé en Python a été développé durant ce projet afin de calculer automatiquement, à partir des acquisitions sur la surface plane, les données caractéristiques du scanner : la résolution horizontale et verticale, la précision et l'exactitude des mesures de distance, ainsi que les retours en intensité.

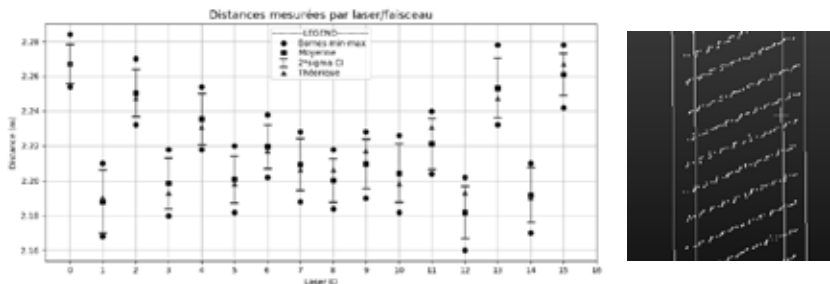


Figure 5 : Exemple de graphique obtenu en sortie du programme Python et visuel de la surface levée par scanner

La matière et la couleur de la surface levée avec le scanner induisent différentes altérations sur les données. D'une part, les cibles réfléchissantes sont responsables d'un bruit plus important dans le nuage de points pour les scanners de Velodyne. D'autre part, pour les surfaces de couleur blanche ou induisant un retour en intensité proche de 100, des écarts sur les mesures de distance de l'ordre du centimètre entachent les données. Le choix a donc été fait pour cette procédure de réaliser les levés sur des surfaces provoquant des retours en intensité inférieurs à 100.

Les caractéristiques des scanners à tester ont été définies. Des acquisitions suivant la procédure ont été réalisées avec 11 unités Puck VLP-16, et ont permis de valider celle-ci. Le temps consacré au test n'a pas été réduit, cependant celui-ci est maintenant plus exhaustif. Une amélioration des performances du scanner Puck VLP-16, grâce à une calibration intrinsèque en distance, est en cours d'étude.

4. Procédure du vol de calibration

L'exécution actuelle des étapes du vol de calibration et du traitement post-vol est chronophage. Le plan de vol pour la calibration des systèmes nécessite un temps d'exécution qui peut éventuellement être réduit avec une nouvelle méthode. De plus, pour un nombre significatif de systèmes, le traitement post-vol nécessite plusieurs reprises, bien souvent à cause de la configuration du terrain de calibration, sur laquelle l'équipe YellowScan a peu de maîtrise. Ses ingénieurs souhaitent optimiser le temps passé à calibrer les systèmes LiDAR, autant pour la partie exécution que pour la partie traitement, en limitant au mieux ces contraintes opérationnelles.

Des méthodes de calibration en vol sont parues récemment dans la presse scientifique, utilisant des systèmes quasi identiques au système Surveyor de YellowScan. Les travaux de Ravi et al. (2018) ont tout particulièrement suscité notre intérêt. Des cibles réfléchissantes de différentes natures sont réparties de manière homogène sur un terrain plat. D'autres cibles en bois en pente et comportant des arêtes sont placées sur toute la longueur du terrain, parallèlement et perpendiculairement aux directions des lignes de vol. Les façades d'un bâtiment en marge du terrain sont également levées en complément. Les lignes de vol sont parallèles, parcourues dans un sens puis dans le sens opposé, à une vitesse moyenne de 1,5 m/s et une hauteur de 15 m puis 25 m au-dessus du sol. Une telle configuration permet selon les tests réalisés dans cette étude d'obtenir aisément un ajustement, et ainsi, des valeurs pour les paramètres de montage de bonne qualité.

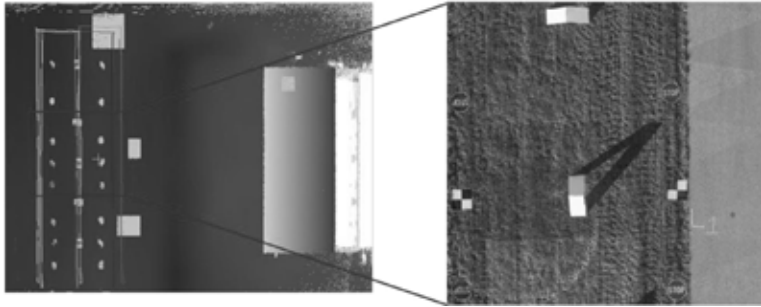


Figure 6 : Structures mises en place pour le vol de calibration dans les travaux de Ravi et al. (2018)

Nous nous sommes procuré des panneaux de signalisation de classe 2 (réfléchissants), de la peinture réfléchissante ainsi que des planches en bois afin de pouvoir adapter cette procédure avec les systèmes de YellowScan. Les avantages en cas de validation sont multiples :

- les cibles sont structurellement connues et permettent davantage de contrôles, ce qui devrait faciliter le traitement post-vol sur logiciel (contrairement aux pentes terrestres du terrain de calibration utilisé actuellement, quelque peu irrégulières)
- le placement des cibles est modifiable à souhait, permettra de tester différentes configurations et de définir la plus optimale : celle permettant d'obtenir de bons résultats avec le moins de temps de traitement possible
- la méthode est amovible et adaptable en termes de taille, ce qui réduit la contrainte géographique, et ne nécessite que peu de moyens matériels. Elle pourra éventuellement faire l'objet d'une exportation auprès des distributeurs YellowScan à l'international pour des procédures de « health check » des systèmes



Figure 7: Nuage de point sur cible plane obtenu avant et après calibration (Ravi et al., 2018)

L'application expérimentale de cette procédure de vol, au moment où sont rédigées ces lignes, est en cours d'exécution.

5. Conclusions et perspectives

Les améliorations sur la procédure de calibration du système « Surveyor » ont été apportées principalement au sein de deux étapes : le test du scanner ainsi que le vol de calibration. Le test du scanner, plus complet, s'effectue maintenant via une méthodologie ainsi qu'un script de calcul simple à utiliser, fournissant des résultats quantitatifs. L'étape de calibration en vol quant à elle se voit modifiée en vue d'un traitement post-vol plus efficient.

De nombreuses améliorations sont encore possibles. La fabrication physique d'un banc de test pour les scanners utilisés dans les systèmes YellowScan permettrait de suivre la méthodologie en un temps réduit et d'en améliorer la répétabilité. L'étude d'un test des systèmes inertiels serait également à envisager, même si actuellement, par expérience, les problèmes avec ces composants chez YellowScan sont rares. De plus, la possibilité de calibrer les systèmes en intérieur et en statique serait un atout considérable. Une étude a été découverte à ce sujet. Son implémentation est lourde algorithmiquement parlant, mais aurait l'avantage d'ouvrir les portes d'une calibration rapide et sans vol.

Références

Ravi, R., Shamseldin, T., Elbahnasawy, M., Lin, Y.-J., Habib, A. (2018). Bias Impact Analysis and Calibration of UAV-Based Mobile LiDAR System with Spinning Multi-Beam Laser Scanner. *Applied Sciences*, 8(2), p.297.

Modélisation semi-automatique de toitures à partir de données Lidar pour la création d'une maquette numérique urbaine.

PFE présenté par : **Paul LOGÉ**
Société d'accueil : **FUTURMAP**
Directeur de PFE : **M. Florent MICHELS**
Correcteur : **M. Mathieu KOEHL**



1. Introduction

À l'heure de l'essor du monde numérique, les villes cherchent à optimiser leurs ressources et leur organisation. La concentration des problématiques auxquelles elles font face les incitent à s'orienter vers le concept de la smart City. La définition de ces modèles reste encore floue, cependant ils possèdent tous un premier point commun qui est un socle numérique et sa représentation 3D.

Le développement des nouvelles technologies de mesure 3D permet aujourd'hui de faciliter l'acquisition d'une grande quantité de données spatiales. Dans ce sens la technologie de LiDAR aérien est de plus en plus exploitée par les villes. En effet, elle permet d'obtenir un grand nombre de données sur l'ensemble d'un territoire. Cependant, une fois la phase d'acquisition terminée, le traitement de ces jeux de données très volumineux reste une mission complexe.

Fondée en décembre 2013 à Madagascar, la société FUTURMAP est un acteur majeur dans le secteur du traitement de données spatiales. Elle réalise notamment du traitement de nuages de points LiDAR et depuis 2016, de la modélisation de maquette numérique BIM « tel que construit ». C'est donc tout naturellement que FUTURMAP s'est intéressé au traitement de ces données Lidar pour la production de maquettes numériques urbaines.

Ce projet de fin d'études (PFE) découle de la volonté de FUTURMAP à faire évoluer son département de modélisation 3D autour de la maquette numérique à l'échelle d'un territoire. **L'objectif de cette étude est d'abord de rechercher des solutions pour permettre la détection et la modélisation de toitures à partir d'un nuage de points issu de la technologie LiDAR. Ces toitures devront ensuite être intégrées dans un processus de modélisation de bâtiments pour maquettes numériques urbaines.**

2. Mise en place d'un processus de modélisation de maquettes numériques urbaines

Au terme des recherches bibliographiques, le format CityGML s'est imposé comme le format de référence pour la représentation et l'échange de maquettes numériques urbaines. En effet, depuis 2008, il est devenu le standard international de l'Open Geospatial Consortium (OGC) et de nombreuses villes ont recours à son utilisation. Comme le format IFC le fait pour les maquettes numériques « BIM », ce format assure l'interopérabilité entre les différentes maquettes numériques urbaines et permet la description géométrique et sémantique de celles-ci. C'est pour ces raisons que FUTURMAP a décidé de choisir ce format pour l'export des bâtiments modélisés.

Le CityGML définit jusqu'à 5 niveaux de détails (LOD) différents pour chaque type d'élément pouvant être retrouvé dans une maquette numérique urbaine. Dans notre étude, nous nous intéressons uniquement à la modélisation des bâtiments. Leur niveau de détail varie d'une simple représentation de contours au sol jusqu'à la modélisation détaillée de type « BIM ». L'objectif de ce projet est de modéliser des bâtiments au niveau de détail 2 (LOD2), ce qui correspond à la représentation des bâtiments avec leurs structures de toitures.

Les échanges avec différents services 3D de métropoles ayant déjà réalisé des maquettes numériques urbaines, telles que la métropole de Lyon ou l'Eurométropole de Strasbourg, ont permis d'écrire un processus de modélisation de bâtiments pour maquettes numériques urbaines présenté ci-dessous :

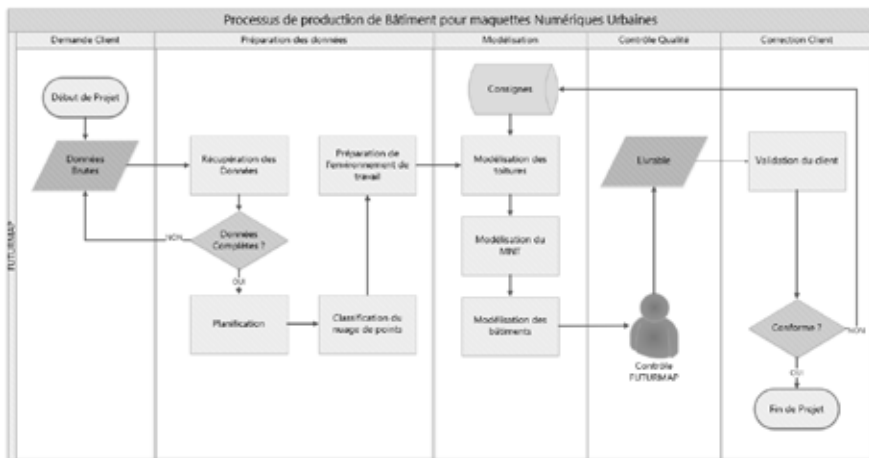


Figure 1 : Processus de production de bâtiments au sein d'une maquette numérique urbaine

Nous dégageons de ce processus cinq étapes principales pour la création de maquettes numériques urbaines, à savoir : la demande client, la préparation des données, la modélisation, le contrôle qualité et les corrections clients. Afin de standardiser cette production, différents outils ont été réalisés. D'un point de vue marketing par exemple, un tableau présentant l'ensemble des types de modélisation que nous pouvons réaliser en fonction des données fournies a été produit. De plus, des outils pédagogiques expliquant les étapes importantes de la production ont été élaborés, notamment au travers de fiches techniques pour les différents logiciels utilisés.

Concernant les logiciels utilisés, le choix de RhinoCity™, un plugin de Rhinoceros dédié à la modélisation réaliste de terrains et de villes en 3D, a mis en évidence la nécessité de modéliser les toitures en premier lieu pour permettre par la suite sur ce logiciel la création automatique de bâtiments au format CityGML.

3. Modélisation de toitures pour maquettes numériques urbaines

Pour réaliser les toitures, un procédé de modélisation de type paramétrique, par le biais du logiciel BuildingReconstruction a été choisi. Ce procédé utilise des modèles prédéfinis de toitures. Leur traitement se réfère alors à un ensemble de modèles de bâtiments disponibles dans une bibliothèque. La méthode est la suivante : l'algorithme calcule dans le nuage de points un certain nombre de paramètres, puis superpose au nuage un ensemble de modèles prédéfinis issus d'un catalogue. L'ordinateur va alors déterminer quel modèle correspond le mieux au nuage en question.

Les avantages du procédé adopté se trouvent dans la rapidité de calcul de l'algorithme mais aussi et surtout dans le fait que les modèles de la bibliothèque respectent les règles géométriques fixées par le format CityGML. Cependant, certaines formes de toitures sont composées de plusieurs modèles présents dans la bibliothèque ce qui demandera un traitement additionnel. De plus, il subsiste des toitures qui ne sont composées d'aucun modèle prédéfini et qui devront donc être modélisées de manière manuelle. Voici un tableau récapitulatif des différentes techniques de modélisation en fonction de la géométrie du toit rencontrée :




Géométrie de la toiture	Composé d'un seul modèle de la bibliothèque	Composé d'un ensemble de modèle de la bibliothèque	Composé d'aucun modèle de la bibliothèque
Type de modélisation de toitures	Modélisation semi-automatique Simple	Modélisation semi-automatique Complexe	Modélisation Manuelle
Exemple			

Figure 2 - Tableau de présentation des différents types de modélisation de toitures

4. Analyse des modèles de toitures et du processus élaboré

La modélisation du village d'Ostenhoffen a permis d'écrire un premier processus de modélisation à partir d'un premier échantillon de données. Cet échantillon constitué des 400 toitures de ce village a été mis à disposition par la ville de Strasbourg, qui a collaboré à ce projet de fin d'études.

Ce procédé a ensuite été amélioré avec la réalisation d'autres échantillons et les retours clients qui ont suivi. Voici les grandes étapes de ce processus :

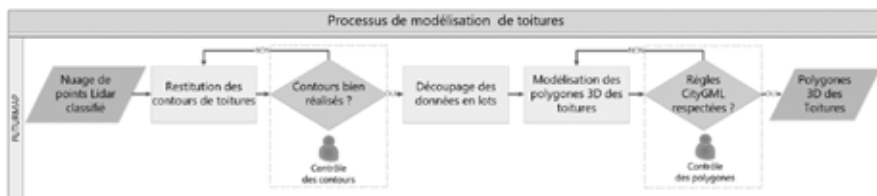


Figure 3 - Processus de modélisation de toitures

Pour valider le processus de modélisation mis en place, une étude de précision des modèles de toitures a été menée. Il est important pour l'entreprise de pouvoir annoncer puis garantir la qualité des modèles aux clients. Tout d'abord, un bilan des erreurs pouvant survenir durant la modélisation des données a été réalisé. En effet, les erreurs éventuelles liées à l'acquisition ne permettent pas à l'entreprise de garantir la précision du nuage de points. Puis le logiciel CloudCompare a été utilisé afin de réaliser une étude quantitative des écarts entre le nuage de points utilisé et les modèles de toitures réalisés sous forme de maillage. Pour cela il est possible d'établir une courbe de Gauss, qui donne la moyenne des écarts μ et l'écart type σ sur ces écarts.

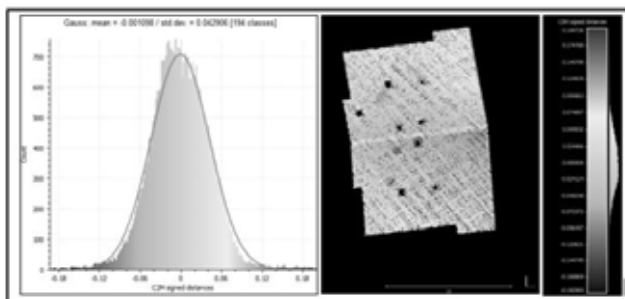


Figure 4 - Captures du logiciel CloudCompare présentant l'étude des écarts entre le nuage de points et une toiture de l'échantillon

Le figure 5 présente la moyenne des écarts et l'écart type pour une toiture de l'échantillon du village d'Osthoffen, dont les données ont été fournies par la ville de Strasbourg. Sur le village de Osthoffen, 70 toitures ont été analysées sans leurs superstructures (cheminées, lucarnes,...). A l'issue de ces tests, la précision globale déterminée est de l'ordre de 15 cm. Cette précision concerne toutefois la modélisation et ne prend en compte en aucun cas la précision du nuage de points.

Dans un deuxième temps, il a été question d'analyser les rendements de production des toitures réalisées. Ceci permet par la suite non seulement d'estimer les plannings de production mais surtout de pouvoir estimer les délais de livraison qui seront annoncés aux clients. Voici un tableau présentant le temps moyen de modélisation d'une toiture et le pourcentage de bâtiments modélisés en fonction du type de modélisation :

Type de modélisation de toitures	Modélisation semi-automatique Simple	Modélisation semi-automatique complexe	Modélisation Manuelle
Pourcentage dans l'échantillon (%)	40	50	10
Temps moyen de modélisation pour une toiture (min)	4	12	25

Figure 5- Comparaison des temps de production de toitures suivant les méthodes utilisées

Il est à noter que, si les temps moyens de modélisation sont les mêmes, le pourcentage de bâtiments modélisés avec les différentes techniques sera fonction du type d'environnement urbain (Centre-ville, zone pavillonnaire...).

5. Conclusion

Ce projet était destiné à développer le département de modélisation 3D au sein de la société FUTURMAP. La mise en place d'un processus de création de maquette numérique urbaine, éprouvée par une première livraison client au terme de l'étude, a permis de répondre à cet objectif.

La mise à disposition de ce processus au travers de différents outils pédagogiques permet aujourd'hui à FUTURMAP d'être en capacité de créer des bâtiments pour une maquette numérique urbaine. Cependant, pour parfaire le processus créé, il faudra encore le tester sur divers échantillons représentant tous les types d'environnements urbains et rechercher les optimisations qui subsistent, telles que la détection automatique des contours de toitures. Une fois le processus des bâtiments complètement fonctionnel et maîtrisé par l'entreprise, il restera à développer des outils pour permettre la modélisation des autres éléments constituant une maquette urbaine comme les infrastructures, la végétation ou encore le mobilier urbain.

Rendre le béton transparent : Acquisition, modélisation, réception, et réimplantation des armatures le constituant au sein de la société Sites.

PFE présenté par : **Mathilde MALLERON**
Société d'accueil : **SITES, Aix-en-Provence (13)**
Directeur de PFE : **Matthieu HANSEN**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Introduction

La société Sites, acronyme de Société d'Instrumentation, de Traitements et d'Essais sur Sites, est spécialisée dans le diagnostic et le suivi du vieillissement de structures de grande envergure. Créée en 1984, Sites dispose de divers domaines de compétences répartis aujourd'hui entre 5 entités en France (Paris, Lille, Tours, Lyon, Aix-en-Provence) et 2 filiales à l'étranger (Afrique du Sud et Chine). Le groupe Topographie-Instrumentation de l'entité Provence est appelé à travailler régulièrement pour des travaux d'auscultation, d'implantation et de contrôle de positionnement sur deux projets à enjeux de sûreté nucléaire : le Projet Réacteur Jules HOROWITZ (RJH) et le projet de recherche mondial sur la fusion nucléaire (ITER) situés sur le site du Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) de Cadarache dans les Bouches du Rhône. Aujourd'hui, concernant l'avancement des travaux de gros-œuvre, les voiles en béton de différents bâtiments en construction sont coulés et Sites est missionné pour repérer la position des armatures après bétonnage afin de permettre l'ancrage de divers éléments dans le béton à travers les mailles du ferrailage. Ce type de travaux devenant une activité régulière pour Sites, mon projet de fin d'étude vise à étudier les problématiques que soulève cette mission liées aux phases suivantes : acquisition, modélisation, réception, et réimplantation des armatures Tel Que Construit (TQC).

2. Phase d'acquisition

Le but du projet est en premier lieu, d'étudier les méthodes d'acquisition applicables à un relevé des armatures avant béton. Le besoin d'effectuer un relevé avant bétonnage, constituant la donnée d'entrée pour la phase de réimplantation, se justifie pour plusieurs raisons. Il existe des méthodes de détection du ferrailage après bétonnage présentant l'avantage de détecter un éventuel mouvement des armatures une fois le béton coulé mais sont limitées par une incertitude de positionnement centimétrique et sont contraignantes d'utilisation sur des voiles en béton lourd. Si l'emploi d'un tachéomètre peut être utilisé pour un relevé TQC dans le cas particulier d'un voile plan peu étendu où les armatures forment un quadrillage aux mailles orthogonales, cette méthode n'est pas applicable à des voiles plans ou courbes, étendus sur plusieurs mètres et peu facilement accessibles. C'est pourquoi les méthodes lasergrammétriques et photogrammétriques sont retenues.

La zone d'acquisition choisie se trouve sur le site du chantier Iter et était en phase de pose des armatures lors du projet. Elle est située au niveau du bâtiment Tokamak, qui est une machine devant démontrer que la fusion nucléaire peut être utilisée comme source d'énergie à grande échelle pour produire de l'électricité sans émettre de CO₂.

Pour acquérir la zone de ferrailage, présentée *Figure 1*, deux scanners laser terrestres ont été utilisés : le scanner laser 3D Faro Focus X130 et le scanner laser Z+F Imager 5010C, dont les caractéristiques techniques sont présentées *Tableau 1*. Le procédé de relevé sur le terrain a consisté à réaliser 7 stations avec le scanner laser Faro, afin de couvrir plusieurs faces sur le plot d'armatures (dimensions 4x5x4m), à partir desquelles au moins 3 sphères étaient visibles par station. Le positionnement

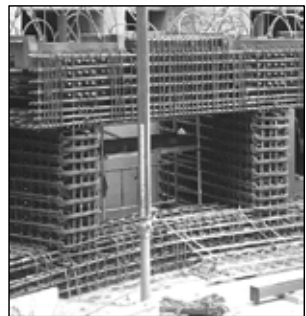


Figure 1 : Plot d'armatures, zone d'acquisition choisie sur le chantier Iter

des sphères a été compliqué du fait de la co-activité présente sur le pourtour de la zone de scan, limitant le placement de sphères au sol et le nombre de sphères pouvant être mesurées par tachéométrie (utilisation d'un prisme centrosphère). Mais le fort recouvrement entre les scans permet d'assurer l'étape de consolidation au moyen d'un recalage nuage-nuage si trop peu de cibles sont visibles depuis une station. La même zone a été acquise avec le scanner laser Z+F selon un procédé de relevé similaire mais avec seulement 5 stations. Finalement, du fait de la forme complexe du plot de ferrailage, le scanner laser Faro, léger et compact, est privilégié pour sa maniabilité même si le scanner Z+F est aussi adapté pour un environnement industriel et intérieur présentant de meilleures caractéristiques au niveau de la rapidité d'acquisition notamment. En effet, le Faro Focus 3D doit numériser avec un paramètre qualité d'au moins 4x au vu de la finesse recherchée pour l'acquisition des armatures, ce qui ralentit sa vitesse d'acquisition.

Marque/Système	Zoller + Fröhlich Imager 5010C	FARO FOCUS 3D X130
Principe de mesure	différence de phase	différence de phase
Longueur d'onde	1500 nm C1	1550 nm C1
Portée	0.3m - 187.3m	0.6m - 130m
Résolution angulaire	0.0002° (horiz.) ; 0.0004° (vert.)	0,009°
Bruit de mesure sur la distance à 25m	0.3 mm rms (réflectivité 80%) 0.6 mm rms (réflectivité 14%)	0.3 mm rms (réflectivité 90%) 0.5 mm rms (réflectivité 10%)
Précision de la position d'un point	-	2 mm à 25 m
Vitesse d'acquisition	1 016 000 pts/sec	976 000 pts/s
Divergence du rayon	0.3 mrad	0,19 mrad
Diamètre du point laser	3.5 mm à 0.1m	2.25 mm à la sortie
Champ visuel	H:360° ; V:320°	H:360° ; V:300°

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des scanners laser utilisés d'après les données-constructeurs

Si l'utilisation d'un scanner laser est favorisée sur des voiles de forme complexe, la réalisation d'orthophotos est privilégiée sur des voiles plans dont une seule face est visible. Ainsi, trois séries d'orthophotos ont été effectuées sur trois faces du même plot d'armatures ayant fait l'objet de numérisations laser. La caméra Canon EOS500D-18mm, dont dispose la société, a été utilisée et calibrée à l'aide d'une mire plane de calibration et du logiciel *PhotoModeler*. Le relevé a été effectué en deux étapes : d'une part, les points d'appuis sont mesurés par tachéométrie classique. Ces points sont matérialisés par des cibles réfléchissantes 2x2cm magnétisées pour adhérer sur les barres d'armatures. D'autre part, la situation de l'objet d'acquisition sur le chantier permettant peu de recul, les photos ont été réalisées à environ 2m de celui-ci tout en essayant de capturer un recouvrement suffisant entre photos et au moins 5 cibles dont 4 servants comme points d'appuis et 1 comme point de contrôle.

Le traitement a ensuite été réalisé à l'aide de *PhotoModeler*. Pour chaque face, les coordonnées mesurées des cibles ont été transformées pour être définies dans un repère local, dont le plan moyen (orientation XY) parallèle à la face photographiée a été calculé par rapport aux points des cibles. Le plan XY de ce nouveau repère permet ensuite de paramétrer facilement la surface de projection. Pour chaque photo orthorectifiée, l'erreur résiduelle globale était inférieure au pixel (soit 0.5mm la taille d'un pixel sur le terrain). Ensuite, les photos orthorectifiées et géoréférencées, et les coordonnées des cibles ont été importées sur *AutoCAD* afin de vérifier le positionnement des points de contrôle.

3. Phase de traitement du nuage de points

3.1. Consolidation et Géoréférencement

Les étapes de consolidation et géoréférencement ont été effectuées avec le logiciel *RealWorks*. Les écart-types d'ajustement des sphères conservées sont inférieurs à 0.5mm (bien que tous inférieurs à 1mm). Les erreurs résiduelles sur les coordonnées des cibles sont inférieures à 2mm et l'erreur résiduelle moyenne résultante est inférieure à 1mm. L'étape de géoréférencement permet de transformer les coordonnées des nuages de points dans le référentiel local du chantier. Cette étape contribue à dégrader la consolidation en augmentant l'erreur résiduelle sur les stations et les cibles car elle insère des contraintes supplémentaires dans le réseau de cibles. (Erreur résiduelle moyenne augmentée de 0.77mm à 1.04mm). Cependant, ces erreurs sont tout à fait acceptables pour obtenir un nuage de points de qualité suffisante représentant des barres d'armatures de diamètres variant de 5 à 50mm.

3.2. Filtrage des données

Cette étape vise à préparer les données acquises afin de produire un rendu 2D et/ou 3D des armatures par la suite. Les armatures étant les seuls objets requis, tous les autres objets peuvent être supprimés. De plus, les nuages de points résultants de numérisation laser sont bruités et sont susceptibles de comporter des points aberrants dus à la limitation des capteurs, le bruit inhérent au principe d'acquisition, la nature et réflectivité de la surface et artefacts présents dans la scène. En observant le nuage de points au niveau des armatures, le problème majeur observé provient des effets de bord, présenté *Figure 3*, ce qui sera l'objectif principal du filtrage.

Les points faux dus aux effets de bords apparaissent dans les zones de discontinuité du nuage, que l'on retrouve ici au niveau des liaisons entre les barres de ferrillage. Plusieurs logiciels intègrent des filtres pour traiter ce problème :

- Le logiciel *Faro Scene* dispose de filtres spécifiques applicables aux fichiers de scan bruts *Faro .fls*, et notamment le filtre appelé *Point Perdu*, qui consiste à comparer la distance d'un point par rapport au scanner et la distance des points du voisinage. Le point est retenu si P% des différences de distance entre le point étudié et son voisinage est inférieur à un seuil de Dm. Les paramètres du filtre sont les suivants : taille de la grille pixel définissant le voisinage à étudier, le seuil de distance (m) et le seuil d'attribution (%).
- Les filtrages des numérisations issus du scanner Z+F sont effectués à l'importation des nuages dans *RealWorks*, qui intègre les anciens filtres du logiciel *LaserControl*. Il dispose du filtre *Mixed Pixels* basé sur l'étude de 8 points de voisinage en spécifiant l'angle solide du cône de recherche.
- Le filtre *SOR Statistical Outlier Removal* disponible depuis *CloudCompare* s'applique au voisinage de chaque point et supprime ceux qui ne remplissent pas un certain critère. Il est basé sur la distribution des distances du voisinage au point considéré. Pour chaque point, il calcule la distance moyenne entre le point et chacun de ses voisins. En supposant que la distribution est gaussienne, les points éloignés d'une distance supérieure à la distance moyenne plus n sigma sont supprimés.
- Le logiciel *3DReshaper* possède le filtre *Réduction du bruit*, visant à supprimer les points clairsemés en se basant sur l'étude de la densité de points d'un voisinage de points.

Finalement, concernant les deux filtres appliqués aux numérisations brutes, le filtre *Mixed Pixels* (paramétrage usuel `pixel:3 ;angle:2°`) se montre efficace en supprimant 15% des points du nuage original identifiés comme des points faux dus à des effets de bords d'après une comparaison nuage filtré-nuage original. Cependant, le filtre *Points Perdus* commence à être performant après plusieurs applications du filtrage avec les mêmes paramètres et l'interface *Scene* ne permet pas de visualisation directe des points supprimés. Ensuite, concernant les filtres applicables au nuage consolidé, le filtre *SOR* contribue à réduire les points dus aux effets de bords, mais il est limité par sa capacité de traitement non adaptée à des nuages volumineux contenant plusieurs millions de points. Le filtre *Réduction de bruit* se révèle aussi efficace et permet de visualiser un aperçu des points supprimés avant application.

4. Phase de modélisation et de réception

Le nuage de points final peut constituer un premier rendu à partir duquel une implantation virtuelle des ancrages peut permettre d'évaluer facilement le positionnement possible de l'ancrage à travers les armatures. Concernant la phase de réception et contrôle du TQC, l'objectif est de rechercher la production d'un livrable permettant l'identification rapide du type d'armatures selon son diamètre et sa profondeur par rapport à la surface du voile béton. Les méthodes suivantes ont été envisagées :

- Identification des armatures à partir d'ortho-images 2D (à partir du nuage de points ou à partir des orthophotos) : mise en place d'une méthode permettant d'obtenir le contour des barres d'armatures

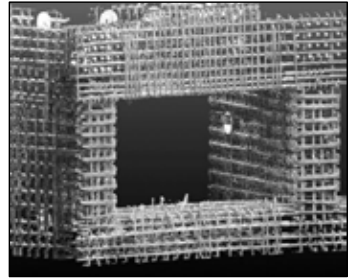


Figure 2 : Nuage de points nettoyé du plot numérisé



Figure 3 : Aperçu de points bruités à filtrer au niveau des liaisons entre les armatures

à partir de techniques d'extraction de contours basées sur un changement brutal des valeurs d'intensité de l'image.

- Identifications des armatures à partir du nuage 3D : mise en place d'une solution permettant d'extraire automatiquement les cylindres correspondant aux armatures numérisées.

En étudiant les possibilités de mise en œuvre et les différents résultats apportés par ces deux méthodes, la solution retenue s'est portée sur la deuxième idée qui consiste à modéliser par primitives géométriques les armatures à partir du nuage de points en utilisant le logiciel *3DReshaper*. Les étapes clés menant à l'obtention du modèle des barres de ferrillage comportent une phase de traitement manuel et un traitement automatisé à l'aide d'un script, implémenté en langage JavaScript Orienté Objet.

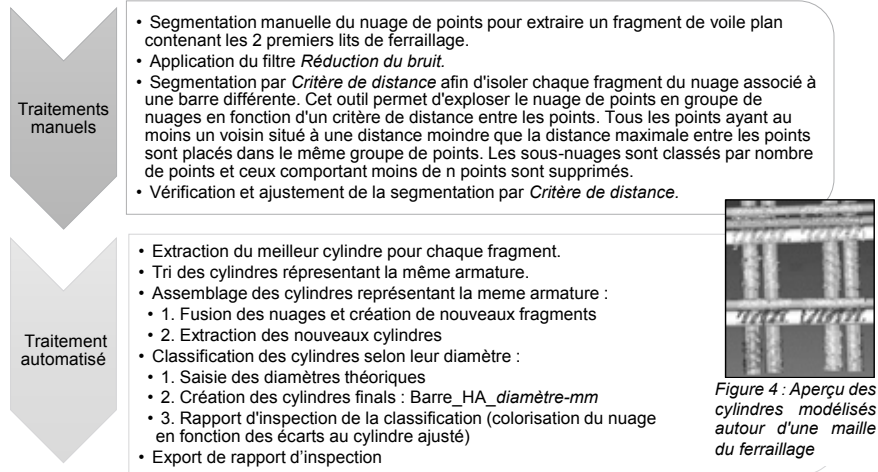


Figure 5 : Chaîne de traitement de la modélisation sous 3DReshaper

La figure 5 montre un extrait du résultat obtenu en appliquant la chaîne de traitement. Les résultats obtenus sont satisfaisants lorsque peu de fragments constituent le nuage initial. Cependant, le procédé est limité car il nécessite un traitement face par face et ne prend pas en compte les armatures courbes ou les barres orthogonales à la surface du voile (présence d'épingles notamment).

5. Conclusion et perspectives

Depuis l'acquisition des données jusqu'à la production de livrables, ce projet couvre différents aspects et problématiques qui ont été énumérés et étudiés afin d'orienter et de définir les pistes de travail de chaque partie Acquisition – Modélisation – Réception – Réimplantation.

Les premières phases d'acquisition et de traitement ont permis de constater les spécificités liées à l'objet étudié, les barres d'armatures, dans son environnement, afin de compléter et approfondir les procédures internes existantes en termes de relevés sur site, de traitement, et de filtrage des données.

Ensuite, la recherche de production d'un livrable s'est dirigée vers une modélisation 3D des armatures à partir de primitives géométriques cylindriques et cette solution est applicable sur des fragments peu volumineux du nuage. Par ailleurs, l'extraction automatique de primitives simples à partir d'un nuage de points représentant une scène complexe n'est pas bien maîtrisée par la plupart des logiciels de traitement de nuage de points. Il serait intéressant d'étudier plus en détails les capacités de logiciels plutôt destinés à l'industrie intégrant de tels outils applicables à l'extraction automatique d'éléments de tuyauterie.

Enfin, concernant la phase de réimplantation des armatures sur la surface du béton coulé, le projet a permis de rechercher des techniques pouvant être substituées au procédé d'implantation par tachéométrie classique. La solution de projection de gabarits filaires laser est envisagée, elle consiste à projeter un rayon laser sur une surface pour créer un gabarit virtuel à partir d'un modèle CAO comme données d'entrée et d'un positionnement basé sur la reconnaissance de cibles réfléchissantes. La modélisation des armatures a d'ailleurs été réalisée dans le but de produire ensuite le modèle filaire 3D des barres à partir de l'extraction des axes des cylindres modélisés.

De la méthodologie d'acquisition au scanner laser terrestre à la mise en œuvre d'un modèle 3D du hall d'essai du laboratoire d'hydraulique de CNR.

PFE présenté par : **Calypto PLASSE**
Société d'accueil : **CNR**
Directeur de PFE : **Paul-Henri FAURE**
Correcteurs : **Emmanuel ALBY**
Pierre GRUSSENMEYER



PFE réalisé avec le partenariat de

when it has to be right



1. Introduction

1.1 Contexte du projet

Le Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques (CACOH) de la compagnie nationale du Rhône (CNR) a différentes missions concourant toutes à garantir la sûreté de l'exploitation du fleuve. Pour cela, les équipes du CACOH réalisent différentes études à l'aide de modèles physiques à échelle réduite dans leur hall d'essai. Afin de faciliter leur positionnement, il est important de connaître précisément les caractéristiques du bâtiment et l'ensemble des éléments fixes présents.

1.2 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est de réaliser une modélisation 3D du hall d'essai d'hydraulique de CNR répondant aux besoins des équipes du CACOH. Pour ce faire :

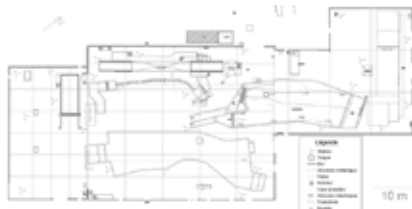
- Définir un cahier des charges des besoins liés au modèle.
- Etablir une méthodologie de levé optimale du hall d'essai à l'aide d'un scanner laser terrestre.
- Définir les besoins de traitement des nuages de points : du nettoyage à la segmentation en passant par la consolidation et le filtrage.
- Trouver des techniques de modélisation automatiques ou semi-automatiques pour un maximum d'objets.
- Etudier la précision de la modélisation obtenue.

2. Travaux préparatoires

2.1 Le hall d'essai d'hydraulique

Le hall d'essai d'hydraulique fait une surface d'environ 3 000 m². Il a été construit en trois fois, la géométrie n'est donc pas identique sur l'ensemble du hall. Les modèles physiques sont construits dans le hall pour la durée de l'étude les concernant, ils sont ensuite détruits pour laisser la place à d'autres. Le hall subit donc de fréquentes modifications d'aménagement. Pendant ce projet, l'espace utilisé était très important, il existait donc de nombreux obstacles à la numérisation de l'espace.

Figure 1 : Plan du hall d'essai avec les modèles présents lors de l'acquisition. Adapté de plans CNR, sans échelle.



2.2 Définition du besoin

Afin de définir les besoins liés à la modélisation, une réunion de préparation a eu lieu avec : les concepteurs/modélisateurs et les techniciens chargés des essais et de la construction.

Cette réunion a permis de définir les besoins, la précision attendue, les apports possibles et les différents objets d'intérêt. Nous avons défini que différents types de rendu peuvent être envisageables en fonction de l'utilisation prévue. L'ensemble de ces besoins a été résumé dans le tableau suivant.

Besoin	Détail	Objectif
Emprises occupées	Zone de circulation	Définir l'espace occupé et l'espace restant disponible
	Equipements hors tout	
Emprise disponible	Concevoir les modèles 3D	Prendre en compte, dès la conception, la géométrie disponible
	Positionner les modèles	
Visualisation	Mesurer des côtes	Avoir des contrôles lors de la création des modèles physiques
	Mobilité (consultation)	S'imprégner du modèle avant sa création physique
	Classification en calques	Visualiser les différents types d'éléments et les afficher ou non
	Connexions	Voir les réseaux les plus proches
	Niveau des structures	Prendre en compte la hauteur de la structure pour prévoir les équipements futurs
Métadonnées	Présence de métadonnées et lien vers Matélabo ¹	Connaître les informations de certains objets et avoir un document unique
	Evolution des modèles et engins	Assurer la mise à jour des modèles et un fonctionnement optimal
Modélisation dynamique	Créer des raccordements automatiques	Prendre en compte les réseaux modélisés et trouver une solution de raccordement optimale

Figure 2 : Résumé des besoins dans le cadre de la modélisation 3D du hall d'essai hydraulique.

2.3 Les objets d'intérêt

Le fait de connaître l'utilisation qui sera faite de la modélisation permet de déterminer les objets qui doivent être présents dans la modélisation 3D de la scène. Les éléments à modéliser sont de quatre types : la structure, les réseaux, les rampes d'éclairage et les modèles fixes du hall.

2.4 Les objets problématiques présents dans le hall

Comme énoncé précédemment, le hall contient des modèles physiques à échelle réduite permettant l'étude hydraulique. Cela signifie que des surfaces en eau sont présentes dans le hall, celles-ci sont repérables sur les scans car elles ne renvoient pas de points. Le hall contient en outre un canal vitré d'environ 15 mètres de long, or les vitres réfléchissent et/ou sont traversées par les faisceaux laser. Les points mesurés en direction de vitres sont donc faux et doivent être éliminés du nuage de points.

2.5 La méthodologie de traitement retenue

A l'aide des textes étudiés lors de la réalisation de l'état de l'art, de la connaissance de l'environnement et de la connaissance du besoin, nous avons pu établir la méthodologie suivante :

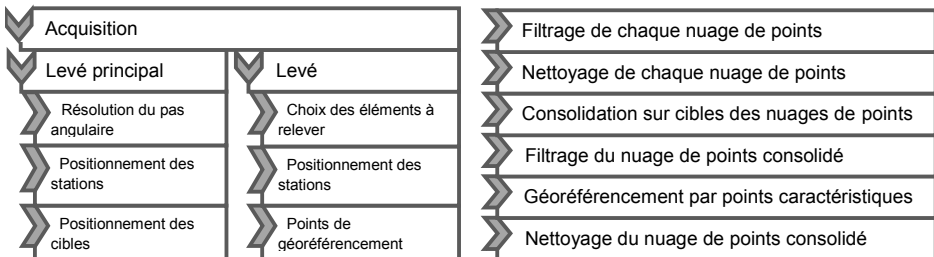


Figure 3 : Organigramme de la méthodologie de traitement des données.

¹ Logiciel de gestion des stocks des tuyaux d'alimentation, appareils de mesure...

3. Acquisition et traitements

1.1 Acquisition

Etant donné l'encombrement du hall d'essai et sa surface, de nombreuses stations sont nécessaires pour obtenir un nuage de points complet du hall d'essai. Les réseaux de restitution hydraulique étant composés de canalets² couverts de grilles ou de plaques, il n'est pas possible de les relever à l'aide du scanner. Un levé complémentaire au tachéomètre est nécessaire pour obtenir des informations sur ces éléments et pouvoir les modéliser.

Nous avons utilisé la ScanStation P40 de Leica pour réaliser un total de 31 scans dont le paramétrage est identique. Nous avons choisi un pas angulaire de 3.1mm à 10m et une acquisition scan et photographie avec une résolution de 1948x1948. Avec ces paramètres, l'acquisition par scan a duré 40mn.

1.2 Nettoyage et filtrage des scans

Avant de modéliser le hall, il faut nettoyer, consolider et filtrer les nuages de points. Il faut en particulier éliminer les points correspondant aux vitres et fenêtres ainsi qu'aux surfaces en eau, ces points apparaissent en dehors de la zone d'étude car ils sont réfléchis et la distance mesurée est donc supérieure à la distance réelle à l'objet. Pour cela une visualisation depuis la station dans le nuage de points est idéale.

Le filtrage des scans permet quant à lui de diminuer le volume d'informations. Nous avons choisi un pas de 0.6cm, ce qui correspond à la distance d'acquisition à 20m calculée pour obtenir des scans avec un bon recouvrement et qui permet d'espérer une modélisation d'une précision finale de 1 à 2cm. Ces étapes permettent de diminuer le poids des fichiers et donc les temps de traitement.

1.3 Consolidation des scans

Différents types de consolidations et logiciels ont été testés et leurs résultats ont été comparés entre eux. Il en est ressorti que les consolidations sont comparables en temps de calcul comme en rendu, cependant l'interface est plus agréable dans le logiciel Cyclone Register ; c'est pourquoi ce logiciel a été choisi pour réaliser la consolidation des 31 scans acquis dans le hall.

Lors de la consolidation, nous avons constaté que certains scans n'étaient pas consolidables avec les autres en utilisant uniquement les cibles. En effet l'orientation de certaines cibles les rendent inexploitable. Nous avons donc ajouté des points homologues pour 4 scans afin de consolider l'ensemble du hall en une fois. Nous avons ensuite étudié les écarts sur les cibles communes et avons éliminé les cibles ayant un écart supérieur à 6mm. Lors de la consolidation, nous avons de nouveau filtré le nuage de points afin de limiter le poids des données.

1.4 Nettoyage du scan consolidé

Suite à la consolidation nous devons préparer la modélisation. Afin de pouvoir utiliser au mieux les algorithmes de détection de formes, nous devons nettoyer le nuage de points au maximum pour faciliter les calculs. Au regard des éléments à modéliser, nous pouvons éliminer l'ensemble des points correspondant aux modèles d'études présents au moment de l'acquisition, aux stocks ainsi qu'aux différents objets présents tels que : les tableaux de présentation des modèles, les dérouleurs de chiffons, les brouettes...A l'issue de ce nettoyage du scan consolidé, il ne reste que les points correspondant aux objets à modéliser, soit la structure, les réseaux et les modèles fixes.

A l'origine, l'ensemble des scans représentait un nombre total de 4 520 591 137 points, à l'issue de ces traitements, il reste 633 240 806 points, nous avons donc réduit le nuage de points de 86%.

² Les canalets sont des petits canaux de restitution hydraulique présents sous la dalle du hall.



Figure 4 : A gauche : Nuage de points consolidé, nettoyé du hall d'essai, en noir et blanc sans échelle.
A droite : photographie du hall depuis le même point de vue.

1.5 Modélisation du hall

Pour préparer la modélisation, nous avons réalisé un tableau des objets à modéliser ainsi que la priorité de modélisation de ces objets. Ainsi, nous avons défini que le toit n'était pas dans les priorités ; en effet, ce sont les structures métalliques qui le soutiennent qui limitent la place en hauteur disponible pour les modèles.

L'objectif de la CNR est de pouvoir réaliser des analyses de collision entre le modèle du hall et les modèles d'étude, pour cela la méthode la plus fréquente est d'utiliser le nuage de points comme support. Cependant dans notre cas, l'investissement financier en logiciels serait trop important pour l'utilisation projetée, nous avons donc réfléchi à d'autres types de modélisation possibles.

Outre l'utilisation de nuages de points, il est possible de :

- réaliser des modèles 3D solides qui ont comme avantage d'avoir des relations physiques entre les différents objets.
- réaliser des modèles intelligents se rapprochant d'un SIG 3D. L'inconvénient de cette méthode dans notre cas est son temps de mise en place, en effet il faut définir l'ensemble des objets à utiliser ainsi que leurs relations aux autres objets. L'avantage est qu'une fois ces objets et relations définies, les modifications sont rapides et aisées.
- réaliser un modèle maillé dense. L'avantage de cette méthode est sa simplicité de mise en place, en revanche le fichier en sortie sera lourd et donc inexploitable.
- réaliser une base photos360 qui permet, en géoréférençant des photographies, de naviguer dans les images et de visualiser ce qui est intéressant.

La méthode retenue dans notre cas est la réalisation de modèles 3D solides ainsi que de plans 2D afin de pouvoir les visualiser dans un outil de type truviev.

1.6 Etude de la précision de la modélisation

Suite à la modélisation du hall, nous avons pour objectif de vérifier la précision de la modélisation obtenue. Pour rappel, le but est de modéliser avec une précision de 1 à 2 cm. Pour étudier la précision, nous comparerons les objets modélisés au nuage de points consolidé. En fonction du temps disponible, nous pourrions aussi mesurer des points particuliers de la scène à l'aide d'un tachéomètre afin de comparer les coordonnées de ces points avec ceux des mêmes points dans la modélisation.

4. Conclusion

Une bonne préparation est essentielle et permet de gagner beaucoup de temps lors de l'acquisition. La phase la plus longue du traitement est le nettoyage et la modélisation à partir du nuage de points, de plus cela nécessite une grande connaissance du terrain. De nombreuses méthodes de modélisation existent et sont adaptées à certains travaux. Dans notre cas, les contraintes en logiciel et en volume de données ont limité le choix de la méthode de modélisation.

Je tiens particulièrement à remercier Leica Geosystems pour avoir mis gracieusement à disposition du matériel et des logiciels me permettant de mener ce projet à bien.

Développement du pôle scanner 3D d'Alpes Topo : étude comparative des logiciels et scanners et création de procédures adaptées

PFE présenté par : **Théodore MICHEL**
Société d'accueil : **Alpes Topo**
Directeur de PFE : **Cédric DAURES**
Correcteurs : **Gilbert FERHAT**
Emmanuel ALBY



1. Contexte et objectifs

1.1 Contexte de l'étude

Avec l'apparition et le développement conséquent du scanner laser 3D ces deux dernières décennies, de plus en plus d'entreprises, qu'il s'agisse de cabinets de géomètres-experts ou d'agences de topographie de chantier, se tournent vers la numérisation 3D. C'est le cas d'Alpes Topo, un des acteurs principaux du secteur des grands travaux et de la topographie, qui a diversifié son domaine d'activité en créant en 2014 un pôle BIM (Building Information Modeling) – Scanner 3D.

Cependant, cette nouvelle activité d'acquisition et de modélisation 3D des données, bien que représentant une part croissante du chiffre d'affaire de la société, nécessite également de grandes connaissances techniques et théoriques. Ainsi, outre une veille permanente à maintenir afin de s'adapter aux évolutions technologiques du secteur (allant du matériel d'acquisition 3D aux logiciels de traitement des données), il est également important d'établir des procédures propres à Alpes Topo lui permettant une efficacité optimale sur les nombreux chantiers réalisés.

1.2 Objectifs du projet

Le but de ce Projet de Fin d'Etudes est donc de participer au développement du pôle 3D d'Alpes Topo, en réalisant dans un premier temps une étude comparative entre les solutions dont dispose déjà l'entreprise et celles existant sur le marché.

Cette étude passe donc par une première étape d'état de l'art et de recherche bibliographique permettant de recenser toutes les solutions actuellement performantes sur les deux points clés que sont l'acquisition des données puis le traitement des nuages de points relevés.

Dans un second temps, différents tests comparatifs du matériel mis à ma disposition ont été réalisés à savoir, trois scanners 3D appartenant à la société, trois logiciels constructeurs de traitement 3D des données, une solution externe de colorisation de nuages de points et du matériel spécifique développé par Alpes Topo tel qu'un damier rotatif. Le but de cette étape est de pouvoir établir des procédures spécifiques à la société, lui permettant d'avoir des méthodes prédéfinies les plus optimisées possibles selon le type de chantier que les employés auront à traiter. En effet, même si les scanners qu'elle possède sont tous très récents et performants, leurs paramètres et caractéristiques sont différents, permettant une efficacité plus ou moins grande selon le type de travail à réaliser. Ainsi, la réalisation d'un scan de précision portant sur de petits objets, d'un scan d'intérieur de plusieurs dizaines de stations, ou d'un scan d'extérieur longue portée nécessitera l'usage de scanners différents afin d'optimiser au maximum le processus d'acquisition.

2 Etude des différents types de scanners 3D

L'acquisition 3D repose sur un principe de base commun à tous les scanners : l'émission d'un laser réfléchi vers l'appareil par l'objet à mesurer, permettant l'évaluation des paramètres nécessaires (distance et angles) au calcul des coordonnées tridimensionnelles de ce dernier.

Cependant, la méthode d'obtention de ces mesures diffère selon le type de scanner utilisé. On en recense alors deux principaux appliqués au domaine de la topographie :

Scanner à impulsions lasers ou temps de vol : Il s'agit du type de scanner le plus employé actuellement. Son principe est simple : il repose sur une observation du temps mis par le laser pour parcourir le trajet aller-retour séparant le point de l'appareil. La principale inconnue à déterminer reste alors le temps de parcours total du trajet, qu'il convient de mesurer très précisément pour une fiabilité satisfaisante. En effet, une précision de mesure au millimètre, ce qu'assurent la majorité des scanners actuels, nécessite de mesurer le temps de trajet à $7 \cdot 10^{-12}$ secondes près. Ce type de scanner doit donc posséder une horloge interne et un système de mesure extrêmement précis.

Son principal inconvénient reste cependant sa vitesse d'acquisition d'environ 100 000 points/seconde, puisque l'appareil ne peut analyser qu'une pulsation laser à la fois. Il est par conséquent nécessaire d'attendre un cycle complet d'émission-réception d'une pulsation pour pouvoir analyser la suivante. Toutefois, son indéniable avantage reste sa longue portée pouvant dépasser le kilomètre.

Scanner à différence de phase : Ce type de scanner est également très prisé de certains constructeurs tels que Faro. La mesure de la distance ne se base plus ici sur le temps de trajet parcouru par le laser, mais sur le déphasage de l'onde réfléchie par rapport à l'onde initialement émise. Ainsi, en modulant le signal en fréquence avant son émission, l'appareil est alors capable, grâce à un phasemètre numérique, de déterminer la différence de phase pour ainsi obtenir le temps de trajet.

Ce système, bien que plus complexe, permet une meilleure précision (d'environ 1mm) et une plus grande vitesse d'acquisition, jusqu'à 1 million de points par seconde. Cependant, l'intensité du signal des ondes émises ne permet pas une portée aussi importante que le scanner à temps de vol, la réduisant à environ 300m pour les plus performants.

3 Etude concrète du matériel possédé par Alpes Topo

3.1 Etude comparative des scanners lasers

Suite à cette étude préliminaire, nous avons pu dans un premier temps comparer entre eux les scanners lasers 3D possédés par Alpes Topo, puis les confronter à leurs principaux concurrents existants sur le marché.

La société possède trois scanners : un Faro Focus X130, un Trimble TX8 ainsi qu'un Zoller+Fröhlich 5016 Imager (ZF 5016), tous relativement récents et très performants.

Outre les caractéristiques techniques (précision et résolution notamment), il convient également de s'intéresser de près à des détails importants lors de campagnes de scan, tels que la vitesse d'acquisition ou la qualité de la colorisation. Ces différentes caractéristiques sont donc listées ci-dessous :

Scanners Lasers	Faro Focus X130	ZF 5016	Trimble TX8
Portée	Jusqu'à 130m	Jusqu'à 320m	Jusqu'à 120m Jusqu'à 340m (appareil en mode étendu)
Temps de scan moyen pour un nuage d'environ 10 000 000 de points	3 minutes	1 minute 30 secondes	58 secondes
Temps de colorisation (prise de photos)	3 à 4 minutes selon qualité	2min 30 à 3min 30 selon qualité	1 à 2 minutes selon qualité
Prix (indicatif)	Environ 35 000 euros	Environ 90 000 euros	Environ 70 000 euros

Figure 1 : Caractéristiques principales des trois scanners d'Alpes topo

Le principal paramètre nous intéressant dans ce tableau est le temps de scan pour un nuage d'environ 10 000 000 points, correspondant à une résolution (espacement entre deux points consécutifs) d'environ un point tous les 12mm à 10m, soit la résolution moyenne requise pour un scan

d'intérieur, représentant une grande partie des chantiers d'acquisition 3D d'Alpes Topo. Ainsi, le TX8 reste le plus rapide pour ce type de travaux.

Cependant, la société offre souvent une prestation de tour visuel colorisé à ses clients, consistant à créer, à partir des images colorisées prises par les scanners, une visite virtuelle du site, il est également important d'évaluer, outre la vitesse d'acquisition des photos, la qualité de colorisation de chacun des scans, donc la qualité de la caméra intégrée à ces trois scanners.

Camera intégrée	Qualité de l'image	HDR	Coaxialité avec le système de visée laser
Faro X130	70 Méga Pixels	Oui (amélioré)	Oui
ZF 5016	80 Méga Pixels	Oui (amélioré)	Oui
Trimble TX8	10 Méga Pixels	Oui	Non

Figure 2 : Qualité de colorisation des scanners d'Alpes Topo

On remarque d'emblée une qualité bien moindre des résultats concernant le Trimble TX8 à la fois de par la faible résolution (10 Méga Pixels) de l'image acquise, mais surtout par la non coaxialité de la caméra avec le système de mesure, entraînant des distorsions et donc une mauvaise colorisation et représentation géométrique de l'image. Ces distorsions sont accentuées pour des objets proches. Pour répondre à cette problématique, des solutions de colorisation externe telles que la caméra iStar sont en cours de test.

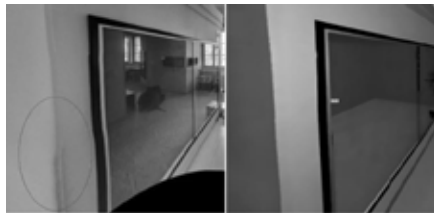


Figure 2 : Exemple de distorsion entraînée par la colorisation du Trimble TX8 (image de droite) par rapport à la même scène acquise en Noir et Blanc (à gauche)

Ces tests permettent donc d'établir un tableau recensant les chantiers sur lesquels ces scanners seront les plus efficaces :

Scanner	Faro X130	ZF 5016	Trimble TX8
Ratio vitesse d'acquisition/densité du nuage de points	Moyen	Bon	Excellent
Précision sur le positionnement 3D d'un point	3mm à 10m 29mm à 100m ⇨ Bonne	1,4mm à 10m 14mm à 100m ⇨ Excellente	2,2mm à 10m 22mm à 100m ⇨ Très bonne
Qualité de colorisation	Très bonne	Excellente	Médiocre
Portée	Moyenne	Très bonne	Bonne
Type de chantier adapté – Performance moyenne sur 10	Scan d'intérieur en couleurs – 7/10 Scan d'extérieur en couleurs – 6/10	Scan d'intérieur en couleurs – 9/10 Scan d'extérieur en couleurs – 9/10 Scan de précision (petits objets) – 8/10	Scan d'intérieur en Noir et Blanc – 10/10 Scan d'extérieur en Noir et Blanc – 7/10 Scan de précision (petits objets) – 7/10

Figure 3 : Résumé des caractéristiques des 3 scanners et principaux chantiers sur lesquels les utiliser

3.2 Etude comparative des logiciels

Outre les appareils d'acquisition 3D, Alpes Topo dispose également des logiciels constructeurs correspondant à chacun des trois scanners qu'elle possède. Ainsi, Scene de Faro, RealWorks de Trimble, et LaserControl de Zoller+Fröhlich ont donc été testés afin de déterminer l'efficacité de chacun de ces logiciels.

3.2.1 Import des fichiers

La première étape de tout traitement 3D passe par l'import des fichiers. Même si cette étape reste facile et ne demande pas de connaissance particulière, il convient de s'intéresser aux formats de fichiers que l'on peut importer sur ces logiciels :

Logiciel	Format de fichiers acceptés
Faro Scene	Faro (.fls)
Zf LaserControl	Zf (.zfs)
Trimble RealWorks	Faro (.fls), ZF (.zfs), Trimble (.tzf)

Figure 4 : Formats de données d'entrée acceptés par les différents logiciels

Ce premier point permet donc de mettre en évidence l'apport du logiciel RealWorks comparativement aux deux autres logiciels, puisque celui-ci permet d'importer et donc de traiter les données issues des trois scans possédés par Alpes Topo, contrairement aux deux autres logiciels.

3.2.2 Efficacité du recalage des scans

Pour cette seconde étude, nous nous sommes intéressés au recalage des scans, permettant d'assembler les différents scans acquis en un seul bloc représentant la totalité de l'objet ou du bâtiment mesuré. Les chantiers tests étant actuellement un cours, nous avons ici réalisé un test de six scans des bureaux de l'agence d'Alpes Topo avec chacun des trois appareils à une résolution très proche (12,3mm entre deux points à 10m pour le Faro X130, 15mm à 10m pour le Trimble TX3 et 12,57 mm à 10m pour le ZF 5016), nous avons ensuite réalisé un recalage des nuages de points issus de chaque appareil sur le logiciel constructeur adapté.

Outre la précision de recalage affichée dans les rapports, il convient également de se pencher sur la vitesse d'import des fichiers, ainsi que sur la vitesse de recalage des scans.

On obtient les résultats suivants :

Logiciel	Vitesse d'import + recalage	Précision du recalage (moyenne des écarts nuage à nuage)
Faro Scene	50 secondes	3mm
ZF LaserControl	40 secondes	2mm
Trimble RealWorks	1 minute 10 secondes	1mm

Figure 5 : Evaluation de l'efficacité du recalage de chaque logiciel

On remarque alors que la précision est meilleure pour RealWorks, avec un écart constaté de 30 secondes par rapport au logiciel LaserControl pour ce jeu de données. Cela s'explique par le fait que RealWorks effectue d'abord une étape de « prétraitement » des scans afin de pouvoir ensuite les traiter.

3.2.3 Précision du géoréférencement

Pour cette étude, lors des scans, nous avons placé plusieurs damiers à des endroits différents de la pièce, préalablement relevés en coordonnées (fictives) grâce à un tachéomètre. Sur huit damiers, cinq ont été utilisés pour le géoréférencement, et trois comme points de contrôle auxquels on a comparé les coordonnées post-géoréférencement des trois logiciels, aux coordonnées fictives relevées au tachéomètre :

Damiers	Écarts sur Scene X - Y - Z (mm)	Écarts sur LaserControl X - Y - Z (mm)	Écarts sur RealWorks X - Y - Z (mm)
1	3 - 2 - 1	2 - 2 - 0	1 - 2 - 2
2	0 - 2 - 2	1 - 1 - 1	0 - 1 - 1
3	3 - 2 - 4	2 - 3 - 2	2 - 1 - 2

Figure 6 : Écarts en position (valeur absolue) post-géoréférencement de 3 damiers sur chacun des logiciels

4 Conclusion et Perspectives :

L'objectif de ce PFE était d'effectuer une étude comparative des scanners et des logiciels afin de rédiger des procédures pour une utilisation optimisée du matériel possédé par l'entreprise. A l'heure actuelle, un chantier test à Lyon est en cours pour appliquer les procédures et tester les logiciels et appareils sur un nombre plus conséquent de scans. Cette meilleure connaissance du matériel permettra alors au pôle scanner 3D de savoir quel type d'appareil et de logiciel utiliser selon le chantier afin d'optimiser le temps d'acquisition et de traitement et ainsi de rentabiliser au maximum les différentes étapes d'acquisition et de traitement 3D des données.

Intégration de modules de suivis et de gestion des activités d'urbanisme opérationnel et d'ingénierie en infrastructures dans un PGI (Progiciel de Gestion Intégrée) développé en interne

PFE présenté par : **Tanguy Signardie**
Société d'accueil : **Cabinet BAUR**
Directeur de PFE : **Xavier Louveau**
Correcteurs : **Emmanuel Alby**
Jacques Ledig



1. Contexte de l'étude :

Le cabinet de géomètre-expert Baur de Haguenau réalise tous types de travaux traditionnels liés à la profession de géomètre-expert. Il s'est cependant ouvert depuis six ans à la maîtrise d'œuvre en infrastructures. C'est M. Louveau qui est en charge de ces activités de bureau d'études, qui s'articulent principalement autour de l'aménagement urbain, des infrastructures VRD (Voirie et Réseaux Divers), de la conception routière, etc. Le succès de cette activité a amené le cabinet à vouloir adapter ses méthodes de travail afin de gagner en efficacité dans la gestion des affaires, en termes de temps, mais aussi, et surtout, vis-à-vis de la responsabilité engagée, et des données à fournir dans le cadre de la prestation proposée.

L'objectif du sujet est ainsi la mise en place des outils permettant cette transition. Cela passe donc principalement par « l'intégration de modules de suivis et de gestion des activités d'urbanisme opérationnel et d'ingénierie en infrastructures dans le PGI développé en interne. »

Le cabinet dispose en effet d'un PGI, pour Progiciel de Gestion Intégrée. C'est un outil informatique développé au sein du cabinet permettant la gestion des processus de l'entreprise en s'appuyant sur une base de données commune à tous les services. Ce dernier n'est en revanche prévu que pour les missions traditionnelles du géomètre. Il n'y a donc pas d'outils spécifiquement adaptés à la maîtrise d'œuvre en infrastructures, qui demande pourtant une méthodologie bien différente. Mon rôle a donc été de concevoir et de mettre en place ces outils de gestion et de suivi des activités de maîtrise d'œuvre dans le PGI.

2. Déroulement du projet :

Un certain nombre d'étapes préliminaires a été nécessaire avant la mise en place de ces modules.

La première étape a été l'étude bibliographique des textes de loi relatifs à l'urbanisme et la maîtrise d'œuvre, dans le but de bien définir la mission, les rôles et les responsabilités des divers intervenants. Il s'en est suivi l'analyse des dossiers antérieurs réalisés par le cabinet, en termes de gestion, de structures et de contenu. Ce n'est qu'une fois que la théorie relative à la mission de maîtrise d'œuvre, au travers des textes de loi, et son application, au travers des dossiers réalisés, ont bien été comprises que l'on peut s'intéresser au développement des modules à intégrer dans le PGI en place.

La phase de développement s'articule elle aussi en plusieurs étapes. Elle commence par l'étude de la solution de gestion des affaires en place, à savoir le PGI. La compréhension de sa structure et la maîtrise des langages informatiques qui le composent sont primordiales pour pouvoir programmer et y intégrer les modules de suivi relatifs à la maîtrise d'œuvre. Il reste alors à définir le contenu des modules et la façon de les implémenter, pour ensuite les développer et les mettre en fonction dans le PGI après approbation. Viennent alors les tests du fonctionnement des modules sur des dossiers antérieurs et des corrections à apporter aux modules. Enfin, la dernière étape consiste à dresser le bilan et les perspectives d'évolution.

3. Étude bibliographique :

De nombreux textes de loi, ouvrages encyclopédiques, études et articles de revues de presse professionnelle relatifs à la maîtrise d'œuvre existent. C'est cependant la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée, plus communément appelée loi MOP, qui définit au mieux la mission de maîtrise d'œuvre. Elle sert en effet aujourd'hui de base aux projets d'aménagement en définissant et en séquençant les rôles des divers intervenants. Sa bonne compréhension s'avère ainsi nécessaire pour bien mieux transcrire les éléments de mission en modules de suivi de mission de maîtrise d'œuvre.

Il en ressort de cette étude, au regard de ce que dit la loi et des types de missions de maîtrise d'œuvre réalisées par le cabinet, que les activités d'urbanisme VRD et d'ingénierie en infrastructures échappent pour la plupart au cadre d'application la loi MOP. En effet, cette dernière ne s'applique pas aux maîtres d'ouvrages privés, qui constituent plus de la moitié des clients de ces missions. D'autre part, la loi définit une mission de base obligatoire pour les ouvrages de bâtiments, mais elle fournit une simple recommandation pour les ouvrages d'infrastructures. Enfin, nous pouvons encore noter que la loi précise qu'elle ne s'applique pas aux lotissements ou aux Zones d'Aménagement Concerté.

Il en ressort cependant que, bien qu'elle ne soit pas toujours obligatoire, la loi MOP sert de repère à toute mission de maîtrise d'œuvre. En effet, cela peut être soit le client qui puisse exiger par le contrat, d'appliquer cette dernière, ou le maître d'œuvre qui recommande d'opérer selon cette loi. Elle fait en effet gage d'une certaine démarche de qualité et garantit une transparence des coûts.

Cette étude bibliographique a aussi permis, de par la lecture des décrets d'application de cette loi MOP, de séquencer les éléments de mission de maîtrise d'œuvre (voir figure 1).

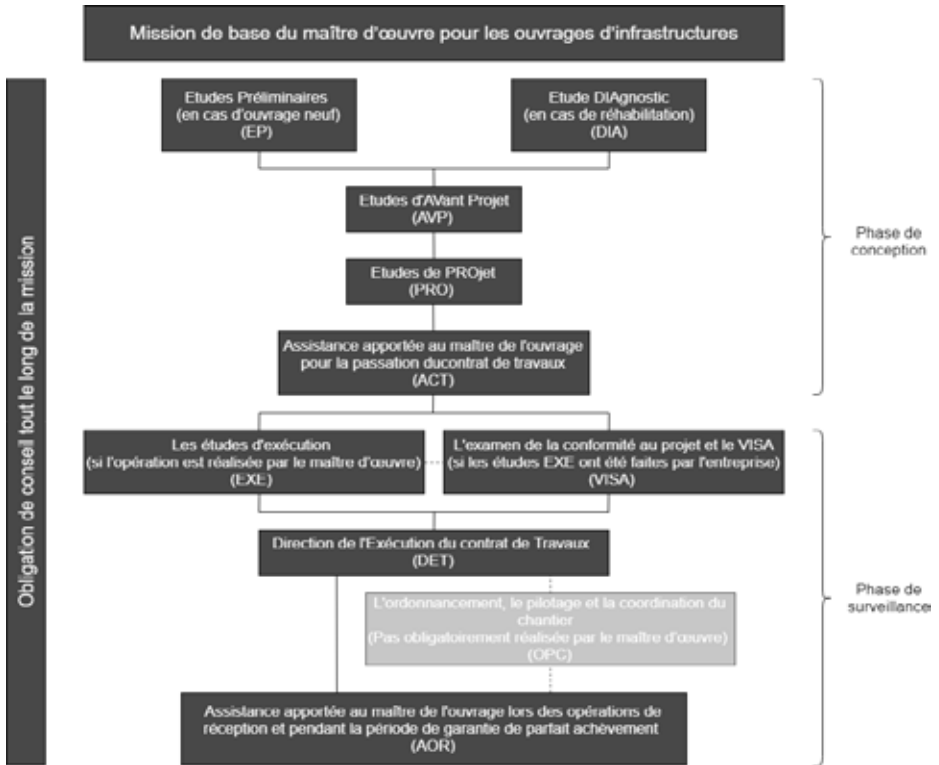


Figure 1 : Tableau de synthèse de la mission de base du maître d'œuvre pour les ouvrages d'infrastructures

Ce graphique a servi de fil directeur à la création des modules de suivi. En effet, le fait de décomposer une mission en sous-ensembles est une étape clef dans l'amélioration de sa gestion.

4. Etude du PGI

Le PGI en place forme un ensemble de documents et de programmes destiné au suivi de l'activité du cabinet. Il constitue une base documentaire sur les méthodes de traitement des plans, sur le matériel employé, les outils développés pour un usage précis, et a pour but d'offrir des outils communs pour les différentes tâches courantes telles que le suivi des courriels, l'archivage des fichiers, la recherche d'un dossier et des fichiers informatiques associés, la facturation, le suivi des étapes de la réalisation des procès-verbaux d'arpentage, et des esquisses, ou pour la recherche des documents qui ont déjà été utilisés lors de dossiers précédents.

Le PGI se présente sous la forme d'un site intranet et extranet, c'est à dire que c'est une application web consultable sur un navigateur internet (voir figure 2) depuis un poste connecté au réseau informatique à l'intérieur du cabinet, mais il est également accessible depuis l'extérieur par redirection de ports. Il nécessite de passer par un portail d'authentification permettant de limiter l'accès à des fonctionnalités selon l'utilisateur.

Il est composé d'un programme Java connecté à une base de données MySQL et rendu accessible par un serveur Tomcat tournant sous Linux. En résumé, le PGI s'appuie sur un noyau Java comportant les services communs à toutes les Pages JavaServer (JSP) composant l'application et permettant de créer dynamiquement des pages web. Cette technique permet de mêler des méthodes Java servant entre autres à gérer des objets, d'y intégrer du SQL pour la gestion de la base de données, du Javascript pour certaines interactions telles que l'affichage d'infobulles et les boutons cliquables. Les JSP contiennent également du HTML qui définit ce qui sera affiché sur la page web et du CSS qui définit comment ces éléments HTML seront affichés. Le serveur compilera le code source des JSP pour en produire un code HTML qui sera interprété par le navigateur internet et qui affichera la page vue par l'utilisateur.



Figure 2 : Aperçu d'une page de synthèse d'un dossier dans le PGI. On y retrouve le résumé du dossier, l'avancement de procédures en cours, la liste des fichiers informatiques, les courriels relatifs au dossier, etc.

5. Développement du PGI :

La première étape a été la mise en place de l'environnement de développement. Il a donc fallu installer Linux openSUSE et tous les logiciels nécessaires au fonctionnement du PGI sur une machine virtuelle fonctionnant sous Windows. Chaque modification apportée nécessitant son redémarrage, une copie du PGI a été réalisée pour pouvoir travailler dessus en local sans perturber le fonctionnement du site intranet pour les employés du cabinet. Ce n'est qu'une fois les ajouts majeurs intégrés et que l'application a été testée et estimée stable, que cette version pourra être mise en place pour tout le cabinet.

La compréhension de la structure du PGI a alors été une étape longue mais essentielle. Il a fallu en effet comprendre et suivre la même logique de programmation que celle en place pour faciliter sa maintenance.

Il a également fallu dresser le contenu détaillé des modules à intégrer pour réfléchir à l'approche de programmation. La bonne compréhension des missions de maîtrise d'œuvre et de la manière dont les employés du cabinet traitent ces affaires et la participation active aux missions ont alors été d'une grande aide. Il est en effet primordial de bien connaître les besoins des utilisateurs pour que les modules leur soient adaptés et utiles. Il est aussi nécessaire d'anticiper leurs besoins futurs en adaptant la manière de programmer pour que les modules soient évolutifs en étant facilement modifiables.

Sept modules ont ainsi été mis en place, issus de la synthèse des étapes de réalisation selon la loi MOP, et du mode de réalisation d'une mission selon le cabinet. On retrouve ainsi : le suivi des Déclarations de projet de Travaux (DT), ayant lieu avant même la demande du Permis d'aménager, celui des Etudes Préliminaires (EP), de l'Avant-Projet (AVP), des études de Projet (PRO) et d'Exécution (EXE), l'Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (ACT), la Direction de l'Exécution des contrats de Travaux (DET) et l'Ordonnancement et le Pilotage du Chantier (OPC).

La mise en place de chaque module suivait alors pour chacun le même principe général. A savoir :

- L'éventuel ajout d'une table correspondant à l'objet dans la base de données MySQL (Concessionnaire, réunions, etc.). Mais aussi la définition des champs correspondant aux valeurs des variables à enregistrer dans le module (nom du concessionnaire, date d'envoi, date de retour, notes, remarques, etc.)
- L'éventuelle mise en place du constructeur de l'objet (Concessionnaire, Réunions, etc.) et l'ajout des accesseurs et des mutateurs correspondant à ces valeurs.
- La programmation HTML permettant l'affichage des différents éléments composant le module
- La programmation et l'adaptation des diverses fonctions Java utilisées (récupérer la date du jour, formater les dates, montant et textes afin d'éviter les erreurs d'enregistrement)
- La programmation via des événements Javascript et les fonctions correspondantes pour les boutons d'ajout, de modification, de sauvegarde et de validation, et pour les infobulles au survol de la souris.
- La création de feuilles de style en CSS pour les textes, boutons, titres, cadres, tableaux, etc.

6. Résultats :

Les modules se veulent simples et efficaces de sorte à ne pas surcharger l'interface et pouvoir voir clairement et rapidement l'état d'avancement de la phase.

Ainsi, d'un point de vue fonctionnel, chaque champ mis en place répond à un besoin précis, à savoir qui sont les concessionnaires de réseaux concernés par le projet, quelle tâche a été effectuée, quand a-t-elle été réalisée, à combien est estimé le coût du projet, etc.

D'un point de vue visuel, un code couleur a été mis en place pour plus de clarté de sorte à repérer rapidement les étapes validées et celles à réaliser. Dans la même logique, la validation d'une étape empêche d'y effectuer des modifications et élimine les éléments d'interface indiquant que les champs sont éditables pour éviter toute surcharge et simplifier la lecture.

Enfin, du point de vue de l'utilisateur, les modules doivent pouvoir être saisis rapidement. En effet, ils doivent être un atout et certainement pas une contrainte. Ainsi, la saisie des dates peut se faire automatiquement à la date du jour en un clic. De plus, des méthodes ont été mises en place pour corriger automatiquement le format des prix, des dates et des remarques pour s'assurer du bon enregistrement de ces derniers. Le survol de la souris sur un bouton affiche une bulle d'aide facilitant l'utilisation des modules. Par ailleurs, un système de droits d'accès a été mis en place pour que seuls certains employés puissent avoir accès à l'édition des champs, tandis que les autres ne pourront que les consulter.

L'ajout de ces modules a amené naturellement d'autres changements. En effet, l'affichage de ceux-ci doit se faire uniquement pour les dossiers de maîtrise d'œuvre. Un moyen de les distinguer des autres a ainsi dû être mis en place au niveau de la base de données ce qui a permis de réaliser facilement un outil de recherche et de classement de ces dossiers. De même, il a été question de définir l'apparence de ces modules (figure 3). La réussite de ces derniers a amené à étendre à l'ensemble du PGI ce style plus moderne, mieux organisé et en accord avec la charte graphique du cabinet.



Figure 3 : Aperçu du premier des 7 modules de suivi de missions de maîtrise d'œuvre : le suivi des Déclarations de projet de Travaux

7. Conclusion et perspectives :

Ce projet de fin d'études a permis de préciser les responsabilités du maître d'œuvre vis-à-vis de la loi en termes de documents à fournir au maître d'ouvrages. Il a également permis de remettre en question la manière d'aborder une mission en mettant en place, par exemple, des documents aidant ou automatisant certains calculs de dimensionnement d'ouvrages VRD. Il a aussi, et surtout, permis de mettre à jour le PGI en y mettant en place des modules de suivi et de gestion des activités d'urbanisme opérationnel et d'ingénierie en infrastructures adaptés aux besoins du cabinet.

Il reste alors à voir comment seront utilisés ces modules sur différentes missions et par les différents employés. Il faudrait alors être à l'écoute de leurs retours pour compléter ces modules, en mettant en place par exemple une interaction entre le PGI et des fichiers et logiciels de maîtrise d'œuvre externes.

Optimisation des méthodes de levés de bâtiments au scanner laser statique et dynamique

PFE présenté par : **Yannick BERARD**
Société d'accueil : **GEOFIT EXPERT**
Directeur de PFE : **François FOREAU**
Correctrice : **Tania LANDES**

GEOFIT
EXPERT

1. Introduction

1.1. Motivation de l'entreprise

GEOFIT EXPERT développe depuis de nombreuses années son activité dans le secteur de l'immobilier au travers notamment du service patrimoine, service au sein duquel j'ai été affecté pour la réalisation de ce PFE. Ce service accompagne des gestionnaires publics ou privés pour les aider à :

- créer, compléter ou mettre à jour leurs bases de données patrimoniales
- certifier et sécuriser leur patrimoine dans le cadre de gestions locatives ou de ventes
- fournir les mesures et plans de l'existant, nécessaires à tous types de travaux

Les différents champs de compétences de ce service sont la réalisation de maquettes numériques 3D, de plans de bâtiments (plans-masses – plans d'intérieurs – plans de façades – coupes – élévations), de plans de copropriétés et de divisions en volumes, mais aussi la certification de surfaces.

Depuis maintenant plusieurs années, le service patrimoine réalise la quasi-totalité de ses levés de bâtiments au scanner laser statique, méthode donnant des résultats très satisfaisants et précis. Cela permet notamment d'éviter les fautes ou ambiguïtés qu'il peut y avoir avec un levé classique au distancemètre, d'autant plus que l'entreprise réalise la majeure partie de ses levés sur des bâtiments de grande ampleur telle que des lycées ou des immeubles entiers. En outre, c'est une méthode qui peut être contrôlée par l'ajout de cibles et le géoréférencement de celles-ci.

Cependant, le scanner laser statique est une méthode qui reste assez longue en temps d'acquisition et même parfois en temps de traitement des nuages de points. De plus, l'arrivée de nouvelles technologies qui font parler d'elles, le marché de la concurrence qui est de plus en plus fort ainsi que le souhait de l'entreprise de proposer des solutions à la pointe de la technologie pour ses clients, ont poussé le service à chercher d'autres méthodes de levés de bâtiments. C'est ainsi que GEOFIT EXPERT s'est projetée sur l'utilisation de scanners lasers dynamiques, également appelés scanners lasers mobiles, tels que le ROBIN de 3DLM ou le ZEB-REVO de GEOSLAM.

Ce sont donc toutes ces raisons qui ont décidé l'entreprise à proposer ce sujet de PFE afin de tester ces différents scanners, d'essayer d'en comprendre les limites, les défauts ainsi que les précisions que l'on peut en tirer, avec finalement pour objectif d'optimiser leurs méthodes de levés de bâtiments.

1.2. Objectifs du projet

Les objectifs de ce PFE sont donc d'expérimenter les différents types de scanners cités plus haut, afin de les définir de façon qualitative et quantitative, que ce soit en termes de précision et de visibilité du nuage, de cadence, mais aussi de coût. Cette notion de cadence, prend en compte le temps d'acquisition terrain, mais également le temps de traitement bureau pour la production du nuage de points avant dessin. Il convient ensuite de synthétiser en fonction de cela, la meilleure combinaison possible d'utilisation de ces scanners pour réaliser des levés d'intérieurs seuls, mais également des levés de bâtiments complets.

Tout cela en essayant de répondre au mieux aux besoins de sa clientèle dans un temps et un coût optimal, et ce, pour les deux principales classes de précisions que cherche à obtenir l'entreprise pour leurs livrables. En effet, le service souhaite toujours réaliser une représentation la plus exacte possible des bâtiments levés afin d'assurer une précision globale ne dépassant pas 1cm pour des maquettes ou des plans servant à des rénovations ou à des réhabilitations ainsi qu'une précision globale n'excédant pas 3cm pour tous les autres plans faisant référence à la gestion courante de patrimoine.

2. Premiers résultats sur les tests des scanners

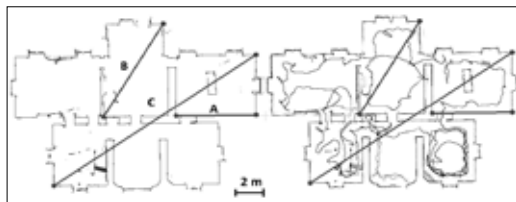
Les différents tests ont été réalisés en comparaison à des levés de scanners statiques faits au FARO FOCUS S150 que nous considérons comme référence. Nous nous permettons cette comparaison, car nous pouvons considérer que le scanner statique FARO a une précision inférieure au centimètre. En effet, d'après les données constructeur, ces types d'appareils ont une erreur de mesure de ± 1 mm pour une distance d'environ 10 à 25 mètres. Cette erreur de mesure correspondant alors à une erreur systématique intrinsèque au scanner. De plus, dans le cadre de levés réalisés dans de bonnes conditions et en respectant la méthodologie recommandée, le résultat de l'assemblage des différentes stations reste dans une précision inférieure au centimètre.

Dans nos différents tests, nous quantifions alors l'exactitude des nuages de points acquis par scanner laser dynamique à partir des écarts en distance mesurés entre ces nuages et les nuages obtenus par scanners laser statiques.

2.1. Scanner dynamique ZEB-REVO de GEOSLAM

En ce qui concerne le ZEB-REVO, les constructeurs annoncent une exactitude relative de 1 à 3 cm ainsi qu'une exactitude de positionnement absolue de la trajectoire de 3 à 30 cm (pour 10 minutes d'acquisition et en effectuant une boucle). Cette moins bonne précision par rapport au scanner laser statique s'expliquerait en raison de la nature de la collecte de données [English Heritage, 2011]. En effet, la prise en compte d'erreurs telles que le positionnement et le calcul de trajectoire, sur lesquels est basé l'algorithme du SLAM, a tendance à détériorer d'autant plus la précision globale de l'acquisition d'un levé, mais également à générer du bruit sur le nuage.

Nous avons donc réalisé la comparaison sur le Château de la Bagatelle à Nantes. Le site s'y prêtait très bien puisqu'il était inoccupé et partiellement vidé avant travaux, donc moins de risque de fausser ou gêner les acquisitions. De plus, nous avons pu effectuer les deux acquisitions en quasi-simultané entre le scanner FARO et les ZEB-REVO pour être sûr d'avoir les mêmes conditions de scans.



	Mesure de contrôle (m)		
	A	B	C
FARO	5,967	8,733	18,385
ZEB-REVO	5,959	8,730	18,397

Figure 1: Premier étage vu en plan du château de la Bagatelle acquis au scanner FARO à gauche et au scanner ZEB-REVO à droite (trajectoire visible en noir) et tableau statistique comparant les mesures de contrôles faites sur les deux nuages de points

En superposant les deux nuages par une méthode ICP et en appliquant une comparaison de distance de nuage à nuage sur le logiciel CloudCompare, nous pouvons alors déterminer l'exactitude du levé au ZEB-REVO par rapport au levé FARO comme présenté dans le tableau ci-dessous.

Premier étage brut			
Diff intervalles	Nb de points	Pourcentage (%)	Intervalle de distance (cm)
1	14452134	68,5	0 - 1
2	4855458	23,0	1 - 2
3	692071	3,3	2 - 3
4	194676	0,9	3 - 4
5	123732	0,6	4 - 5
6	780165	3,7	> 5
Nb Pts Total	21098236		
		Dist moyenne (cm)	0,9

Après analyse, nous pouvons constater que la moyenne des écarts de distance sur l'ensemble des points du nuage du ZEB-REVO est de 0,9 cm par rapport à ceux du nuage FARO.

Figure 2: Tableau statistique issu de la comparaison du nuage de points du ZEB-REVO par rapport au nuage référence provenant du FARO

De plus, 94,8% des points du nuage ont un écart de distance inférieure à 3 cm par rapport à ceux du FARO. À savoir que la majeure partie des points supérieurs à cette distance de 3 cm sont soit des points aberrants, soit des zones du nuage de points qui étaient visibles sur celui du ZEB-REVO mais pas sur celui du FARO.

En effet, par le fait que ce dernier soit dynamique et plus maniable, il permet d'accéder et de scanner certaines zones qui sont plus difficiles avec le scanner FARO.

En débruitant ce même nuage de points, nous avons constaté que nous pouvions aussi légèrement améliorer notre précision même si cela enlève un certain nombre de points. En effet, la moyenne des écarts de distance sur l'ensemble des points passe alors à 0,8 cm par rapport à ceux du nuage FARO. De plus 76,4% des points ont alors une distance inférieure à 1 cm pour 68,5% avant débruitage.

Finalement, nous avons également pris plusieurs mesures de contrôles (les côtes A, B et C visibles sur la figure 1) sur les deux nuages afin de vérifier nos précédents résultats. Nous constatons que les écarts de distances sont inférieurs à 1 cm pour les mesures A et B, tandis que la mesure C comporte un écart de 1,2 cm. Toutefois cette dernière représente une côte allant d'un bout à l'autre de l'étage.

Nous pouvons ainsi confirmer aisément l'exactitude relative annoncée par le constructeur avec dans notre cas un peu moins de 70% des points qui ont des écarts de distances inférieures à 1 cm tandis que les écarts pour la quasi-totalité des points sont inférieurs à 3 cm.

2.2. Scanner dynamique ROBIN de 3DLM

Pour ce qui est du ROBIN, les données constructeur sont un peu moins claires en ce qui concerne la précision du système dynamique. Les seules informations données concernent la précision intrinsèque du scanner qui est de 3mm, ainsi qu'une performance de positionnement de 2cm qui correspondrait à l'exactitude absolue du positionnement du système GNSS/IMU. Ce type de scanner multimode, peut être utilisé en mode sac à dos, en voiture, train ou alors en hélicoptère. Il est déjà utilisé depuis plus d'un an par le service sites et industries de la société GEOFIT dans le cadre de levés extérieurs de type routier, ferroviaire ou aérien. Cependant, il est encore très peu utilisé dans le cadre de levé de bâtiments complets, alors que ce système dispose du mode sac à dos pour réaliser des acquisitions dans des zones moins accessibles.

Nous avons donc réalisé un test sur notre cas d'étude principale, en réalisant l'acquisition des façades du bâtiment principal de GEOFIT à l'aide du ROBIN, et en comparant ces dernières au même levé réalisé au FARO.

Façades du bâtiment de GEOFIT au FARO

Diff intervalles	Nb de points	Pourcentage (%)	Intervalle de distance (cm)
1	2715002	17,6	0 - 1
2	1916669	12,4	1 - 2
3	1530946	9,9	2 - 3
4	1758501	11,4	3 - 4
5	1256636	8,1	4 - 5
6	6274543	40,6	> 5
Nb Pts Total	15452297		
		Dist moyenne (cm)	8,9

Après analyse des résultats, nous avons tout de suite constaté un écart assez grand entre les valeurs du ROBIN et celle du FARO. En effet, la moyenne des écarts de distance sur l'ensemble des points est de 8,9 cm par rapport à ceux du nuage FARO et seulement 40% des points ont une distance inférieure à 3 cm.

Figure 3: Tableau statistique issu de la comparaison du nuage de points du ROBIN par rapport au nuage référence provenant du FARO

De même, comme le montre la figure 4 ci-après, en prenant une même mesure sur les deux nuages de points différents, on constate un écart de mesure d'un peu plus de 10 cm.

Ces écarts s'expliqueraient par une mauvaise configuration du système d'acquisition sur le support sac à dos, avec une distance de séparation entre les deux antennes GNSS qui serait trop courte. L'autre raison serait également que la méthode d'initialisation serait mal adaptée. En effet, comme indiqué sur leur documentation [3DLASERMAPPING (2018)], d'une manière générale, une bonne initialisation consiste en de nombreux mouvements dynamiques, comprenant des virages et des accélérations sur les trois axes IMU, afin de les aligner avec une grande précision. Or lorsque l'on observe le graphique de la figure 4, on constate qu'après traitements, les valeurs de biais gyroscopique selon les trois axes restent beaucoup trop élevées. Dans le cas d'une bonne initialisation, les trois courbes devraient être pratiquement superposées les unes sur les autres et proches de 0 deg/h comme valeur de biais, ce qui n'est pas le cas ici.

Malgré une marche rapide, la phase d'initialisation ne serait pas réalisée à une vitesse suffisante pour obtenir de bonnes valeurs. C'est pourquoi l'entreprise est en train d'imaginer et de développer un système d'utilisation de ce scanner sur vélo, d'autant plus que le mode sac à dos pèse quand même assez lourd et que les opérateurs ayant réalisé les premiers tests d'acquisitions se sont plaints de mal de dos. Cela n'était donc pas envisageable à long terme.

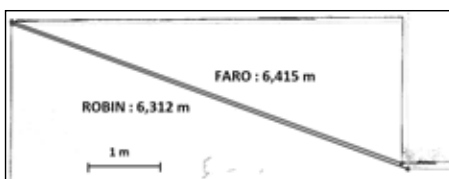
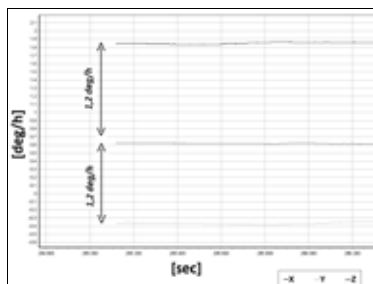


Figure 4: Graphique représentant les biais du gyroscope de la centrale inertielle en fonction du temps à gauche et une illustration du décalage observé sur l'acquisition au ROBIN en haut à droite

3. Synthèse des méthodes d'acquisition appliquées au cas d'étude : GEOFIT

Les différents résultats de cette synthèse des méthodes d'acquisition se basent sur le cas d'étude, grandeur nature, réalisée à l'intérieur des locaux de GEOFIT, ce qui correspond à l'ensemble du rez-de-chaussée ainsi qu'aux façades du bâtiment principal.

3.1. Levé intérieur

L'acquisition de l'ensemble du rez-de-chaussée nous a pris 6 heures de terrains pour une certaine de scans avec le FARO tandis que l'acquisition avec le ZEB-REVO a été réalisée en 2 heures, en comptant le temps de préparation du trajet. Pour le temps de traitement bureau nous avons mis un peu moins d'une journée pour effectuer l'assemblage des différents scanners alors que cela a pris un peu plus de deux heures pour calculer les acquisitions réalisées au ZEB-REVO. Ainsi, en plus de diviser par trois le temps d'acquisition et d'assemblage, cela réduirait également le coût de production de l'entreprise d'un facteur 3.

Les valeurs d'exactitude du nuage de points sont dans ce cas-là légèrement moins bonnes que pour le précédent test, avec 93,4% des points ayant une distance inférieure à 3 cm par rapport à ceux du FARO. Cela s'explique par le rajout de contraintes pendant les levés, dû notamment à la présence de personnes et le déplacement de certains objets.

3.2. Levé extérieur

Bien que le système actuel ne permette pas de garantir une précision souhaitée, le ROBIN a permis de réaliser l'acquisition de l'ensemble des façades du bâtiment en un peu moins d'une heure avec en plus une demi-heure de calcul. En comparaison, l'acquisition au FARO a été effectuée en 3 heures pour 2 heures de traitement de nuage de points. Cela permettrait à l'entreprise de diviser quasiment par deux ces coûts de production pour ce type de levés.

4. Conclusion et perspectives

De manière générale, le ZEB-REVO semble être la solution la mieux adaptée, rapide et à moindre coût pour un levé d'intérieur qui correspondrait à un livrable n'excédant pas une précision globale de 3cm. En effet, cette méthode d'acquisition permet d'optimiser par un facteur 3, le temps et le coût d'un levé. Toutefois il ne faut pas oublier que la qualité des données extraites dépend en majeure partie de la qualité de la trajectoire et du respect des conditions de bon fonctionnement du SLAM. De plus, certains types de plans demandent de représenter tous les éléments de mobiliers fixes dans un bâtiment. Cela peut être problématique pour la phase de dessin puisque ce scanner dynamique dispose uniquement de la projection des images vidéos sur la trajectoire réalisée et non pas de vues panoramiques comme avec les FARO, qui facilitent grandement la détection et la reconnaissance des différents éléments à représenter. Notre étude cherchera donc également à trouver la méthode d'acquisition adéquate pour répondre à ce besoin tout en respectant les conditions de levé, même si l'évolution prochaine du ZEB-REVO avec un lecteur de codes-barres pourrait répondre à ce besoin.

Finalement, pour le moment, le scanner statique semble être indispensable pour le levé de façades extérieures même si le développement à venir du système cyclable avec le ROBIN laisse de grands espoirs au sein du service pour pouvoir optimiser davantage les levés de bâtiments.

Références:

3DLASERMAPPING (2018) 'Mobile Mapping Tips and Tricks', 2017(December 2017), pp. 1–12.
English Heritage (2011) '3D Laser Scanning for Heritage', pp. 1–41.

Valorisation de l'utilisation de systèmes de réalités virtuelles et augmentées pour la détection de réseaux, l'aménagement de lotissement et la promotion immobilière.

PFE présenté par : **Vincent CASAURANCQ MINVIELLE**

Société d'accueil : **GEOSAT**

Directeur de PFE : **Bertrand CHATIN**

Correcteur : **Tania LANDES**



1. Introduction

1.1 Contexte

Les nouvelles technologies évoluent rapidement. Parmi elles, on compte les réalités virtuelles et augmentées. En touchant plusieurs secteurs, comme la topographie, elles offrent de nombreuses possibilités : facilitation du travail à faire, meilleure visualisation et compréhension des phénomènes ... En connaissance de cause, l'entreprise GEOSAT cherche à mettre en valeur son travail par leurs intermédiaires. Quatre types de réalités méritent d'être définies :

- **Réalité virtuelle (RV)** : technologie informatique permettant l'immersion d'un utilisateur dans un univers 3D, visant à simuler un environnement réel à l'aide de divers dispositifs, tels que des casques spécifiques pour téléphones, ordinateurs ou consoles, par l'intermédiaire d'écrans ou d'hologrammes.
- **Réalité augmentée (RA)** : technique permettant de visualiser des informations (textes, images ...) virtuelles superposées au monde réel dans le but de l'enrichir.
- **Réalité diminuée (RD)** : technique permettant de retirer des composants réels (murs, plafonds ...) afin de voir les éléments à l'arrière.
- **Réalité mixte (RM)** : fusion du monde réel et virtuel : on visualise un objet virtuel dans le monde réel dont les caractéristiques deviennent les mêmes que s'il était réel, on peut interagir avec lui.

1.2 Objectif

Dans le cadre de ce projet, le travail se porte sur les deux premiers (RV et RA). Trois objectifs sont fixés. Le premier est d'utiliser la réalité augmentée pour visualiser des réseaux enterrés. Les deux autres sont l'utilisation de la réalité virtuelle pour mettre en avant des bâtiments lors de promotions immobilières ou de lotissements.

Pour les lotissements, l'entreprise souhaite apporter un outil décisionnel fort aux mairies. En effet, il sera plus simple pour les élus de convaincre et valider un projet de lotissement, en faisant une visite virtuelle, ayant ainsi un avant-goût du rendu final.

Pour la promotion immobilière, l'intérêt est de pouvoir faire découvrir aux acheteurs potentiels un bâtiment. Les avantages sont nombreux : possibilité d'effectuer des visites de plusieurs maisons à la fois, d'en changer instantanément la décoration, sans obligation de se rendre sur le terrain. De plus, on peut également visiter des maisons non construites dessinées en 3D qui n'auraient été visibles qu'en 2D sur plan.

Enfin, pour les réseaux enterrés, les buts sont divers. Tout d'abord, il faut pouvoir détecter sur le terrain la position de la canalisation. Ainsi, les chefs de chantier pourront voir plus précisément où creuser et donner leurs instructions avec plus de clarté. Les plans actuels de réseaux en 2D sont assez complexes, le passage en RA facilitera donc la compréhension des réseaux. Enfin, l'actuel système de communication des réseaux sur le terrain consiste à marquer au sol les instructions avec de la peinture aérosol. Celles-ci disparaissent avec le temps et la pluie et durant la période de travaux (lors du retrait

de la couche superficielle). L'application pourra permettre de conserver l'information et de pouvoir la consulter facilement. Il faut noter qu'une forte législation encadre les travaux sur les réseaux enterrés : code de l'environnement, article 23 et 25 de l'arrêté du 12 février 2012 ... Que ce soit au niveau des intervenants (détecteurs, ouvriers, employés des fournisseurs de gaz, de télécommunications ...), qu'au niveau des normes de géolocalisation, il faut respecter de nombreuses règles. La plus importante, à prendre en compte dans cette étude, est la précision de positionnement des réseaux qui doit être inférieure à 40cm en milieu rigide, et 50 cm en milieu flexible. Il faut donc conserver cet ordre de précision lors de la visualisation en RA.

2. Réalité virtuelle dans le cas de l'étude de lotissement et de la promotion immobilière

2.1 Expérimentation

La suite du projet porte sur la partie réalité virtuelle. La mise en valeur des lotissements et des biens immobiliers nécessite deux avantages distincts. Pour le premier, il faut une vue d'ensemble harmonieuse et jouer un maximum sur la qualité graphique. Pour le deuxième, il faut pouvoir jouer sur les sensations en permettant des interactions avec le modèle, les jeux de lumière, ...

La première partie traitée fut celle sur l'entremise immobilière. En travaillant sur des modèles 3D (FBX) de l'entreprise, le but est de permettre et de faciliter la vente d'appartements. Un réaménagement pendant la visite peut être un atout indéniable. L'exemple présenté sur la figure 1 montre justement la possibilité de redécoration du mur selon ses goûts. Une quinzaine de types de textures sont disponibles. La même manœuvre a été programmée pour changer le type de meubles, de parquets ... Il faut cependant se rendre compte des limites. Plus on rajoute des éléments, des objets, des effets visuels, plus le chargement de l'image sera long, le modèle sera lourd et le rendu général en pâtira. Le modèle 3D, qui se veut réaliste, tendra finalement vers une réplique de jeux vidéo. De nombreuses solutions sont envisageables pour régler ce problème, on peut tout d'abord penser à utiliser un ordinateur plus puissant, mais le modèle dépendra des performances celui-ci. On peut utiliser d'autres logiciels avec de meilleures qualités graphiques, mais les interactions ne seront plus possibles. Celle, que l'on a considérée comme la meilleure et qui pourra être mise en place par l'entreprise, sera d'isoler chaque pièce, et de booster les qualités de chacune. On créera des points de passage de pièce en pièce qui déchargeront automatiquement celles dans lesquelles on ne se trouve pas. Le but étant d'optimiser sur une petite zone la qualité en supprimant la possibilité d'avoir une vue d'ensemble de la maison. Pour bien comprendre on peut faire une analogie avec les jeux vidéo ainsi que la notion de niveau. Chaque pièce correspond à un niveau différent chargeable depuis le précédent.



Figure 1 : Aménagement en temps réel sous Unity

La seconde partie s'est portée sur la visite de lotissements. On parle, dès lors, de grands ensembles. Dans cette optique, il est impossible de jouer sur les interactions : sur plusieurs maisons, on gaspillerait trop de « puissance ». L'idée générale, est plutôt, de permettre une visite dans les rues et de pouvoir constater de l'aménagement et de son positionnement. Il faut, contrairement au cas précédent, tout miser sur la qualité graphique. Un logiciel, respectant ces critères est Twinmotion. Une fois les modèles 3D sous format FBX importés, on peut rajouter le positionnement du lotissement. Le logiciel va générer un modèle 3D simplifié de la ville pour offrir un cadre à l'immersion. L'autre point fort est la gestion des bibliothèques. En effet, une maison seule donne un effet visuel assez vide à la scène. Cependant, avec le catalogue d'objet de Twinmotion, qui est extensible avec nos propres créations, on peut rajouter plusieurs éléments pour jouer sur le réalisme : meubles, textures, voitures, créer des itinéraires de déplacements, des piétons, des effets sonores

2.2 Résultats

L'étude sur la réalité virtuelle a apporté de nombreuses réponses. Il est effectivement possible d'exploiter tout type de modèle 3D et de les visiter. Cependant, en fonction des objectifs que l'on se fixe et de la clientèle que l'on vise, il faut savoir varier les paramètres, logiciels ... On considère qu'il faut respecter un équilibre de trois éléments majeurs : la qualité graphique, la qualité de déplacement et la qualité des animations/interactions. Il faut partir du principe que tout optimiser au maximum ne peut pas fonctionner. Si l'on prend un ordinateur récent, avec la meilleure carte graphique du marché, les meilleurs composants, alors nous pourrions avoir un très bon résultat. Cependant ce résultat ne sera pas visible par les autres ordinateurs, et notamment ceux des clients. Bien qu'ils deviennent de plus en plus performants, il faut toujours programmer et prévoir une visite pour qu'elle soit réalisée avec la configuration informatique la plus faible possible. Les risques liés à une utilisation sur un appareil moins puissants sont des lags, des nausées, un non-réalisme de la scène, que des facteurs qui ne joueront pas en notre faveur pour la mise en avant du modèle.

Sur la figure 2, à droite, on peut voir un exemple de l'utilisation de Twinmotion. Les objets basiques tels l'ordinateur, les meubles de la cuisine sont disponibles dans la bibliothèque. Le décor a également été rajouté par le logiciel. Le rendu est très réaliste et l'immersion est de très bonne qualité, pour une visite simple, on se rapproche des attentes du client.



Figure 2 : Vue d'intérieur de la maison

3. Mise en valeur des réseaux

3.1 Expérimentation

Dans cette expérimentation il faut prendre en compte plusieurs étapes importantes. La première est l'insertion du modèle 3D dans notre réalité en prenant en compte la perspective et la stabilité. En effet, s'il n'y a aucune notion de profondeur ou si l'objet disparaît facilement, alors l'intérêt de la réalité augmentée est nul : il sera plus simple de s'en passer. L'application qui a été créée pendant le projet est programmée sous Unity. Elle utilise le SDK Vuforia qui répertorie tous les scripts existants compatibles avec IOS et Android. Il est possible d'utiliser le script de détection de surface afin de récupérer automatiquement le sol via l'appareil photo du téléphone. En gérant efficacement le système de position de Unity on peut gérer facilement la visualisation de n'importe quel objet comme on le voit sur la figure 3.

Après réglage manuel des scripts standards disponibles, il est possible d'insérer cette capsule en tapant sur l'écran du téléphone. Un second contact créera une nouvelle capsule à l'endroit indiqué, supprimant la précédente. Cette étape étant rapidement validée, il est maintenant temps de s'intéresser à la seconde. Notre objectif est de recalculer un réseau entier que l'on insérerait par pression du doigt sur le téléphone. La



Figure 3 : visualisation d'une capsule sous plusieurs angles

solution la plus simple serait de faire une insertion par trois points qui ressemblerait à un recalage d'Helmert.

En prenant l'exemple d'une voiture, on peut choisir trois roues comme points d'insertion. Le script a été étudié pour fonctionner de la façon suivante :

- Détection des coordonnées GPS du téléphone.
- Décomposition de la zone de travaux en sous-zones (une insertion de petits objets est plus stable que de grands).
- Sélection des réseaux à importer en fonction de la sous-zone où l'on se trouve (déterminer approximativement avec les coordonnées GPS).
- Sélection de trois points sur l'écran du téléphone.
- Placer notre réseau selon les trois points.
- Si l'on change de sous-zone à pied, permettre le changement sur téléphone automatiquement.

3.2 Résultats

Il existe trois catégories de réalité augmentée. En fonction du travail que l'on cherche à obtenir, il faut choisir la plus pertinente. La définition de celles-ci s'appuie sur un critère simple : sur quoi réalisons-nous l'augmentation ? L'objet 3D virtuel, que l'on veut voir dans notre monde, peut soit être inséré en s'accrochant à une image, soit par rapport à un modèle 3D, soit à vide depuis l'appareil photo comme on le présente pour la sphère ou les réseaux dans la partie 3.1. Chacune de ces méthodes possède ses propres intérêts et est illustrée dans le même ordre dans la figure 4.



Figure 4 : Les différentes méthodes d'insertion en RA

Sur la figure 4, à gauche, le bâtiment de droite a été rajouté sur le décor. Au milieu, on peut voir en blanc les extensions de la maquette, visible depuis le téléphone, et à droite la voiture est rajoutée dans le jardin comme si l'on était dedans.

A la fin de ce projet, très peu de réseaux ont pu être visualisés car mettre en place les scripts d'insertion et de recalage sous Unity a été un des éléments les plus chronophages du projet. Cependant, on peut voir que des avancées sont faites et qu'on se rapproche petit à petit du rendu recherché.

4. Conclusion

Basiquement, les étapes de traitements sont très facilement réalisables. De l'obtention du nuage de point au scanner 3D, en passant par la création du modèle 3D, puis l'export sous FBX, on peut très rapidement visualiser le bâtiment que l'on souhaite. Le niveau de travail se porte plus sur l'exploitation de ce modèle 3D selon les attentes du client.

A l'issue de ce projet, il est bien possible de conclure qu'un pas a été fait vers une mise en valeur des modèles 3D et vers la visite virtuelle. Demain, il sera possible de visiter n'importe quel site ou bâtiment directement depuis chez soi sans avoir à se déplacer. Bien que la technologie ne soit aujourd'hui pas satisfaisante pour atteindre nos objectifs, de nombreux progrès ont été réalisés, et cela ne cessera de continuer. L'équilibre entre la qualité visuelle et le réalisme dans le déplacement doit encore être travaillé pour assurer l'immersion parfaite.

Ce projet montre aussi les différentes utilisations de la réalité augmentée et du plus qu'elle apporte. Bien que bluffant au premier abord, on est vite rattrapé par le problème de stabilité et de géoréférencement.

Étude et optimisation des stratégies de numérisation au scanner laser 3D, dans l'optique d'une intégration dans le système de visualisation en ligne d'infrastructures numériques Fugro Site-Spot

PFE présenté par : **Antoine GOUVERNEUR**
Société d'accueil : **FUGRO GEOID SAS**
Directeur(trice) de PFE : **Bertrand CHAZALY**
Correcteurs(trices) : **Tania LANDES**



1. Introduction

1.1. Contexte : pourquoi l'étude et l'optimisation ?

Ce projet de fin d'études, intitulé « Étude et optimisation des stratégies de numérisation au scanner laser 3D, dans l'optique d'une intégration dans le système de visualisation en ligne d'infrastructures numériques Fugro Site-Spot » est proposé par l'entreprise Fugro Geoid, qui évolue au sein du groupe international dans la ligne de service « Land Asset Integrity ».

Depuis quelques années, l'évolution du marché a demandé à l'entreprise d'être plus innovante, plus efficace mais aussi de devoir être plus compétitive, tout en restant dans l'exigence de qualité. La méthode actuelle de l'entreprise permet de rendre des résultats très appréciables, mais qui peut largement être optimisée. En effet, il est nécessaire de faire évoluer les méthodes de l'entreprise sur le plan technique. Le processus de scan a aujourd'hui atteint ses limites pour des opérations de grandes envergures. La procédure classique qu'utilise l'entreprise fonctionne très bien pour les petits chantiers de quelques jours, mais dès lors qu'il s'agit de traiter des missions de plusieurs mois, le potentiel gain de temps estimé grâce à cette étude pourrait permettre d'améliorer sa situation vis-à-vis des exigences des clients et de la concurrence.

1.2. Objectifs : les stratégies de numérisation au scanner laser 3D.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de proposer une ou plusieurs mises à jour de l'actuelle procédure d'acquisition et de traitement d'opération de scanner laser terrestre.

La finalité de ce projet serait de revoir la procédure complète pour les dossiers d'opération scanner laser terrestre de l'entreprise, en sachant l'adapter à n'importe quel type de missions. De plus, il faudra être en mesure de pouvoir définir les gains économiques de la nouvelle méthode. Ceci passera par l'étude de coût d'investissement des méthodes envisagées pour essayer d'en déduire une meilleure solution commerciale. La nouveauté apportée devra permettre de générer des données de qualité équivalente à la procédure actuelle. Les données pour le traitement doivent être aussi exploitables et l'acquisition doit aller plus vite. Toutefois, aller plus vite implique d'en faire plus, sur une durée plus courte ; il faut avoir conscience que l'utilisateur ne doit pas se surpasser physiquement. L'intégration des projets scanner laser terrestre dans le système de visualisation Fugro Site-Spot va permettre à l'entreprise de s'ouvrir à d'autres marchés. Avec un nouveau modèle de production, ces potentiels futurs marchés pourront devenir plus attractifs, ce qui n'était pas nécessairement le cas.

Afin de déterminer la méthode la plus optimale et de mettre en évidence des éléments clefs utiles à la bonne réalisation d'un projet, une série de tests sera proposée. Pour établir cette étude, les tests seront comparés à la méthode d'acquisition et de traitement actuellement employée par l'entreprise.

1.3. Problématique : la donnée dans le système de visualisation site-spot.

Aujourd'hui les clients phares de l'entreprise cherchent avant tout, en travaillant avec Fugro, à compléter leur base de données. Pour ces entreprises, c'est cette base de données qui va permettre la gestion numérique des équipements industriels. Toutefois, les clients n'ont pas toujours les moyens nécessaires pour exploiter les quantités de données issues des acquisitions scanner de leur chantier. C'est ici qu'intervient l'interface de visualisation en ligne Fugro Site-Spot. Ce système permet la navigation dans la donnée par le biais d'images panoramiques géoréférencées. Ces images

comprennent plusieurs couches d'information : d'une part la couleur, puis en fond la donnée de dimension. On peut constater des problèmes d'analyse de l'information concernant l'intensité de réflexion, qui est la donnée directement issue du scanner. Pour contrer cela, aujourd'hui une donnée inévitable est l'information de couleur. Notre problématique consiste alors à réussir à produire de l'information haute résolution de qualité, du point de vue à la fois géométrique, mais aussi colorimétrique, qui permet un contrôle sémantique. En milieu industriel, ce contrôle lié à la désignation des éléments n'est possible que grâce à l'information issue de la photographie : la couleur d'un élément apporte une information sur la classe d'objet à laquelle il appartient. L'amélioration de la partie colorisation est donc une partie importante de cette étude.

2. Approche envisagée

2.1. Etudes préliminaires

Dans un premier temps, une phase de réflexion a été établie concernant les améliorations à apporter à la méthode actuelle. Après avoir défini les pistes de recherche, nous avons calibré les appareils disponibles à ce moment-là dans l'entreprise, à savoir le Faro Photon 120, la Leica C10, et le Faro X130 HDR. Le pôle 3D de l'entreprise Fugro Geoid travaille avec le matériel le plus récent : le Faro X330 ou le Faro X130 HDR. Les études des tests se font dans l'intégralité avec ces appareils, bien qu'une étude des solutions concurrentes ait été établie dans l'état de l'art afin de se renseigner sur les nouveautés et les performances d'autres appareils.

Concernant les appareils Faro, nous avons établi un listing des temps de balayage en fonction de différents facteurs : qualité, résolution, photo, HDR, etc. Ceci nous permet de savoir quel gain de temps peut être fait en modifiant des paramètres lors de l'acquisition. Ensuite, nous avons déterminé la distance à adopter dans un milieu de type industriel entre deux positions successives de scanner. Nous avons porté cette étude sur des objets de type plans. Nous avons également cherché à déterminer le nombre de positions nécessaire au recouvrement optimal de la surface d'objets, pour respecter une résolution spatiale fixe. Cette étude a été portée sur un élément souvent rencontré en milieu industriel : le cylindre.

Enfin, nous avons créé le modèle 3D d'une pièce support de l'appareil photo reflex de l'entreprise (voir fig1), afin que celui-ci puisse effectuer une rotation autour de son point de pupille d'entrée. Cette pièce a été imprimée en vue de découpler la partie photographie de la partie du scanner. En effet, les études de réduction de temps concernant la partie photographie sont essentielles, car c'est sur ce point que le temps d'acquisition peut être réduit au maximum. L'acquisition photographique pour le scanner permet à la fois de coloriser le nuage de points, mais aussi de repérer des détails dans la scène, des changements de couleur qui ne sont pas décelés par l'intensité de réflexion.

Suite à cela, nous avons alors commencé une série de tests d'acquisition et traitements des différentes solutions proposées en vue d'améliorer la méthode actuelle. Ces tests ont été effectués dans les locaux de l'entreprise, qui présentent une architecture similaire à un milieu industriel : couloir étroit, passage fréquent, encombrement, etc.



Figure 1 - Système « nodal » Fugro GEOID permettant à l'appareil de tourner autour de son point de pupille d'entrée.

2.2. Présentation des tests

- Test de référence : en premier lieu, la méthode classique fait office de test de référence : les tests suivants seront comparés aux rendus de ce test en matière de précision et d'évolution de temps. Les différents tests suivront les étapes de l'organisation de la méthode actuelle, à savoir :
 - Disposition des cibles
 - Levé topographique des cibles
 - Scan et photographie de la scène avec un SLT
 - Traitement : calage des nuages / contrôle du calage / filtrage des points / colorisation du nuage.

La phase de traitement concernant le calage des nuages de points s'effectue dans un premier temps avec un calage sur cible. Ensuite, l'ensemble du projet subit un calage nuage/nuage, selon l'objectif d'améliorer la qualité de consolidation du nuage de points final.

- Test 1 : Ce test permet de constater une évolution du temps si la partie photographie est décrochée du scanner. En effet, comme expliqué précédemment, en désactivant l'option photographie du scanner, le temps de balayage est divisé par cinq. Les étapes sont identiques au test de référence à la différence que la prise de vue photographique est réalisée à l'aide du système d'acquisition décrit dans la partie précédente. Ceci engendre une étude supplémentaire pour la partie traitement des données.
- Test 2 : Ce test permet d'analyser la qualité des recalages nuage/nuage des solutions logicielles au milieu d'un cheminement encadré. Seul le levé topographique des cibles est modifié, le reste est inchangé. En effet, seules les cibles situées au début et à la fin de la scène feront l'objet d'une détermination de leurs coordonnées.
- Test 3 : Ce test permet d'analyser le comportement d'une consolidation nuage/nuage proposée par les solutions logicielles lorsqu'il n'est pas assisté par des cibles. Pour ce test, les étapes de mise en place de cible et de levé topographique sont supprimées.
- Test 4 : Ce test permet d'expérimenter un cheminement effectué avec un système de prise de vue photographique, c'est-à-dire la création d'un nuage de points n'utilisant que la photogrammétrie.
- Test 5 : Ce test permet de savoir si le calage des nuages directement sur site permet un gain de temps. C'est avec l'utilisation du scanner Leica C10 que l'on peut intégrer la partie relevée topographique directement à celle du scan. Toutefois, il n'est pas envisageable de traiter une mission avec cet appareil, de par sa lenteur notamment. Si ce test vient à faire ses preuves, l'entreprise pourra songer à investir pour du nouveau matériel plus pratique.
- Test 5 bis : Comme le test 5, le calage des nuages sera effectué directement sur site, par un système de recalage « in-situ ». Ce test sera effectué à l'aide de l'appareil Zoller & Fröhlich Imager 5016.

Ces différents tests permettent de revoir l'intégralité de la procédure d'acquisition du pôle 3D de l'entreprise Fugro Geoid. Si toutefois une de ces propositions est acceptée, cela impliquera également d'éventuelles modifications de la phase de traitement.

2.3. État d'avancement des tests réalisés

Ce résumé étant rédigé bien en amont de la fin de ce projet de fin d'étude, nous pouvons dire qu'à ce jour, toute la partie acquisition a été réalisée pour chacun des tests. Le test de référence est achevé dans sa quasi-totalité. Nous avons observé une nette amélioration du temps d'acquisition concernant le test 1. La création des panoramiques avec le système reflex Nikon se fait avec le logiciel PTGui (<https://www.ptgui.com/>). Concernant le test 2, c'est la partie du levé topographique qui s'est avérée plus rapide. En effet, on réduit considérablement le nombre de stations du cheminement pour ne lever que les cibles de début et de fin d'une scène. Toutefois, la solution logiciel Faro Scene ne parvient pas à donner de résultats avec le calage nuage/nuage sans information connue en coordonnées au milieu du cheminement. D'autres logiciels seront mis à l'épreuve dans la deuxième partie du projet. Aucun traitement n'a été effectué pour le test 3. En revanche le temps d'acquisition passé sur le terrain est moindre en comparaison du test de référence, et nous sommes curieux de voir ce que la partie traitement va donner. Pour le test 5, le temps d'acquisition n'a pas réellement montré de gros intérêt, mais il faut préciser que la technologie du Leica C10 n'est pas récente. Une

recherche des performances technologiques actuelles a été réalisée au sein de l'état de l'art de notre projet.

Avec les données du test de référence, nous avons souhaité constater la précision du nuage de points final ayant subi le traitement de consolidation nuage/nuage. Rappelons que ce calage est secondaire car dans la procédure, un premier calage sur cible est réalisé. Nous avons alors comparé les coordonnées topographiques des cibles et les coordonnées des cibles issues du nuage de points final de la scène. Nous avons obtenu des résultats très surprenants. Nous présentons dans le graphique de la figure 2 l'évolution des écarts minimum, maximum et moyen entre les cibles, en fonction des positions successives du scanner.

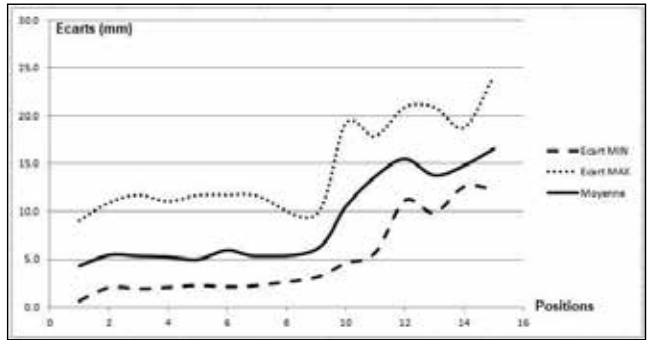


Figure 2 - Évolution des écarts des coordonnées des cibles : relevé topographique vs. Consolidation nuage/nuage (FARO Scene)

Nous avons également fait cette étude en comparant les coordonnées topographiques des cibles et la première consolidation effectuée, à savoir un calage sur cibles. Nous obtenons le graphique de la figure 3.

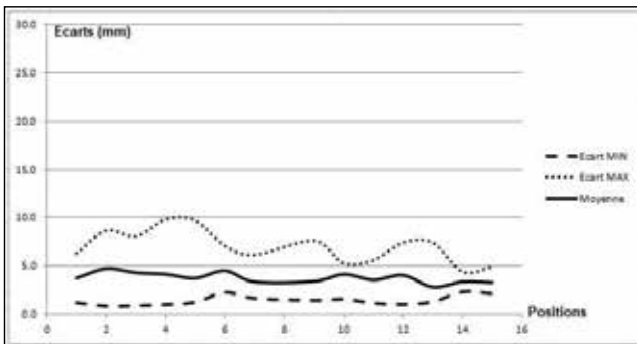


Figure 3 - Évolution des écarts des coordonnées des cibles : relevé topographique vs. Calage sur cible (FARO Scene)

Concernant ce dernier graphique, nous remarquons que les valeurs des écarts moyens sont autour de 4mm. L'allure des courbes, qu'il s'agisse des valeurs minimum, maximum ou de la moyenne, est relativement constante. Pour le graphique de la figure 2, nous remarquons clairement une augmentation des écarts dans leur entièreté à partir de la position 9, alors que les valeurs des écarts avant cette position sont autour de 5mm. Avant cette position, nous avons remarqué un changement sur le terrain, qui semblerait être la raison de la modification soudaine de l'allure

des courbes. En effet, la position 9 correspond à une situation de transition entre 2 pièces séparées par une porte vitrée, qui est restée ouverte durant toute la durée de l'acquisition. Nous remarquons alors que la perte d'information entre les positions de scan engendre donc un calage peu fiable des nuages de points, bien que le rapport de traitement annonce un résultat plutôt encourageant. Une étude plus poussée concernant cette interrogation sera faite plus tard lors de ce PFE.

3. Conclusion

Jusqu'à présent, nous pouvons dire que les premières recherches et expérimentations entamées à ce stade apportent un début de solution technique et certaines réponses aux problématiques portées par l'entreprise d'accueil. En effet, une mission a été entreprise avec la méthode d'acquisition scanner utilisant la prise de vue photographique indépendante. Un gain de temps au niveau de l'acquisition a été constaté, et la phase de traitement a su apporter des résultats concluants. La dernière partie de ce projet sera consacrée à l'étude de la phase de traitement et du gain de temps potentiel de cette étape. Nous allons finalement étudier le coût d'investissement des méthodes proposées et en découler une solution commerciale optimisée.

Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site.



PFE présenté par : Théo BENAZZI
Société d'accueil : Laboratoire iCube Equipe Trio/PAGE - Mairie d'Obernai
Directeur(trice) de PFE : Mathias Heissler
Encadrante : Tania Landes
Correcteurs : Mathieu Koehl



1. Définition et contexte de l'étude

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche de restitution archéologique portant sur le château du Kagenfels. Cet édifice est situé dans le département du Bas-Rhin, proche d'Obernai dans les Vosges, plus précisément sur la partie Ouest de la commune d'Ottrott dans la forêt d'Obernai-Bernardswiller. Depuis 1999, cet édifice fait l'objet de travaux de consolidation et de fouilles archéologiques qui sont entrepris par une équipe de bénévoles passionnés. Cette équipe dirigée par Mathias Heissler, architecte du patrimoine, s'est donnée environ trente cinq ans pour mener à bien cette dynamique d'exploration des parties effondrées de cette construction. Cette démarche est aujourd'hui soutenue par la communauté de commune du pays de Sainte Odile et l'association pour la conservation du patrimoine d'Obernai.



Figure 1: Vue aérienne du château du Kagenfels (octobre 2017)

2. Objectifs

La démarche entreprise au cours de ce projet de fin d'études consistait à pouvoir proposer une restitution virtuelle datée de ce château et de son environnement par le croisement de l'existant et d'hypothèses archéologiques. Cela a été envisagé à des fins de conservation mais également en vue d'une opération de médiation scientifique. Pour répondre à ces problématiques d'études, nous avons fait le choix de nous focaliser sur cinq axes de développement à savoir:

- L'analyse et le traitement des données rassemblées,
- La restitution 3D+1D de l'édifice et de son environnement,
- La structuration et l'organisation des données produites,
- L'évaluation et la représentation du degré d'incertitude de restitution,
- La visualisation et la mise en valeur des données.

En nous basant sur la configuration actuelle de l'édifice et tous les documents archéologiques mis à notre disposition, nous avons entrepris une démarche d'interprétation et de restitution virtuelle de cet édifice. Pour ce faire, nous nous sommes tout d'abord interrogés sur les outils que nous pourrions utiliser pour répondre au cahier des charges en prenant en compte les exigences de chacun et les contraintes pouvant nous limiter. Dans cette optique d'aboutir à une représentation exhaustive et précise de l'édifice, ont pu être croisées des technologies modernes propres au domaine de la topographie et des hypothèses découlant des écrits restituant tous les travaux archéologiques déjà enregistrés sur le chantier ainsi que sur d'autres sites alentours comparables en terme d'architecture et de date de construction. Cette dernière partie était bien sûr plus du ressort de M. Heissler. C'est pourquoi, il est très important de mettre en avant la démarche collaborative dans laquelle s'inscrit ce projet. Nous pouvons également mettre en avant l'aspect multidisciplinaire de ces travaux. En effet, pour répondre à tous les besoins que comporte ce projet, il a été important de développer des compétences transversales quitte à parfois diverger de la topographie classique. Nous avons dû entreprendre des travaux de recherches dans des domaines divers tels que l'archéologie, l'architecture médiévale, l'histoire, l'infographie 3D, l'informatique ou encore la topographie.

3. Etat de l'art

Sur les axes de recherches abordés précédemment, nombreux sont ceux ayant déjà fait l'objet d'une étude au sein de la communauté scientifique. Plusieurs travaux, notamment dans le domaine de l'archéologie, se sont concentrés sur ce type de raisonnement et notamment sur la représentation d'hypothèses de restitution temporelles sur des édifices disparus ou partiellement détruits. Nous pouvons citer les travaux de *Guidi et al (2011)*, *Micoli et al (2013)*, *Rodriguez-González et al (2017)* ou encore plus récemment *Karsten et al (2018)* qui ont travaillé sur un projet sensiblement similaire près d'Hambourg sur le château du Kalkberg. En parallèle du travail de restitution, certains chercheurs se sont concentrés sur l'évaluation et les modes de représentation de l'incertitude. Sur ces thématiques nous pouvons citer les publications de *Pang et al (1997)* ou *Kensek et al (2007)* qui traitent la thématique au sens large. Au sein de la communauté francophone, un travail de thèse réalisé par *De Runz (2011)* approfondit et développe tous les aspects de cet axe de recherche. Certains auteurs comme *Zuk et al (2005)*, *Dell'unto et al (2013)* ou plus récemment *Apollonio (2016)* se rapportent uniquement au milieu de l'archéologie en étudiant de nombreux types de représentations et méthodes d'analyse du patrimoine architectural. Une étude plus approfondie de ces articles sera bien entendue proposée dans le mémoire.

4. Etude et choix des outils de modélisation et de rendu

Les premières réflexions de ce projet de fin d'études se sont portées sur le choix des outils et méthodes informatiques permettant de répondre au cahier des charges. Sur ce constat, nous avons réalisé un listing le plus cohérent et exhaustif possible de tous les logiciels disponibles à ce jour et avons fait ressortir les principales qualités et défauts que proposent chacun de ces outils. De nombreux facteurs ont donc été pris en considération tels que: la disponibilité en interne de l'outil, la convivialité de l'interface utilisateur, la communauté (utilisateurs, développeurs) active autour de l'outil, la variété de formats d'échanges, le prix ou encore l'expérience personnelle.

Pour le traitement de données lasergramétriques et pour la modélisation 3D, notre choix s'est porté sur la suite de logiciels que propose le constructeur *Trimble* à savoir *Realworks* et *SketchUp*. En effet, les fonctionnalités dont ces logiciels disposent sont très complémentaires. La passerelle dynamique mise en place par le constructeur entre les deux solutions nous a paru vraiment intéressante.

Pour ce qui est de l'organisation et de la structuration des données, il a été envisagé d'intégrer les données dans un système de gestion de base de données en passant par une plateforme SIG telle que *QGIS* ou *ArcGIS*. Cependant, au vue des exigences de M. Heissler, cela n'était clairement pas une priorité. Afin de simplifier la chaîne de traitement il aura finalement été décidé de rester sur *Sketchup* pour gérer et structurer les données. Nous avons préféré rester sur un environnement unique et accessible à des non initiés, quitte à se limiter dans les possibilités de gestion et de structuration.

Concernant l'aspect visuel du modèle final, là encore nous avons réalisé des recherches de manière à faire un bilan des outils actuellement disponibles sur le marché nous permettant de mettre en valeur la donnée produite. Pour cela nous avons réalisé un comparatif des principaux moteurs de rendu disposant d'une passerelle directe avec le logiciel *SketchUp*. Nous avons alors fait le choix d'utiliser le moteur de rendu *Thea Render* qui est directement intégré à *SketchUp* par le biais d'un plug-in. En parallèle à cet outil, notre choix s'est porté sur le moteur de rendu en temps réel *Lumion*. C'est un outil très simple d'utilisation, intuitif et qui permet d'obtenir des rendus de très bonne qualité en peu de temps.

5. Travaux préalables à la modélisation de l'édifice

Avant de se lancer dans les travaux de modélisation portés sur l'édifice, nous avons réalisé différents travaux principalement axés sur la représentation de l'environnement dans lequel s'inscrit ce château. En effet, d'innombrables facteurs, naturels ou liés à l'activité humaine, font évoluer un site archéologique de son établissement jusqu'à nos jours. Ce travail, combiné aux modèles datés, permet d'intégrer l'impact de la dimension temporelle sur le processus de restitution et sur le raisonnement scientifique.

C'est pourquoi, afin de reconstituer l'environnement proche de l'édifice, nous avons réalisé une chaîne de traitement sur *Realworks* en nous basant sur les données lasergramétriques acquises courant 2017. Cela nous aura permis de reproduire un modèle numérique de terrain tel que saisi. Sur cette base nous avons pu retravailler le maillage de manière à restituer les états de terrain antérieurs. Nous avons également eu recours à des méthodes de modélisation 3D par photogrammétrie pour reconstituer virtuellement les principaux enrochements granitiques qui jonchent ce terrain vosgien. Enfin pour reconstituer l'environnement lointain nous avons pu nous procurer un modèle numérique de terrain (*SRTM/Google elevation data*) sur 30km² sur lequel une ortho-image a pu être plaquée.

6. Démarche de modélisation 4D

Avant d'expliciter la démarche de modélisation 4D à proprement parler, il est important de passer en revue les travaux de documentation qui ont été réalisés en amont. En effet, sans le rassemblement d'une énorme quantité d'information par M. Heissler durant les deux dernières décennies, aucun des travaux entrepris n'auraient pu voir le jour.

Sur site, afin de pouvoir identifier un fragment ou un élément et le rattacher à une série, un travail d'identification typologique des blocs, réactualisé en permanence, a été réalisé. Il s'agissait pour l'architecte du patrimoine de décrire les caractères formels des blocs d'architecture afin de définir rapidement leur nature et de pouvoir les attribuer à une série précise. Sur cette base, chaque bloc venait enrichir l'analyse des trajectoires de dispersion (figure ci-dessous). Les typologies de fenêtres (vingt-cinq différentes identifiées à ce jour au Kagenfels) ont été systématiquement inventoriées sur la base des profils des encadrements, qui ont été cotés et recensés de manière graphique dans un référentiel. Celui-ci permet, à partir d'un fragment incomplet, d'identifier à quel encadrement il appartenait. Aujourd'hui, chaque série de blocs fait progressivement l'objet d'une fiche de synthèse spécifique décrivant la nature de l'élément architectural, ses caractéristiques, ses cotations, la localisation tridimensionnelle des blocs et fragments qui s'y rattachent et une analyse de la dispersion des éléments. Une conclusion est jointe, qui propose un emplacement de restitution pour cet élément, avec un degré de certitude relatif selon les cas. La compilation de plusieurs fiches de synthèses donne au final des conclusions permettant de restituer le plus fidèlement possible l'édifice.

C'est donc sur cette base que nous avons pu entreprendre la modélisation de tous les éléments inventoriés. A cette étape, le travail collaboratif restait assez limité dans le sens où les éléments reconstitués avaient déjà fait l'objet d'une analyse approfondie. Nous nous sommes donc basé de manière formelle sur les éléments mis à ma disposition pour modéliser toutes les parties inventoriées. Néanmoins, concernant la modélisation de la partie structurelle de l'édifice (maçonneries, menuiseries, toitures, etc...), la démarche nécessitait plus de réflexion. En effet, la quasi-totalité des élévations étant ruinées aujourd'hui, les restitutions sont sujettes à être débattues car l'existant ne permet que de faibles hypothèses. Il s'agit alors, en plus des échanges avec l'architecte du patrimoine, d'intégrer pleinement la documentation qu'il aura constituée et de suivre une approche descendante dans laquelle les itérations avec l'architecte permettent de valider la compréhension de ladite documentation et d'affiner chaque élément de l'environnement. Il était donc de mon ressort de pouvoir faire des propositions par recoupement d'informations de sources différentes. Dans les faits, cela a pu être réalisé au travers de nombreuses séances de travail collaboratif durant lesquelles nous avons pu échanger, proposer et valider des propositions.

C'est donc au terme d'environ 250 heures de production que nous avons été en mesure de proposer une restitution « quasi-complète » de l'édifice. Nous avons fait le choix de présenter l'édifice à deux époques différentes avec un premier modèle de l'état initial fixé autour de 1262 et une seconde version de l'état final (figure ci-dessous); situation que l'on aurait pu observer courant 16ème siècle.

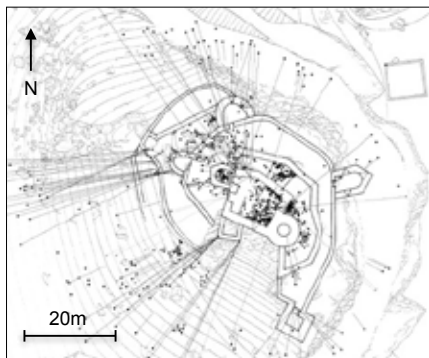


Figure 2: Plan d'analyse des trajectoires des blocs inventoriés (M. Heissler 2005)

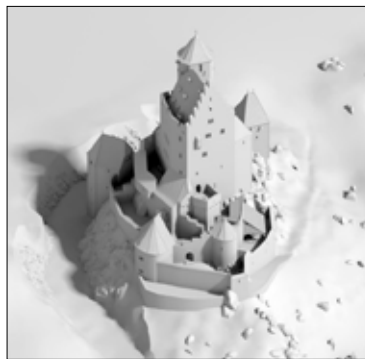


Figure 3: Proposition de restitution de l'état final (1550)

7. Organisation et structuration de la donnée

Concernant la structuration de la donnée, nous avons pris le parti de classer les données en passant par une gestion optimisée des calques ainsi que par la structuration des entités en arborescence à l'aide des outils de groupe et de composants dynamiques que propose SketchUp. Pour mieux comprendre l'organisation des données dans le modèle nous avons réalisé un modèle conceptuel de données (MCD). Ce

MCD a pour but de comprendre l'organisation hiérarchique des groupes et composants qui constituent le modèle. En plus de cela, nous avons pu enregistrer des métadonnées liés aux composants modélisés. Sur ce principe, par un simple clic, il est possible d'obtenir une fiche d'information qui renseigne l'utilisateur sur de nombreuses informations telles que le numéro d'inventaire, la date de construction, la source de modélisation ou encore les dimensions de l'objet.

8. Evaluation et représentation de l'incertitude de restitution

La démarche menée en parallèle de la modélisation datée de l'édifice était de pouvoir évaluer et représenter le degré d'incertitude avec lequel nous proposons cette restitution. En effet le processus complet est de prime abord assez subjectif. Par le recouplement et l'analyse de toutes les données recueillies depuis près de 20 ans sur ce site, il aura été possible d'apporter des conclusions précises sur le positionnement et les dimensions de nombreux éléments qui composent ce château. Cependant, il faut rester lucide sur le fait que les fouilles réalisées n'ont pu qu'apporter des conclusions partielles sur la structure complète de l'édifice. Au vue des élévations encore en place aujourd'hui, beaucoup d'hypothèses de restitutions sont encore sujettes à être débattues. C'est pourquoi il est important de comprendre que ce type de production peut être qualifié au mieux comme une expertise et au pire comme un rassemblement d'opinions. En ces termes nous voulons également faire comprendre qu'il y a une part de subjectivité associée à l'esthétique de la restitution. Si seuls les éléments certains avaient été modélisés, nous aurions proposé un résultat qui visuellement n'aurait pas semblé exhaustif. C'est pourquoi nous avons proposé une représentation mettant en avant cinq niveaux d'incertitudes décomposés dans un dégradé de couleurs du rouge au vert comme le suggère *Dell'Unto et al. (2013)*. Ces couleurs distinguent des niveaux allant de la simple supposition à un niveau de connaissance très fort.

9. Mise en valeur de la donnée

A la suite des travaux de modélisation, nous avons pour objectif de mettre en valeur la donnée produite notamment par l'utilisation de moteurs de rendus photoréalistes. Le logiciel *Lumion* nous a permis de pouvoir générer des rendus photoréalistes de très bonne qualité sans pour autant avoir à développer des compétences poussées en infographie 3D. De plus, la passerelle dynamique avec *SketchUp* que propose l'éditeur depuis sa dernière version nous aura permis de pleinement gérer l'aspect temporel des modélisations. En complément, nous avons proposé des solutions en terme d'immersion en réalité virtuelle, de manière à pouvoir proposer une visite du château par le biais du système *HTC Vive* disponible au laboratoire.



Figure 4: Rendu photo réaliste de l'état final (vue depuis le nord)

10. Conclusion

Les travaux entrepris au cours de ces six mois de projet ont permis de répondre aux exigences fixées. Nous avons réalisé un travail complémentaire avec M.Heissler. Cette approche collaborative aura vraiment été l'élément à retenir de ces travaux. Cette synergie que nous avons su mettre en place par l'attribution de nos compétences et expériences respectives aura permis de donner du corps à la démarche entreprise. D'un point de vu personnel, ce projet m'aura permis d'approfondir mes compétences dans le milieu de la 3D au sens large. De plus, j'ai pu entrevoir les spécificités que comporte une démarche collaborative et transdisciplinaire avec des acteurs issus de domaines différents de la topographie.

Références bibliographiques:

- Apollonio, F. I. (2016). 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. 10025, 173–197.
- Dell'Unto, N., Leander, A., & Ferdani, D. (2013). Digital reconstruction and visualization in archaeology. *Lirmm Fr*, 621–628.
- De Runz, C. (2008). Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique, 230.
- Guidi, G., Russo, M., & Angheluddu, D. (2013). Digital Reconstruction of an Archaeological Site Based on the Integration of 3D Data and Historical Sources. *ISPRS, XL-5/W1*(February), 99–105.
- Kensek, A. 2007 Survey of methods for showing missing data, multiple alternatives, and uncertainty in reconstructions. *CSA Newsletter*, Volume XIX No.3
- Kersten, T. P., Tschirschwitz, F., Deggim, S., & Lindstaedt, M. (2018). Step into Virtual Reality - Visiting Past Monuments in Video Sequences and as Immersive Experiences. *MDPI, Basel, Switzerland*, 192–219.
- Micoli, L., Guidi, G., Angheluddu, D., & Russo, M. (2013). A multidisciplinary approach to 3D survey and reconstruction of historical buildings. *Proceedings of the DigitalHeritage 2013 - Federating the 19th Int'l VSMM, 10th Eurographics GCH, and 2nd UNESCO Memory of the World Conferences, Plus Special Sessions fromCAA, Arqueologica 2.0 et Al.*, 2, 241–248.
- Pang, A. T., Wittenbrink, C. M., & Loftho, S. K. (1997). Approaches to uncertainty visualization. *The Visual Computer*, 370–390.
- Rodriguez-González, P., Muñoz-Nieto, A. L., Dell'Unto, S., Sanchez-Aparicio, L. J., Gonzalez-Agullera, D., Micoli, L., Hejmanowska, B. (2017). 4D Reconstruction and visualization of cultural heritage: Analyzing our legacy through time. *ISPRS Archives*, 42(2W3), 609–616.
- T. Zuk, S. Carpendale and W. D. Ginzman (2005). Visualizing Temporal Uncertainty in 3D Virtual Reconstructions, *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*. 99-106

Basculement de maquettes 3D TQC vers la réalité virtuelle. Création d'un démonstrateur de conception et de revue de projet pour l'industrie



PFE présenté par : **Nicolas TADJIAN**
Société d'accueil : **TPLM-3D**
Directeur de PFE : **Stéphane HOPP**
Correcteurs : **Emmanuel ALBY et Mathieu KOEHL**



1. Contexte et objectifs

TPLM-3D est spécialisée dans les travaux de mesures 3D par lasergrammétrie en produisant notamment des modèles 3D « Tel Que Construit ». Un des domaines où intervient la société est l'industrie. En effet, ce type de clientèle sollicite souvent l'entreprise pour la production de modèles 3D TQC de leurs installations. Les clients industriels utilisent ensuite ces maquettes comme base de travail pour l'implémentation de nouveaux projets. Une étape clef de validation lors des phases d'avant-projet est la revue de maquette. L'intégration du projet dans l'existant est analysée par tous les intervenants de l'étude et des choix de réalisation doivent être arrêtés. Les revues de projet se font habituellement sur plans (numériques ou papiers) et il en ressort un manque de lisibilité quant à la visualisation 3D. En effet, les opérateurs et techniciens travaillant sur site ne sont pas toujours habitués à interpréter les éléments d'un plan. Ainsi, la validation de certains choix est faite sans avoir pleinement conscience de la réalité.

Pour TPLM-3D, la volonté d'intégrer la réalité virtuelle dans leurs activités s'est concrétisée lorsqu'ils rencontrèrent les dirigeants de la start-up *NucleusVR*. Leur produit en cours de développement est une application de réalité virtuelle permettant d'intégrer des modèles 3D extérieurs. L'idée de basculer des maquettes vers la réalité virtuelle a ensuite été proposée à l'industriel *Condat*, client de TPLM-3D. Ces derniers y ont vu un intérêt concernant les tâches de conception et de revue de maquette pour leurs projets d'aménagement de leurs installations. La réalité virtuelle permettra ici d'avoir une meilleure visualisation 3D du projet, et ce pour toutes les personnes concernées. Les analyses seront alors plus pertinentes et la validation des choix sera faite en toute conscience.

L'objectif du projet est alors de mettre en place un démonstrateur permettant de réaliser, en réalité virtuelle, les tâches de conception et de revue de projet en industrie. Ce système utilisera une application de réalité virtuelle en cours de développement : *NucleusVR*. Les principales étapes du projet sont les suivantes :

- Choisir le matériel optimal pour le démonstrateur;
- Analyser le fonctionnement de *NucleusVR*, notamment l'intégration des modèles 3D;
- Adapter *NucleusVR* aux besoins industriels;
- Évaluer le démonstrateur par rapport aux attentes initiales et à son utilité.

2. État de l'art

La Réalité Virtuelle (VR) est un système immersif et interactif capable de reproduire un environnement en trois dimensions. Il utilise le suivi des mouvements de l'utilisateur ainsi que ses actions afin de mettre à jour, en temps réel, sa perception de la scène. Une immersion en réalité virtuelle peut être réalisée sur différents supports : un ordinateur, un casque de VR ou un système de projection simple ou multi-écrans. Ces systèmes possèdent chacun leurs avantages et leurs inconvénients et conviennent donc à des utilisations différentes. Ensuite, un système de réalité virtuelle s'accompagne d'équipements. Ils permettent de réaliser l'immersion et de renforcer le sentiment de présence et d'implication de l'utilisateur dans la scène. Trois types d'équipements se distinguent :

- Les systèmes entrants, qui acquièrent les actions de l'utilisateur (manettes, dispositifs de suivi du corps);

- Les systèmes sortants, qui retransmettent à l'utilisateur les mises à jour faites sur l'environnement (dispositifs visuels et haptiques);
- Les applications de réalité virtuelle, qui réalisent les traitements entre les informations entrantes et sortantes.

La réalité virtuelle se démocratise puisqu'elle a des avantages qui font évoluer la perception d'un environnement 3D. Tout d'abord, elle améliore la visualisation de la scène, ce qui permet à l'utilisateur de mieux prendre conscience de l'endroit où il se trouve. Le progrès sur la visualisation a une conséquence positive sur la compréhension du lieu, où l'organisation des éléments les uns par rapport aux autres est mieux perçue. Puis, les interactions disponibles sont un moyen de simuler des situations et ainsi de reproduire des conditions réelles. Enfin, la VR donne la possibilité de réaliser des immersions collaboratives. Ainsi, des utilisateurs distants physiquement peuvent se retrouver et échanger au sein d'un même environnement.

Ce qui prouve que la réalité virtuelle est en pleine expansion est qu'elle est utilisée dans de nombreux secteurs. Elle convient à toutes les applications où une situation virtuelle suffit à stimuler le cerveau pour reproduire les mêmes sensations que dans le monde réel. La VR se retrouve notamment dans les domaines de l'archéologie (exhibitions virtuelles), de la médecine (thérapies sur les phobies), de l'armée (entraînements militaires) ou encore de l'éducation et de la formation (réalisation de travaux pratiques virtuels).

La réalité virtuelle est également utilisée dans le secteur industriel. En effet, afin de rester compétitives, les industries se doivent de suivre les nouvelles technologies. Celles qui investissent dans la transformation numérique sont appelées *Industrie 4.0*. La réalité virtuelle fait partie de ces nouvelles technologies. Dans l'industrie, des immersions sont réalisées pour les tâches de conception, d'aménagement d'équipements, mais aussi de formation du personnel.

Enfin, il faut s'intéresser aux applications de réalité virtuelle existantes et qui répondent à des besoins industriels. Les produits *Improv3 (MiddleVR)* et *TechvizXL (Techviz)* sont des systèmes de réalité virtuelle qui permettent de réaliser diverses tâches en milieu industriel, comme la revue de conception ou l'assemblage virtuel. Ils acceptent des formats venant des principaux logiciels de modélisation 3D. Ces applications sont compatibles avec les casques de VR ou les systèmes de projection sur écrans. L'application *NucleusVR* est quant à elle toujours en cours de développement par la start-up du même nom. Elle offre la possibilité d'importer des modèles 3D extérieurs et de pouvoir naviguer librement à l'intérieur. Elle propose plusieurs fonctionnalités, comme l'import d'objets 3D depuis une bibliothèque prédéfinie. Une fois insérés dans la scène, la position, la rotation et l'échelle de ces objets peuvent être édités. Enfin, *NucleusVR* permet de réaliser des immersions collaboratives afin de rassembler plusieurs utilisateurs dans le même environnement virtuel. L'application s'utilise aussi bien sur ordinateur qu'avec un casque de réalité virtuelle.

3. Les bases du démonstrateur

Avant d'aborder la phase de mise en place du démonstrateur, il convient de s'intéresser aux éléments de base qui le constitue. Ils se répartissent en trois catégories : le matériel, les logiciels et les données d'entrée.

Concernant le matériel, il faut en premier lieu fixer le système de réalité virtuelle. Le démonstrateur à développer pour ce projet doit être mobile, ce qui élimine les systèmes de projection sur écrans. De plus, il est nécessaire de garantir une très bonne qualité d'immersion. Ainsi, le système casque sera utilisé. Ensuite, il faut sélectionner le casque de VR qui sera employé. Sur le marché actuel, deux modèles de casque se distinguent des autres : *Oculus Rift* et *HTC Vive*. Ils ont chacun leurs spécificités et sont donc adaptés pour des utilisations différentes. Pour le démonstrateur, l'HTC Vive a été retenu grâce à deux caractéristiques que ne possède pas l'Oculus Rift. D'une part, sa profondeur (la distance entre les yeux de l'utilisateur et les lentilles du casque) est réglable. D'autre part, il peut être utilisé à l'échelle d'une pièce, et non pas seulement de façon fixe, ce qui renforce la qualité de l'immersion. Enfin, il faut également évoquer le choix de l'ordinateur, puisque des caractéristiques minimales en termes de performances sont à respecter afin de faire fonctionner le casque.

Pour l'aspect logiciel, il est nécessaire de s'intéresser à la plateforme avec laquelle est développée *NucleusVR*, à savoir le moteur de jeu Unity. Ce logiciel permet de construire un environnement 3D et d'effectuer des calculs afin de reproduire et de simuler les caractéristiques de ce monde. Des applications de réalité virtuelle peuvent donc être construites avec ce moteur de jeu. Dans Unity, l'aspect de programmation est très présent, puisque ce sont des scripts (langage C# ou JavaScript) qui gèrent les objets ainsi que les règles de l'environnement. Unity permet également

d'importer des modèles 3D aux formats suivants : .fbx, .obj, .3ds, .dae, .skp. Ainsi, NucleusVR est un projet Unity composé d'un ensemble de scripts qui s'applique à des modèles 3D extérieurs.

Enfin, les données d'entrée du démonstrateur sont les maquettes 3D TQC produites par TPLM-3D. Elles sont issues d'un levé lasergrammétrique terrestre. Le traitement des nuages de points est fait avec le logiciel *Leica Cyclone*. La méthode utilisée est une consolidation par les cibles et un géoréférencement indirect. Ensuite, la modélisation est également effectuée sur Cyclone et les maquettes sont exportées au format .dwg.

4. La mise en place du démonstrateur

La mise en place du démonstrateur s'articule autour de deux points : l'intégration des modèles 3D (maquette TQC et objets de bibliothèque) dans NucleusVR et l'adaptation de l'application à des besoins industriels. Pour la première partie, l'objectif est de mettre en évidence les conditions que doivent vérifier les modèles 3D afin de pouvoir être intégrés. La chaîne d'intégration qu'utilise NucleusVR est représentée sur la Figure 1.

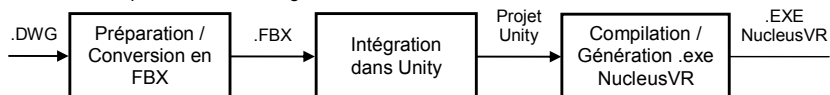


Figure 1 : Chaîne d'intégration des maquettes dans NucleusVR

Étant donné que les maquettes produites par TPLM-3D sont au format .dwg, le format d'import .fbx est utilisé. Avant la conversion des modèles, une étape de préparation doit être faite. L'objectif est de rendre ces objets 3D compatibles avec Unity et NucleusVR. Les tâches principales de cette préparation sont les suivantes :

- Décomposer les éventuels blocs qui se trouvent dans le dessin;
- Ajouter dans le modèle des solides simples autour des objets que l'utilisateur ne doit pas traverser. Ces solides, nommés « Collider », sont invisibles lors de l'immersion et servent de frontières physiques afin qu'il y ait des collisions;
- Mettre les unités du fichier .dwg en mètre, unité utilisée par Unity;
- Avoir le centre du repère proche de la maquette puisque les coordonnées avec des grands nombres alourdissent les calculs et donc la qualité du rendu.

Une fois que cette préparation est effectuée, les modèles 3D sont convertis au format .fbx puis importés dans le projet Unity de NucleusVR. Ensuite, les scripts nécessaires sont appliqués aux modèles, puis l'ensemble est compilé. Un fichier exécutable .exe est obtenu et constitue le livrable de NucleusVR.

La seconde partie de la mise en place du démonstrateur est l'adaptation de NucleusVR à des besoins industriels. Pour cela, les attentes du client Condat vis-à-vis des fonctionnalités de l'application ont été listées. Les besoins de TPLM-3D, relevant plus du côté géomètre, ont également été ajoutés à cette liste. Puis, après discussion avec NucleusVR, huit vœux ont été sélectionnés pour être étudiés au cours du projet. Le Tableau 1 présente les fonctionnalités qui ont été implémentées et ajoutées à l'application. Celles présentes dans le Tableau 2 ont fait l'objet d'une étude vis-à-vis des possibilités et des freins à leur intégration.

Restreindre les possibilités d'édition des objets pour certains utilisateurs en mode collaboratif
Faire des croquis, dessins et annotations à main levée dans la scène
Prendre des mesures dans la scène
Afficher les coordonnées d'un point

Tableau 1 : Besoins intégrés

Insérer des objets de bibliothèque paramétrables
Afficher plusieurs positions successives d'un objet de bibliothèque en mouvement
Éditer les objets de bibliothèque en saisissant des valeurs numériques
Intégrer un nuage de points

Tableau 2 : Besoins étudiés

Enfin, une problématique particulière a été soulevée lors du développement de la fonctionnalité de prise de cotes. Avec l'outil actuel, une distance se mesure en plaçant manuellement les extrémités d'un ruban virtuel dans l'environnement. Néanmoins, cela n'est pas adapté pour des mesures en hauteur puisque l'utilisateur est au niveau du sol. Il faudrait alors pouvoir cliquer, avec le

pointeur laser de la manette, les points des extrémités de la mesure. Cependant, les éléments de la maquette ne sont par défaut pas reconnus par ce laser. Ils doivent pour cela posséder un collider (élément qui gère les collisions). À cause de la trop grande taille de nos maquettes, la solution que tous les éléments possèdent des colliders n'est pas envisageable. Un script a donc été développé afin de reconnaître les objets de la maquette en contournant la contrainte des colliders.

5. Le chantier test

Le chantier test est une revue de projet effectuée en conditions réelles chez le client Condat. Elle portait sur un de leurs bâtiments de production où les installations étaient en cours de modification. Au fur et à mesure de leur projet, de nouveaux éléments venaient s'ajouter à la maquette 3D de l'existant. Ils avaient alors besoin d'être validés par le personnel concerné. Pour cette revue de projet, une partie de la nouvelle charpente du bâtiment devait être étudiée. Tout d'abord, la maquette 3D de l'existant a été modélisée selon les principes habituels de TPLM-3D. Ensuite, il a fallu intégrer le modèle 3D de la charpente à la maquette TQC. Ce modèle nous a été transmis par un fournisseur extérieur. Puis, l'ensemble de la maquette a dû être préparé afin d'être compatible avec NucleusVR. En parallèle, une bibliothèque d'objets propres aux activités de Condat a été construite. Chacun d'eux devait bien vérifier les conditions de préparation des modèles 3D. Enfin, la maquette ainsi que les objets de bibliothèque ont été transmis à NucleusVR pour l'intégration.

Cette revue de projet a été effectuée durant le dernier mois du PFE. L'objectif était d'utiliser le démonstrateur de réalité virtuelle en conditions réelles, avec les personnes concernées, afin d'évaluer son utilité et son potentiel. Ce chantier test nous a également permis de recueillir les avis de notre client concernant les avancées du démonstrateur au cours de ce projet.

6. L'évaluation du démonstrateur

La dernière étape de ce projet consiste à effectuer une évaluation du démonstrateur mis en place. Plusieurs aspects ont été pris en compte. Tout d'abord, une étude de précision a été faite dans la maquette une fois intégrée en réalité virtuelle. Il a ainsi fallu vérifier :

- Que la maquette se situe au bon endroit par rapport à sa position d'origine dans le fichier .dwg. Pour cela, des points de repère ont été positionnés dans la maquette. La fonctionnalité d'affichage des coordonnées a ensuite été utilisée afin de vérifier que leurs coordonnées en réalité virtuelle étaient les mêmes que dans le dessin d'origine;
- Que la maquette ne subit de déformations ou de changements d'échelle au cours de la chaîne d'intégration (conversion en .fbx, intégration dans Unity). L'outil de mesures a été utilisé afin de contrôler les distances entre les points de repère selon les trois axes;

Étant donné que ces deux contrôles utilisaient les fonctionnalités d'affichage des coordonnées et de prise de cotes, une étude de précision et d'exactitude de ces outils a également été réalisée. Ensuite, un bilan du développement des fonctionnalités a été fait. Pour cela, l'état d'avancement de celles qui ont été sélectionnées au début de l'étude a été analysé. Puis, les avis utilisateurs recueillis au cours du chantier test nous ont permis d'évaluer le démonstrateur quant à son utilité face à des besoins réels. Des points comme la facilité de prise en main ou l'apport dans la prise de décision ont été pris en compte. Enfin, l'évaluation du démonstrateur s'est terminée par la mise en lumière de ses limites et des améliorations possibles dans la suite de son développement.

Conclusion et perspectives

La réalité virtuelle est une technologie qui est de plus en plus présente dans de nombreux domaines, notamment en industrie. À travers ce projet, la volonté de TPLM-3D était de maîtriser le basculement des maquettes 3D TQC vers la réalité virtuelle. Le but est de pouvoir proposer à leurs clients une prestation supplémentaire répondant à leurs besoins réels. L'entreprise est maintenant en connaissance de la démarche à suivre afin de produire des modèles 3D directement intégrables dans l'application de réalité virtuelle. Ce projet a également permis d'accompagner NucleusVR dans le développement de l'application afin qu'elle soit plus orientée vers une utilisation industrielle.

La réalité virtuelle est actuellement utilisée comme un dispositif de visualisation complémentaire aux méthodes classiques, mais elle tend à devenir un outil à part entière pour les professionnels. Une question qui se pose désormais est donc de savoir si cette utilisation courante de la VR aura des conséquences sur les processus de modélisation 3D habituels. Il sera également intéressant de voir dans quelles mesures la VR pourra être pleinement utilisée avec la technologie BIM.

Numérisation 3D de la carrière Saingt de Fleury-sur-Orne :

Intégration des données pour une exploration virtuelle du site

PFE présenté par : **Mathieu VERSTAEN**
Société d'accueil : **INRAP Normandie / Laboratoire ICube**
Directeur de PFE : **Cyril MARCIGNY**
Encadrant : **Pierre GRUSSEMEYER**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**



1. Introduction

La carrière Saingt se trouve à Fleury sur Orne, ville située à quelques kilomètres de Caen. Elle a été exploitée au XIX^{ème} siècle pour extraire une pierre à bâtir, appelée « Pierre de Caen ». Elle a ensuite été utilisée comme lieu de stockage, dans l'entre-deux-guerres, par la brasserie Saingt se trouvant juste au-dessus. Lors du débarquement des alliés en Normandie durant la seconde guerre mondiale, la ville de Caen a été bombardée, les habitants ont donc fuit la ville. C'est alors que les frères Saingt ont ouvert la carrière afin de protéger la population des bombardements et des combats. La carrière a été occupée pendant environ 8 semaines et a accueilli environ un millier de personnes. Suite au conflit, la brasserie Saingt a fermé la partie souterraine de la basserie. En effet, les frères Saingt ont décidé de fermer la carrière à la fin de la guerre car leur acte de solidarité n'a pas été reconnu par l'Etat français. Ce lieu a donc été préservé durant toutes ces années, et il est toujours possible de voir de nombreux objets, au sol, laissés par les civils au moment de leur départ.

Les archéologues cherchent donc à comprendre le fonctionnement de cette carrière, qui est encore dans un très bon état de conservation. Pour cela, les archéologues ont fait appel à l'INSA de Strasbourg qui, par le biais de méthodes d'acquisitions tridimensionnelles telles que la photogrammétrie et la lasergrammétrie, permet de leur fournir des documents comme un plan topographique de la carrière, des orthophotos du sol de différents secteurs, des plans avec des courbes de niveau ainsi que des coupes de la volumétrie.

Plusieurs Projets de Recherche Technologique (PRT) ont déjà été réalisés en 2015 et 2018 afin de fournir aux archéologues les documents qu'ils souhaitent, ainsi qu'un Projet Fin d'Etudes en 2016.

2. Objectifs de l'étude

Ce Projet de Fin d'Etude a pour but de traiter les données acquises cette année, à savoir des données lasergrammétiques de nouvelles parties de la carrière pour poursuivre la réalisation du plan topographique mais également de nouveaux secteurs photogrammétriques afin de créer des orthophotos de ces derniers. Différents rendus pourront être également réalisés avec notamment la création de plans avec des courbes de niveaux des secteurs photogrammétriques, des coupes de la volumétrie. L'ensemble de ces documents permettront aux archéologues de pouvoir étudier l'occupation de la carrière par les réfugiés lors du bombardement de Caen.

L'ensemble des données 3D collectées au cours de ces différents projets, avec notamment les modèles 3D texturés, pourront être utilisées dans le cadre de la réalité virtuelle afin de faire découvrir au public la carrière virtuellement. A terme, les éléments réalisés dans la partie réalité virtuelle pourront être intégrés et utilisés dans différents musées normands notamment au mémorial de Caen et à celui de Falaise, ce dernier étant consacré à la vie des civils pendant la guerre.

3. Acquisitions et traitements des données

Les acquisitions sur site se sont déroulées durant 3 jours du 19 au 22 Février 2018. De nouvelles zones de la carrière ont été acquises par lasergrammétrie à l'aide d'un scanner laser terrestre, ici le Faro Focus 3D X330, mais également de nouveaux secteurs photogrammétriques à l'aide d'un Canon EOS 5SDR et d'un iPhone 8 Plus.

Afin de procéder au géoréférencement des données lasergrammétiques et photogrammétriques, un tachéomètre Trimble M3 a été utilisé. Il faut savoir que la carrière possède son propre système de coordonnées, à savoir un système local.

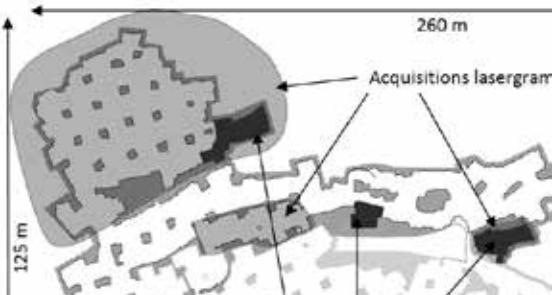


Figure 1 : Aperçu (sur fond de plan topographique) des zones acquises cette année

3.1 Acquisitions et traitements lasergrammétiques

Au cours des acquisitions, plusieurs zones ont été numérisées : une grande zone où près de 25 stations ont été nécessaires pour acquérir toute la volumétrie de cette pièce, et deux zones plus petites où pour chacune 5 stations ont été effectuées. Deux stations ont été réalisées à l'extérieur de la carrière afin de débiter la visite virtuelle en extérieur puis d'y descendre par le puit d'accès. Des sphères ont été positionnées afin de procéder ultérieurement à la consolidation et au géoréférencement. Hormis, pour la cuisine où les cibles à codes-barres positionnées pour les acquisitions photogrammétriques ont été utilisées.

La précision des consolidations effectuées sur les logiciels Faro Scene et Trimble Realworks est de l'ordre de 1 à 2 mm. Alors que la précision du géoréférencement est de l'ordre de 2 à 4 mm. Ce qui est acceptable compte tenu des traitements qui vont être réalisés par la suite ainsi que de la précision attendue.

3.2 Acquisitions et traitements photogrammétriques

L'apport de la photogrammétrie permet de réaliser des orthophotos, qui vont par la suite être digitalisées par les archéologues. Afin de parvenir à ce résultat, le logiciel Photoscan a été utilisé, en appliquant, la chaîne de traitements suivante : l'orientation des images, le géoréférencement, la densification, la génération et le texturage du maillage, et enfin la génération des orthophotos.

Lors des acquisitions photogrammétriques, plusieurs tests ont été effectués avec différents capteurs. Tout d'abord, des photos ont été faites à l'aide du Canon EOS 5DS R, et vont servir de référence. En ce qui concerne les tests, des vidéos ont été réalisées à l'aide du Canon EOS 5DS R, ainsi qu'avec un iPhone 8 Plus. Le but de ces tests est de comparer les différentes étapes du traitement photogrammétrique entre les différents capteurs.

Pour les traitements concernant les vidéos, il a tout d'abord fallu extraire des images suivant un intervalle de temps. Afin d'avoir un recouvrement convenable entre plusieurs clichés successifs, un intervalle de temps d'une seconde a été choisi. A la suite de cette étape, les photos ont été triées manuellement afin d'éliminer les photos floues. Une correction gamma a été appliquée aux images issues des vidéos faites avec le Canon EOS 5DSR afin de les éclaircir et d'homogénéiser leurs couleurs. Les différents traitements photogrammétriques ont, ensuite, pu être effectués.

	Canon EOS 5DS R (Photos)	iPhone 8 Plus (Vidéos)	Canon EOS 5DS R (Vidéos)
Nombre de points	6	6	7
Erreur 3D (mm)	2,4	5,3	21,7

Tableau 1 : Géoréférencement des différents tests effectués

On peut voir dans le tableau 1 que les précisions des géoréférences issues des photos faites avec le Canon et des images issues des vidéos de l'iPhone sont similaires. Cependant le géoréférencement des données issues de la vidéo du Canon est un peu moins précis que les deux précédents. En effet, il est possible de voir sur la vidéo qu'une zone noire est présente sur les contours. En effet lors de l'acquisition, il était difficile de régler l'appareil photo de manière à ce que la luminosité soit suffisante. Cela influe donc sur l'orientation des caméras car des points de liaison ne peuvent pas être détectés sur les bords des images, et donc le géoréférencement en est également impacté.

On peut voir les différences de colorisation et de qualité des orthophotos sur la figure 2. Les orthophotos faites à partir des vidéos de l'iPhone 8 plus et du canon EOS 5DS R sont de moins bonne qualité. En effet, certaines zones sont légèrement floues et des ombres sont également présentes.



Figure 2 : Zooms sur les orthophotos à partir : des photos du Canon EOS 5DS R (à gauche), des vidéos de l'iPhone (au milieu), des vidéos du Canon EOS 5DSR (à droite)

Des tests ont, par ailleurs, été réalisés avec la caméra 360, Ricoh Thêta. Cependant, ils n'ont pas été très concluants. En effet, les zones de recouvrement entre clichés sont très faibles. En effet, on peut voir sur la figure 4 que ces zones se trouvent essentiellement sur les murs, et légèrement sur le sol et le plafond. De plus, les conditions d'éclairage varient légèrement entre les différents clichés, ce qui rend le calcul d'orientation des clichés un peu plus compliqué.

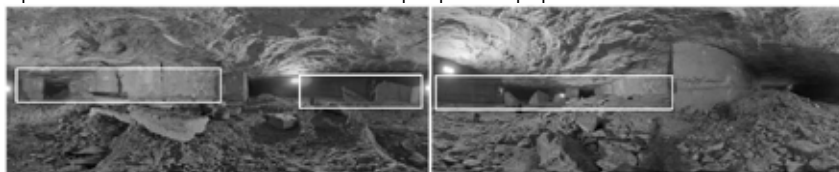


Figure 3 : Zones de recouvrement entre les images 360°

4. Production des rendus

Plusieurs rendus sont souhaités par les archéologues à savoir un plan topographique, des orthophotos des secteurs, des plans avec des courbes de niveaux de ces mêmes secteurs et des coupes de la volumétrie.

Afin de mettre à jour le plan topographique avec les zones acquises cette année, il est nécessaire d'insérer les contours des orthophotos, les contours et les courbes de niveaux des nouvelles zones acquises. Un maillage est alors effectué, sur 3DReshaper, à partir du nuage de points lasergrammétrique échantillonné à 1pt/5cm. Ensuite, les contours de la volumétrie sont extraits, ainsi que les courbes de niveaux avec une équidistance de 50 cm. La mise en page est ensuite réalisée sur AutoCAD.

Concernant les plans avec les courbes de niveaux, la méthode est semblable à celle expliquée précédemment. En effet, les nuages de points denses issus de Photoscan ont été échantillonnés à 1pt/cm et ensuite segmentés afin de supprimer les points correspondant à des objets et pierres. Une fois le maillage réalisé, les courbes de niveaux ont été créées avec une équidistance de 10cm. La mise en page a été effectuée sur AutoCAD, une orthophoto avec une taille de pixel objet de 2mm est également insérée.

Pour les coupes de la volumétrie, le maillage effectué pour la mise à jour du plan topo est utilisé. Si des secteurs se trouvent sur cette coupe, les maillages réalisés précédemment sont insérés. Une fois la polyligne extraite sur 3DReshaper, la mise en page est également réalisée sur AutoCAD.

5. Réalité Virtuelle

Nous avons eu la possibilité de pouvoir présenter ce projet au Concours Têtes Chercheuses, que nous avons remporté. Ce dernier vise à financer des projets normands en cours, à hauteur de 10 000€. Au cours d'un workshop, nous avons pu évoquer quelques pistes, solutions et éléments qui seraient intéressants à présenter lors d'une visite virtuelle afin que le visiteur puisse découvrir la carrière et en comprendre son histoire.

Plusieurs solutions de réalité virtuelle et réalité augmentée ont été étudiées, avec notamment les logiciels Sketchfab et Augment. Le premier logiciel, Sketchfab, permet de visualiser un modèle 3D en ligne à l'aide d'un casque de réalité virtuelle ou bien avec un cardboard et un smartphone. L'application Augment permet de superposer à l'aide d'un smartphone, un modèle 3D sur un plan, ou une orthophoto. Cependant, le volume de données qu'il est possible à insérer est relativement faible, il n'est donc possible d'insérer que quelques secteurs. C'est pourquoi d'autres solutions ont été étudiées.

L'ensemble des nuages de points créés lors des différents projets ont été assemblés afin de pouvoir faire une visite virtuelle complète des lieux. Pour cela, les nuages de points lasergrammétriques ont été échantillonnés à 1pt/1cm alors que les nuages de points photogrammétriques ont été échantillonnés quant à eux à 1pt/2mm. Le nuage de points global a été inséré dans le logiciel Scene, afin de découvrir la carrière via de la réalité virtuelle.

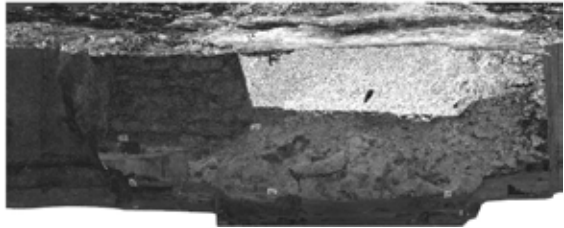


Figure 4 : Vue du nuage de points depuis la cuisine

Par la suite, des tests ont été effectués sur les logiciels Unity et Unreal Engine, en utilisant les modèles 3D maillés lasergrammétriques et photogrammétriques texturés. En effet, les rendus avec les modèles 3D permettent une meilleure immersion. Les modèles lasergrammétriques utilisés sont ceux créés précédemment, texturés à partir des photos 360° issues du scanner laser. Cependant, une segmentation des modèles lasergrammétriques a été nécessaire afin d'insérer les modèles photogrammétriques. Cette étape est manuelle et chronophage, car une segmentation ainsi que la création d'une jointure des deux types de modèles est nécessaire.

Le logiciel Unreal Engine a été retenu car le rendu concernant le texturage était de meilleure qualité que celui proposé par Unity.

6. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études, enchaîné au projet de recherche technologique, aura permis de continuer la numérisation du site via des techniques tridimensionnelles telles que la photogrammétrie et la lasergrammétrie, afin de fournir aux archéologues divers documents qui leur permettent de comprendre l'occupation de la carrière par les civils lors des bombardements de Caen. L'intégration des modèles 3D texturés lasergrammétriques et photogrammétriques dans un moteur de jeu vidéo permettra au public de découvrir virtuellement la carrière grâce à une technologie innovante, à savoir la réalité virtuelle. Ainsi la carrière peut être préservée de toute dégradation.

Plusieurs perspectives d'amélioration et de développement peuvent être dégagées de cette étude. La réalité virtuelle, notamment sur le logiciel Unreal Engine, pourrait être améliorée en intégrant des images, en insérant des textes explicatifs. Divers sons pourraient également être insérés afin de fournir au public une meilleure immersion.

La vidéo de présentation de la carrière débutée en 2016 pourrait être complétée avec l'intégration des différents modèles texturés que nous avons à notre disposition.

La mise en place du BIM au sein de structures gestionnaires d'actifs immobiliers : foncières, bailleurs sociaux et syndics de copropriété.

PFE présenté par : **Camille GOURGUECHON**
Société d'accueil : **SELARL Lambert & Associés**
Directeur de PFE : **Régis LAMBERT**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Origine et contexte de l'étude

Alors que le BIM (Building Information Model, Modeling et Management) commence à se généraliser dans les phases de planification et construction de la vie du bâtiment et, dans une moindre mesure, pour la réhabilitation de bâtiments existants, il reste encore peu utilisé par ceux qui en assurent la gestion. Pourtant, la phase d'exploitation du bâtiment, qui concerne cette dernière catégorie de professionnels, s'étale sur 30 à 50 ans, contre environ quatre ans entre les phases de programmation et mise en service (Figure 1). En termes de coûts pour un bâtiment tertiaire hors foncier et frais financiers, le coût d'investissement correspond à 25% du coût total de l'immeuble sur son cycle de vie. La différence correspond à la phase d'exploitation et de maintenance technique qui est évaluée donc, à environ 75% du coût global sur la vie du bâtiment.

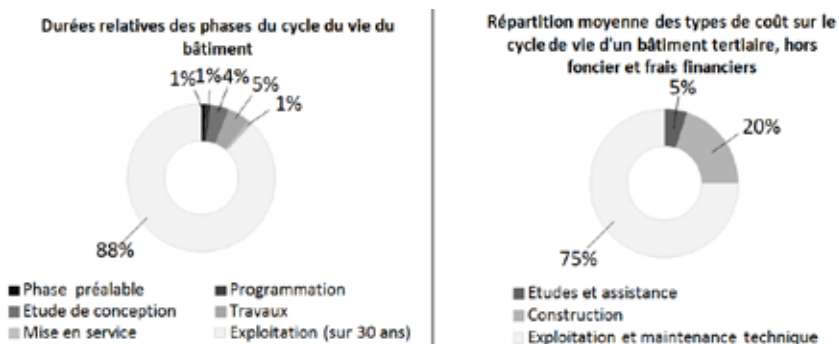


Figure 1: Statistiques sur le cycle de vie immobilier, d'après Navarro Jean Jacques (2016)

La multiplication des contraintes réglementaires et de performance énergétique a contribué à révéler l'importance de la donnée patrimoniale. Partagée et multipliée, elle soulève des sources d'économies et d'innovation. Au vu de ces chiffres, l'appropriation du BIM, qui promet une facilité de gestion et des économies tout au long de la vie du bâtiment, par les gestionnaires d'actifs immobiliers est devenue un enjeu majeur.

Fondé en 1977, par Jean-Georges Lambert à Sarre-Union, le cabinet de géomètres-experts Lambert & Associés figure comme l'un des cabinets historiques en Alsace Lorraine. A l'origine centrée autour des activités de foncier et de topographie, l'entreprise a su diversifier ses activités en développant des compétences transversales et notamment dans le domaine de l'immobilier. Le cabinet est amené ainsi à travailler pour des syndics de copropriété, des bailleurs sociaux ainsi que des sociétés foncières. Dans le cadre d'une volonté de renforcement de sa collaboration avec ces professionnels, l'idée est née de proposer cette étude sur la mise en place du BIM au sein de structures gestionnaires d'actifs immobiliers. Le souhait étant d'y associer les clients historiques du cabinet, elle se focalise sur les trois grands groupes de gestionnaires d'actifs immobiliers suivant : les sociétés foncières, les bailleurs sociaux et les syndics de copropriété.

2. Les Gestionnaires d'actifs immobiliers

Une première partie de cette étude se focalise sur la distinction des différents types de gestionnaires d'actifs immobiliers étudiés, les enjeux à relever par ces professionnels, et les moyens actuels mis en place.

Définitions

Sociétés foncières, bailleurs sociaux et syndicats de copropriété ont des domaines d'intervention bien différents. Les **sociétés foncières** sont des entreprises commerciales dont l'objet est la constitution, la gestion et l'exploitation d'un patrimoine immobilier avec pour objectif de le louer et/ou de le valoriser au mieux de ses intérêts. Il s'agit principalement d'immeubles de bureaux mais aussi de parkings souterrains, centres commerciaux, ou d'immeubles à affectation industrielle, d'habitation ou d'hôtellerie. Les **bailleurs sociaux** sont des organismes propriétaires de biens immobiliers qu'ils louent à des personnes à faibles revenus contre des loyers plafonnés. Ils sont pourvus d'une mission d'intérêt général et leur activité est régie par la loi du 6 juillet 1989 pour l'amélioration des rapports locatifs. Enfin, les **syndics de copropriété**, obligatoires pour toute copropriété, s'assurent de l'exécution des dispositions du règlement de copropriété et des décisions prises en assemblée générale et réalisent la gestion courante de l'immeuble.

Les distinctions entre ces différents acteurs de la gestion d'actifs immobiliers ont été résumées dans le tableau 1. Un niveau d'ambition a été défini pour chacun d'entre eux. Ce critère représente les objectifs et la volonté d'évolution dans leurs pratiques. Il est fortement lié au champ d'activité de chacun et à leur souveraineté dans leurs choix.

	Bailleurs sociaux	Gestionnaires fonciers	Syndics de copropriété
Part du bâtiment concerné	Bâtiment entier	Bâtiment entier	Uniquement parties communes
Propriétaire du patrimoine	Fonds propres Public ou privé	Actionnaires	Nombreux propriétaires privés
Quantité de patrimoine	100 000m ² à 1M m ²	100 000m ² à 1M m ²	< 50 000m ²
Type de locaux	Logements	Essentiellement bureaux et industrie, entrepôt, commerce	Essentiellement logements et bureaux dans une moindre mesure
Entretien	Pour partie, propre personnel d'entretien (Bien pour procédures de mise à jour)	Prestataires extérieurs	Prestataires extérieurs
Evolution des locaux	faible	forte	Très faible
Niveau d'ambition	++	++	-

Tableau 1: Synthèse comparative des différents acteurs de gestion d'actifs immobiliers

Enjeux

Les gestionnaires immobiliers étudiés ont ainsi en charge un parc immobilier variant d'environ 10 000 m² pour les syndicats de copropriété à quelques millions de mètres carrés pour les plus grands bailleurs sociaux et sociétés foncières. Chaque immeuble a sa propre histoire avec une date de construction initiale, des travaux d'entretien ou de rénovation de nature différente, des aménagements et des équipements variables. Nous pouvons synthétiser les enjeux à relever par ces acteurs sous les thèmes de la maintenance, la sécurité, l'accessibilité, la commercialisation, et l'analyse financière. Tout ceci passe par une bonne gestion de la documentation associée aux immeubles et sa mise à jour au quotidien et à long terme.

Pratiques actuelles

Dans les faits les sociétés foncières et les bailleurs sociaux ont largement intégré des logiciels de gestion patrimoniale. Cependant des manques se font sentir. Bien souvent, les maîtres d'ouvrages reçoivent comme dossier des ouvrages exécutés (DOE) une grande quantité de documents papier ou informatiques divers. Une grande majorité de ces documents ne sont pas exploitables et sont envoyés aux archives. Le secteur dépense ainsi des millions d'euros et un temps considérable à recréer l'information ou à la rechercher. Le BIM a donc un enjeu de mémoire contre la perte de savoir due aux restructurations, regroupements ou transmissions de patrimoine ou simplement au renouvellement des équipes.

Avec ces premières investigations, est apparu rapidement que les trois catégories ciblées par cette étude ne pouvaient pas occuper le même poids dans l'étude. L'une d'entre elle, les bailleurs

sociaux, est bien avancée dans cette approche. Si l'on prend le cas de CUS Habitat, bailleur social sur l'Eurométropole de Strasbourg, la solution logicielle a d'ores et déjà été retenue, la constitution de la base de données patrimoniale BIM a débuté cette année et le planning prévisionnel de mise en œuvre de leur projet BIM Gestion est défini jusqu'en 2021. Les syndicats de copropriété ont des enjeux très différents, notamment puisque leur périmètre ne concerne que les parties communes des immeubles en copropriété et que la plupart des décisions sont prises de manière collégiale en assemblée générale. La suite de l'étude se concentre ainsi plus particulièrement sur les sociétés foncières qui apparaissent comme la cible la plus mûre pour introduire le BIM à leurs activités.

3. Eléments de réflexion lors de la mise en place du BIM pour la gestion.

L'objectif du sujet étant la mise en place du BIM dans ces structures, il semblait indispensable de souligner quelques points incontournables à aborder lors de l'introduction d'un processus BIM, à savoir la granulométrie de la maquette, la gestion de la base de données patrimoniale et l'interopérabilité des solutions. Les réponses à ces questions varieront sûrement d'un gestionnaire à l'autre mais nous avons pu dégager quelques lignes communes. De ces différents points résumés ici, dépend la pérennité des données.

La littérature, au sujet du niveau de détail (LOD) nécessaire pour la gestion patrimoniale, préconise un LOD 200 pour la partie structure et un LOD 300 pour le reste du bâtiment. En phase d'exploitation/maintenance du bâtiment, la part de l'aspect graphique diminue au profit des données sémantiques. Il est primordial de définir les priorités quant aux activités à gérer en mode BIM.

En ce qui concerne la gestion de la base de données, définir un élément déclencheur pour les mises à jour ainsi que des personnes dédiées pour maintenir la base de données apparaît comme incontournable. Des projets précédents ont montré que l'on ne pouvait pas compter sur des mises à jour spontanées par les différents intervenants.

Enfin, bien que le nombre d'intervenants agissant sur la maquette et les échanges soient réduits en phase exploitation, l'interopérabilité reste un élément clef d'un processus BIM. Au-delà de la combinaison de plusieurs logiciels métiers, le besoin, pour les gestionnaires, se trouve dans la conservation de la base de données dans le temps face à l'obsolescence des solutions logicielles par rapport à la durée de la phase d'exploitation. L'adoption du standard Industry Foundation Classes IFC, proposé par près de 140 logiciels, est actuellement la solution privilégiée pour encourager l'interopérabilité. C'est le principal format supporté par les logiciels BIM dédiés aux gestionnaires de patrimoine immobilier qui se développent ces dernières années. On trouve principalement sur le marché français les solutions ACTIVE3D de Sopra Steria, Abyla de Labéo, Allplan Allfa, Carl software ou SOFYA. L'ensemble de ces solutions se rejoignent sur leur format puisqu'elles se présentent toutes sous la forme d'une plateforme web en ligne. L'accent est mis sur le développement d'interfaces simples d'utilisation. Certaines proposent même des fonctionnalités de modification accessibles à des personnes non formées à la modélisation. Avec ces solutions BIM, contrairement à celles utilisées jusqu'à présent, les données et documents de gestion sont rattachés à la maquette constituant une ossature à la base documentaire. La maquette reste bien sûr aussi une source d'information pour les métrés.

4. Etude de cas

Pour terminer, une société foncière regroupant à la fois les activités de maintenance s'est associée à l'étude autour de deux cas pratiques issus de son portefeuille immobilier. L'un disposant du dossier des ouvrages exécutés papier et l'autre non, la réalisation de maquettes numériques pour ces immeubles a constitué une base de travail pour émettre quelques recommandations dans l'accompagnement de gestionnaires d'actifs immobiliers n'ayant pas encore franchi le pas.

La création de maquettes

Deux maquettes ont ainsi été créées à l'aide du logiciel de modélisation Revit. L'utilisation d'objets génériques a été privilégiée lorsque les références d'équipements étaient inconnues. Le BIM différencie de la simple modélisation 3D par l'association de paramètres descriptifs aux objets, nous avons complété la modélisation par l'introduction de paramètres associés aux objets. Au-delà de la composition des éléments du bâtiment, généralement définie avec le type d'objet, nous avons ainsi

renseigné des paramètres tels que l'entreprise ayant posée l'objet, le modèle, le fabricant, un lien vers le site du fabricant ou une documentation technique. Nous avons aussi mis l'accent sur l'introduction de métadonnées en renseignant un paramètre « *Source_Données* », indiquant pour chaque objet la source d'information d'après laquelle celui-ci a été introduit. La réalisation de levés complémentaires a permis de lever des incertitudes géométriques comme sur la hauteur de portes, ainsi que de repérer l'emplacement des équipements techniques visibles tels que les climatisations, leur télécommande murale et les convecteurs, les sanitaires, les compteurs, les interphones, ou encore les blocs secours, les alarmes incendies et les extincteurs, ainsi que le nombre de prises et de luminaires par pièce. Ces maquettes numériques ont été organisées de telles sortes que les différents objets introduits puissent être localisés par niveau, zones puis espaces ; les zones regroupent les espaces occupées par un même locataire.

Interroger la maquette

Une fois les maquettes BIM créées, nous avons parcouru les possibilités offertes par celles-ci. La maquette numérique est la source d'un certain nombre de documents associés. Ce sont les documents numériques qui peuvent être générés automatiquement à partir de la maquette. On peut ainsi extraire des plans, des coupes, des listings, des vues perspectives et des visites virtuelles. Ainsi par la capitalisation des informations de date des équipements, nature, prix, garanties, dates d'interventions, le gestionnaire peut avoir accès par requêtes aux quantités précises d'équipements de même type (fenêtres, sols, ...) à remplacer, aux dates d'intervention conseillées et anticiper ses dépenses avec un échéancier financier. L'exemple présenté ici est celui des vitrages sur la façade avant d'un des bâtiments modélisés. Les informations de compositions, présentes dans le DOE ont été introduites dans la maquette. Des filtres permettent d'afficher ces panneaux selon leur type de vitrage (Figure 2).

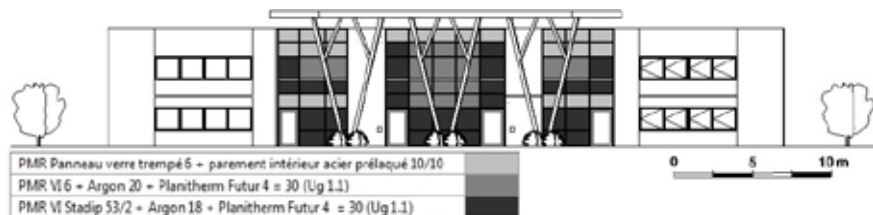


Figure 2: Panneaux de mur rideau selon leur composition par filtre et colorisation.

Le même type de requête peut également se faire sous la forme de nomenclature (Figure 3). On obtient alors une quantification des surfaces et le nombre de panneaux par bâtiment.

<Vitrage - Panneaux de mur rideau>			
A	B	C	D
Type	Surface (m²)	Nombre	Entreprise
EX3			
Panneau verre trempé 6 + parement extérieur acier prélaqué 10/10	26,68	23	SIBLER
Vi 6 + Argon 20 + Planitherm Futur 4 = 30 (Ug 1.1)	24,66	16	SIBLER
Vi Stalup 53/2 + Argon 18 + Planitherm Futur 4 = 30 (Ug 1.1)	45,58	30	SIBLER
EX3: 69	96,94	69	
Total général: 69	96,94	69	

Figure 3: Panneaux de mur rideau selon leur composition par nomenclature.

5. Conclusion

A travers ce projet, nous avons pu constater les limites des méthodes actuelles employées par les gestionnaires d'actifs immobiliers face aux enjeux qu'ils ont à relever. La transition vers le BIM apparaît alors comme incontournable pour faciliter leurs activités. A partir de l'exemple de deux immeubles de bureaux en gestion, nous avons pu voir la difficulté de mettre en place un référentiel patrimonial BIM sur l'ensemble d'un patrimoine. Ceci est exacerbé par une hétérogénéité des données à disposition des gestionnaires d'actifs immobiliers. La rapidité avec laquelle est perdue la connaissance nous a également frappés. Pour pérenniser les informations contenues dans les maquettes, les gestionnaires devront donc veiller à leur mise à jour systématique. Outre la phase de modélisation du patrimoine existant, le géomètre pourra prendre part, pour la saisie de mises à jour graphiques, à ces transformations des méthodes de travail qui vont s'opérer chez les gestionnaires d'actifs immobiliers, ces prochaines années.

Drone marin de surface : Quelles applications pour l'exploration pétrolière ?

PFE présenté par : **Maiwenn KERYELL-EVEN**
Société d'accueil : **TOTAL E&P**
Directeur de PFE : **Frédéric AUGER**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



1. Introduction

L'avenir de la production pétrolière mondiale dépend de la prospection de territoires encore inaccessibles (raisons politiques ou climatiques) et de l'évolution des technologies (profondeur des forages offshore, exploration en zone arctique). Ces points convergent pour aboutir à un pétrole plus rare et plus cher.

Les compagnies pétrolières se voient contraintes de placer de plus en plus leurs exploitations en offshore très profond et dans des zones en mer peu faciles d'accès et pouvant être dangereuses pour un équipage ; ce contexte semble alors faire du drone marin un atout. Cette nouvelle technologie, qui se réfère à tout véhicule pouvant se déplacer à la surface de l'eau sans équipage à bord, permettrait une amélioration de la sécurité et de l'accessibilité au site d'étude. De plus, cela pourrait entraîner un gain de temps, pouvant engendrer une réduction des dépenses.

À l'heure où Total cherche encore à rationaliser ses coûts et à optimiser ses opérations, on pourrait être amené à choisir un drone marin de surface à la place d'un bateau conventionnel. En effet, jusque-là, des bateaux d'acquisition, de support ou même des plateformes de forage sont utilisés pour des opérations de levé et de positionnement spécifiques.

C'est à l'issu de nombreuses recherches et à partir d'un cas concret que nous souhaitons montrer ce que ce nouveau support de navigation peut apporter à Total lors de ses opérations. Nous nous sommes donc rendus en Azerbaïdjan, mer Caspienne, pour réaliser une opération employant l'un d'eux. L'objectif était de montrer la pertinence de l'utilisation d'un drone marin de surface dans le cadre du géoréférencement d'une tête de puits sous-marine.

2. Contexte de la mission

Obtenir avec précision la position de la tête de puits est une information utile à la sécurité des travaux de forage. Par exemple, en cas de suppression au niveau du puits principal et en dernier recours, dans le cas où les installations de sécurité installées telles que le BOP¹ ne fonctionnent pas et provoquent donc une éruption, il est d'usage de forer un puits de secours (*relief well*) pour intercepter le premier. Ce second puits a pour objectif de contrôler le relâchement de gaz ou d'huile tout en scellant le puits défectueux. Cela permet d'éviter ou de réduire les conséquences de grandes catastrophes telles qu'une marée noire ou un incendie sur la plateforme de forage.

Il y a encore peu, pour déterminer le positionnement absolu des puits d'exploration par très grande profondeur (500m et plus), on se référait à la position de surface de la table de rotation, relevée au DGNSS. Cependant, à cause de l'erreur de verticalité de la tige de forage, cette méthode entache les résultats d'une grande incertitude (10-15m, voire plus). Or un positionnement précis est une information importante lors des opérations de forage. Plus la précision de mesure sur la tête de puits sera grande, plus petite sera la cible à intercepter à plus de 1000m de profondeur. C'est pourquoi, pour pallier à cette incertitude, d'autres méthodes de positionnement ont été mises en place.

Depuis quelques années, Total emploie une technique de positionnement par acoustique appelée box-in. Cette technique consiste à faire naviguer un bateau muni d'un transducteur² en cercles autour de la tête de puits. La tête de puits étant munie elle-même d'un transpondeur³, on réalise par

¹ Blow Out Preventer : valve de sécurité anti-éruption

² Emetteur acoustique

³ Récepteur acoustique

acoustique des mesures de distance entre les deux dispositifs. Equipé d'un récepteur GNSS, les coordonnées du bateau sont connues en absolu tout du long de sa rotation. En réalisant les mesures de bras de levier entre son antenne GNSS et son transducteur, on connaît les coordonnées du transducteur. Ainsi, à l'aide des mesures de distances entre le transpondeur et le transducteur, on obtient par multilatération une position de la tête de puits.

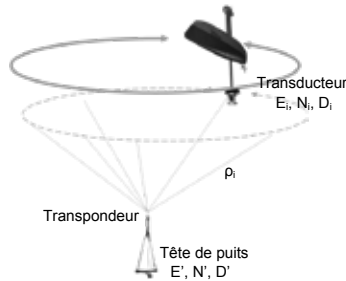


Figure 1 : Aperçu du principe du box-in (sans échelle) - @iXblue

3. Méthode de calcul

a. Variables et mesures

Les paramètres à prendre en compte lors d'un positionnement par acoustique sont :

- les vecteurs r_i des coordonnées E_i, N_i, D_i du transducteur aux différents instants t ;
- le temps de trajet aller-retour de l'onde à l'instant t (*Two Way Travel Time*, $2WTT$) ;
- la vitesse du son dans le milieu d'étude (*Sound Velocity*, SV) ;
- le temps de réponse du transpondeur (*Turn Around Time*, TAT) ;
- le vecteur r des coordonnées approchées E', N', D' du transpondeur ;
- les différents bras de levier du transpondeur et du transducteur.

La distance entre le transducteur et le transpondeur à un instant t est mesurée de manière suivante :

$$\rho_{td-tp} = 0.5 * SV * (2WTT - TAT) \quad (1)$$

b. Compensation par les moindres carrés

Les observations issues d'un box-in ne consistent en aucun cas en des mesures angulaires. Nos données brutes se composent donc de nombreuses distances à une cible depuis des points connus en coordonnées. La position finale $r(E, N, D)$ du transpondeur s'acquiert par des itérations par les moindres carrés. La résolution se base sur la minimisation du carré de la somme des résidus $\sum_{i=1}^n e_i^2$; avec : $e_i = (\text{distance observée} - \text{distance calculée}) = \rho_{td-tp_i} - \rho_i$ (2)

Depuis une position connue r_i à une position approchée r' , le calcul de la distance est donné par la norme euclidienne $\| \cdot \|_2$: $\|r' - r_i\|_2 = \sqrt{(E' - E_i)^2 + (N' - N_i)^2 + (D' - D_i)^2} = \rho_i(E_i, N_i, D_i)$ (3)

Pour plusieurs distances, on obtient un système à n équations. Afin de linéariser notre système, on emploie le développement en série selon la formule de Taylor. On calcule les dérivées partielles de notre fonction $\rho(E, N, D)$, ce qui nous fait obtenir notre matrice Jacobienne $A = \frac{\partial \rho}{\partial r}$.

$$A * r = \begin{pmatrix} \frac{\partial \rho_1}{\partial E} & \frac{\partial \rho_1}{\partial N} & \frac{\partial \rho_1}{\partial D} \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial E} & \frac{\partial \rho_2}{\partial N} & \frac{\partial \rho_2}{\partial D} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial E} & \frac{\partial \rho_n}{\partial N} & \frac{\partial \rho_n}{\partial D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ N \\ D \end{pmatrix}_{r(3,1)} = \begin{pmatrix} E' - E_1 & N' - N_1 & D' - D_1 \\ \rho_1 & \rho_1 & \rho_1 \\ E' - E_2 & N' - N_2 & D' - D_2 \\ \rho_2 & \rho_2 & \rho_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E' - E_n & N' - N_n & D' - D_n \\ \rho_n & \rho_n & \rho_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ N \\ D \end{pmatrix}_{r(3,1)} = \begin{pmatrix} \rho_{td-tp_1} - \rho_1 \\ \rho_{td-tp_2} - \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_{td-tp_n} - \rho_n \end{pmatrix}_{e(n,1)} \quad (4)$$

⁴ Coordonnées projetées : Easting, Northing (système géodésique Pulkovo 1942 - Azerbaïdjan) + Depth

L'écriture matricielle (cf formule 4) nous permet l'obtention des appoints et la résolution facile du système : $\Delta r = (A^T A)^{-1} A^T e$ (5)

Ces corrections sont appliquées à la position estimée du transpondeur : $r = r' + \Delta r$ (6)

Pour obtenir le vecteur r des coordonnées finales E, N, D, les calculs sont réitérés jusqu'à convergence des résidus.

4. Résultats de l'opération

Sachant que les drones marins peuvent être équipés de dispositifs DGNS et de transducteurs acoustiques, réaliser un box-in leur est tout à fait accessible. C'est donc en collaboration avec la compagnie iXblue et muni de leur drone marin de surface et de leur matériel que nous avons effectué un box-in.

Drone marin de surface	Transpondeur	Transducteur	INS	Antenne GNSS
DriX (iXblue)	MT9 (iXblue)	RAMSES (iXblue)	PHINS (iXblue)	MarineStar (Fugro)

Table 1 : Equipements employés

L'opération s'est déroulée en Azerbaïdjan, en mer Caspienne, sur la tête du nouveau puits ABD-001 du projet Absheron situé à une centaine de kilomètres de la côte. Il y est mobilisé une plateforme semi-submersible ancrée au-dessus de la tête de puits située à 500m de profondeur. L'opération s'est effectuée au sein d'une fenêtre de temps très précise, en veillant à ce qu'elle corresponde à du temps masqué, sachant que le coût journalier d'une plateforme varie entre 250 et 400k€.

La fenêtre de temps qui nous était allouée pour notre opération était donc très restreinte (3h). Nous avons su l'employer à bon escient sachant que nous souhaitions faire varier différents facteurs : vitesse, sens de l'opération, fréquence d'interrogation, rayon du cercle, pilotage manuel/auto. Cela nous permet, en plus d'avoir des résultats exploitables, de déterminer l'influence de ces facteurs sur les résultats.

Au total 4 cercles ont été réalisés :

- Cercle de rayon de 500m dans le sens des aiguilles d'une montre, vitesse de 4 nœuds, fréquence d'interrogation avec la balise 1.5s, pilotage manuel
- Cercle de rayon de 500m dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, vitesse de 4 nœuds, fréquence d'interrogation avec la balise 1.5s, pilotage manuel
- Cercle de rayon de 500m dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, vitesse de 8 nœuds, fréquence d'interrogation avec la balise 1.2s, pilotage manuel
- Cercle de rayon de 300m dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, vitesse de 4 nœuds, fréquence d'interrogation avec la balise 1.2s, autopilote

Cercle n°	1	2	3	4
Sens	Clockwise	Anticlockwise	Anticlockwise	Anticlockwise
Pilotage	Manuel	Manuel	Manuel	Autopilote
Rayon (m)	500	500	500	300
Vitesse (knts)	4	4	8	4
E (m)	9489880.11	9489880.09	9489880.09	9489880.14
N (m)	4422495.98	4422496.01	4422496.05	4422495.97
Depth (m)	465.32	465.39	465.38	465.39
Ecart-type sur les résidus	0.07	0.06	0.19	0.23
Observations (utilisée/totales)	1011/1033	1007/1078	826/832	952/1017
Durée (hh:mm:ss)	00:26:00	00:27:06	00:16:44	00:16:59

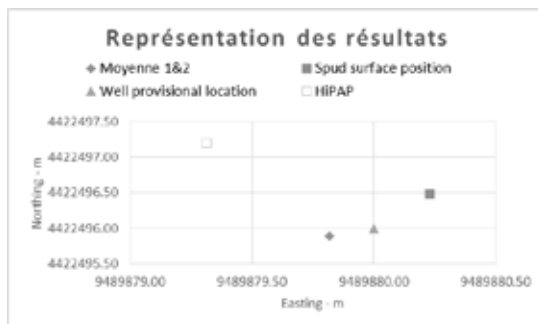
Table 2 : Récapitulatif des résultats (système géodésique : Pulkovo 1942 – Azerbaïdjan)

En analysant le tableau des résultats, on notera des résultats précis au centimètre pour les 2 premiers cercles, dont on gardera la moyenne de leurs résultats comme coordonnées finales de la tête de puits. Les 2 derniers cercles sont d'une précision décimétrique, ce qui s'explique par un jeu de mesures moins important et de la présence de plus d'interférence. Dans tous les cas, nous sommes bien inférieurs à la précision métrique correspondant au critère de satisfaction recherché pour cette opération.

5. Contrôles des résultats

Suite à une précédente mission, la plateforme mobilisée sur site était munie d'un transducteur calibré, le HiPAP⁵ de Kongsberg. Un deuxième transpondeur, compatible avec ce dispositif, a donc été placé sur la tête de puits aux côtés de celui employé avec le DriX. Cette autre mesure, faite en parallèle du box-in, permettra de connaître une position réelle de la tête de puits. Elle sera considérée comme "la référence" et sera comparée aux mesures obtenues à l'aide du DriX. Cela permet de faire une étude qualitative de nos valeurs en sortie. Il est également intéressant de réaliser un comparatif avec la position souhaitée avant forage et celle mesurée en surface au moment de celui-ci. Cela fournit des informations quant à la capacité d'atteindre une cible sur le fond marin et d'avoir une valeur de l'incertitude issue de l'erreur de verticalité de la tige de forage.

Les différentes positions correspondant aux différents moyens et moments de mesure sont représentées sur le graphe qui suit. Les positions prévisionnelles, en surface et celles issues de nos calculs sont proches au mètre près. Les plus gros écarts (>1m), rencontrés avec la position issue de l'HiPAP, s'expliquent par le fait que la précision de cette méthode vaut $\sigma = (0.3\% \times \text{hauteur d'eau})$ soit 1.5m à 500m.



Graphie 1 : Représentation des résultats (système géodésique : Pulkovo 1942 – Azerbaïdjan)

6. Conclusion et perspectives

Ce projet comprenant une grande partie de recherche a permis la rédaction d'un état de l'art complet sur l'application de drones marins de surface et sa possible ouverture au domaine de l'exploration pétrolière. La mise en application permet par ailleurs de mettre en évidence les points d'amélioration, de réaliser une étude des résultats ainsi que d'estimer si l'attente initiale a pu être satisfaite.

A la suite d'une étude de besoin, on a voulu démontrer à l'aide d'un cas concret que l'utilisation d'un drone marin de surface est bénéfique au domaine de l'exploration pétrolière. Dans notre exemple, la théorie voudrait que la méthode de box-in réalisée par un drone de surface nous fasse faire des économies de temps, de moyens et d'argent ; la pratique nous a permis de conclure sur la réalité ou non de ces suppositions.

Finalement, ce test a pu mettre en évidence les complications logistiques que la méthode implique : transport du véhicule, autorisations, déploiement... Il faut cependant garder à l'esprit que plus on réalisera cette opération, plus on gagnera en automatisme. On espère que les réflexions que l'on a pu avoir au cours de cette étude permettront de donner à d'autres la possibilité de la réaliser voire même de l'améliorer. Cette étude offre l'opportunité de témoigner de la viabilité et durabilité de cette opération. La promotion et l'élargissement du champ d'application des drones marins de surface ne convaincra que par des exemples et des résultats concrets. Nos résultats permettront de conclure sur la précision de la méthode et de les comparer à ceux s'effectuant à l'aide de moyens conventionnels.

⁵ High Precision Acoustic Positioning

Étude du potentiel d'un drone aquatique dans un cabinet de géomètre expert pour les relevés bathymétriques et la modélisation 3D des berges en eaux intérieures

PFE présenté par : **Lilian MANGIN**
Société d'accueil : **GE Infra**
Directrice de PFE : **Mme. Audrey ALAJOUANINE**
Correcteur : **M. Emmanuel MOISAN**



1. Introduction

1.1. Contexte du projet

Créé en 1966, le cabinet de géomètres experts GE Infra, situé à Toulouse, évolue constamment pour rester à la pointe de la technologie. Ce développement a entraîné la création de pôles au sein de la structure pour faciliter l'organisation. L'activité du cabinet repose principalement sur la photogrammétrie aérienne, tout en possédant les compétences pour répondre aux besoins en matière de travaux fonciers, relevé topographique, aménagement, SIG, cartographie et bathymétrie. Ainsi, l'entreprise propose des services dans plusieurs domaines de la topographie, en cherchant à optimiser les rendements, à améliorer la précision des livrables et la sécurité du personnel.

La bathymétrie est la science qui s'intéresse aux reliefs et aux profondeurs en eau. L'objectif est de cartographier l'espace subaquatique. Ce projet de fin d'études intervient dans le cadre de l'étude sur l'opportunité d'acquisition d'un drone aquatique par la société GE Infra. Le contexte économique actuel encourage la diversification des activités ainsi que l'innovation. L'entreprise souhaite donc développer ses activités bathymétriques en plein essor. Pour y parvenir, l'issue envisagée est de remplacer le système d'acquisition actuel, composé d'une barque de 84 kg équipée d'un moteur hors-bord de 40 kg et d'un sondeur monofaisceau mono-fréquence. Le principal inconvénient de cette embarcation est sa maintenance, notamment quand la zone de mise à l'eau est difficile d'accès. En effet, le transport de la barque requiert deux personnes et peut mettre en danger leur santé physique. Il est donc important d'éviter tout accident sur site, pour suivre la politique de sécurité de l'entreprise.

L'usage d'un drone marin de surface apparaît comme une solution innovante pour répondre aux critères imposés. Cette plateforme mobile dispose de nombreux avantages par rapport aux navires conventionnels. Parmi ceux-ci, la sécurité du personnel est un aspect primordial, puisque le drone permet de supprimer la présence humaine à bord et ainsi éviter tout risque de chute ou de noyade. En effet, le cabinet est amené à répondre à des missions bathymétriques où il existe un certain danger pour les employés. Particulièrement lorsqu'il y a du courant, cela entraîne des risques de voir le bateau se retourner, ou encore lorsque le bassin contient des produits toxiques. En plus des zones déjà accessibles par bateau, le drone peut accéder à des zones difficiles d'accès et/ou dangereuses.



Figure 1 : Drone aquatique "Monodrone" de la société Texys Marine

Un drone aquatique apporte donc des nouveaux modes d'opérations, ce qui élargit les possibilités d'intervention. Plusieurs capteurs peuvent être installés, ce qui fait du drone marin de surface une plateforme de choix pour intervenir sur un lac, un fleuve, une rivière, un ruisseau ou une carrière. De plus, l'acquisition d'une telle technologie permet au cabinet de se différencier de la concurrence, mais aussi de répondre à de nouveaux marchés bathymétriques.

1.2. Objectifs du projet

Le but de ce projet est de maîtriser la chaîne d'acquisition dans sa totalité et de définir des procédures de traitement adéquates afin de proposer aux clients des produits de qualité à des prix compétitifs. Pour y parvenir, une étude des drones marins de surface existants et des systèmes de mesures adaptables sur drone permettra de définir la solution la plus appropriée pour le cabinet. Ce choix s'appuiera également sur les différents tests de drones en conditions réelles, afin de déterminer le potentiel de chaque système.

A terme, ces analyses devront permettre d'établir une méthode de production de données stables techniquement et financièrement, s'appuyant sur le cahier des charges établi lors de ce projet.

2. Etude d'un drone marin de surface et des systèmes de mesure adaptables

L'acquisition d'un drone marin de surface permettrait deux progrès majeurs dans l'activité bathymétrique du cabinet. Le premier consiste à réduire le poids du système navigant, puisque les recherches s'orientent sur des drones légers et de petite taille, avec un poids maximum de 50 kg à vide et un faible tirant d'eau. De cette façon, le véhicule a accès à des zones de très faible profondeur (20 cm minimum). Le second permet de disposer d'un système évolutif. Un drone est équipé spécifiquement en fonction du type de mission, il est donc possible d'investir dans une solution de base, généralement un drone + un sondeur bathymétrique monofaisceau. Puis, d'ajouter d'autres capteurs afin d'améliorer la production des données.

2.1. Architecture d'un drone marin de surface

Un drone marin de surface possède la même architecture de base (Figure 2). Sa conception et le choix des différents paramètres vont dépendre du type de mission envisagé. Il convient donc de définir au préalable les critères à remplir, afin d'adopter la meilleure solution. Le cabinet GE Infra agit souvent dans des eaux où le courant est fort. Dans ce cas, il faut être vigilant sur la puissance du drone, ainsi que sur sa stabilité. Un catamaran sera plus stable qu'un monocoque. Parmi les drones étudiés, un monocoque est généralement plus puissant que le catamaran. Il est donc important de réaliser des tests en conditions réelles pour déterminer ces capacités et valider le potentiel du drone pour l'application souhaitée. Un autre facteur important est le prix. En effet, un cabinet de géomètre expert doit pouvoir maîtriser son investissement. Il est donc nécessaire de coupler cette technique à une étude financière pour analyser le rapport qualité/prix du système.

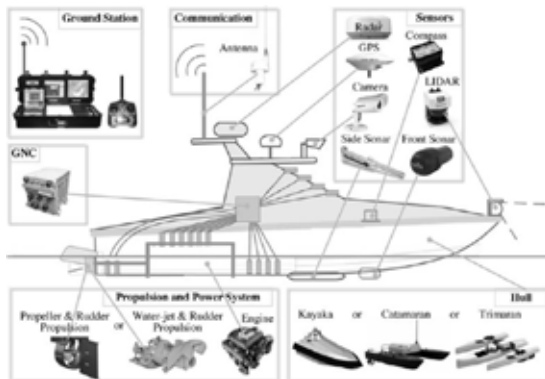


Figure 2 : Architecture de base d'un drone marin de surface (Source : [Liu et al., 2016])

2.2. Capteurs embarqués

Un drone marin de surface peut embarquer une grande diversité de capteurs. Cette capacité est limitée par sa charge utile. Ainsi, le choix des capteurs est fait en fonction du type de mission. Pour cette étude, les capteurs employés sont listés et définis dans le tableau 1 ci-après.

Capteurs	Définition	Utilisation
GNSS RTK	Localisation par satellites basée sur l'utilisation des mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis, les données sont corrigées en temps réel par une station de référence ou un réseau de stations de référence.	Position centimétrique du drone : coordonnées tridimensionnelles dans le système de référence souhaité.
Centrale inertielle de navigation	Instrument qui mesure l'orientation du drone (roulis, tangage, cap), la dynamique du mouvement (pilonnement, accélérations, rotations). La centrale inertielle prend le relais du système GNSS en cas d'absence de signal, avec une dérive qui se dégrade au cours du temps.	Améliore la mesure de position et de vitesse sur un drone aquatique (compensation des perturbations et coupures).
Sondeur monofaisceau mono-fréquence	Emission d'une onde acoustique à une fréquence donnée, le temps de parcours de l'onde permet de donner la distance entre le capteur et l'objet.	Détermination de la profondeur du cours d'eau. (1 acquisition = 1 point) → permet de déterminer la profondeur du sol en 1 point
Sondeur monofaisceau bi-fréquence	Emission simultanée sur deux gammes de fréquences acoustiques : haute fréquence et basse fréquence.	Deux résultats de profondeur : le sommet des sédiments et le fond. (1 acquisition = 2 points) → permet de déterminer la hauteur des sédiments (boue, algues, etc)
LiDAR	Capteur actif permettant de mesurer une distance par la mesure d'une impulsion laser.	Modélisation de la partie émergée (berges, ponts, bâtiments).

Tableau 1 : Capteurs utilisés lors de ce projet de fin d'étude

3. Mission concrète : acquisition bathymétrique et modélisation 3D des berges

Au moment de la rédaction de ce résumé, aucun test n'a encore pu être effectué. Plusieurs raisons sont à l'origine, la première est que les solutions proposées par les fournisseurs de drones marins de surface ne sont pas totalement finies. Par exemple, une démonstration était prévue fin juin avec un drone équipé d'un LiDAR en extérieur pour le relevé des berges. Cependant, un problème d'installation du système GPS RTK a contraint à repousser la démonstration de deux mois. La seconde raison est due à des devis trop élevés pour une simple démonstration d'une journée.

Le Service Hydrologie Prédiction des Étiages et des Crues, dans le cadre de sa mission de Service de Prédiction des Crues Loire-Cher-Indre, souhaite mettre à jour un modèle hydraulique sur la Loire moyenne. Un levé LiDAR est disponible pour la description du lit majeur de la Loire, mais de nombreuses zones du lit mineur du territoire concerné sont à mettre à jour, la dernière campagne de relevés d'ensemble datant de 1996.

Un test sera effectué mi-juillet sur ce projet ayant pour objet la réalisation des relevés bathymétriques et topographiques nécessaires à la mise à jour du modèle hydraulique. Un drone aquatique sera équipé d'un système LiDAR pour la partie émergée et d'un sondeur monofaisceau mono-fréquence pour la partie immergée. Cette mission consiste à réaliser des profils en travers sur un cours d'eau. Trois types de profils sont demandés :

- **Profils ponts** (Figure 3.a) : acquisition bathymétrique + acquisition LiDAR pour déterminer le potentiel du système dans la modélisation de la face amont d'un pont.
- **Profils bathymétriques** (Figure 3.b) : acquisition bathymétrique + acquisition LiDAR pour déterminer le potentiel du système dans la modélisation des berges.
- **Profils ouvrages** (Figure 4) : acquisition bathymétrique + acquisition LiDAR pour déterminer le potentiel du système dans la modélisation d'un ouvrage.

Les objectifs de cette mission sont d'évaluer la précision du système LiDAR, afin de valider ou non l'emploi de cette technologie pour ce type de mission. Ainsi, les rendus devront respecter la précision imposée par le CCTP, qui est de ± 5 cm en planimétrie et ± 2 cm en altimétrie pour les ouvrages et les ponts. Les données obtenues lors de cette démonstration seront donc comparées à des données de références (topographie traditionnelle). Le second but est d'analyser jusqu'où le système LiDAR permet de dessiner les berges dans un profil en 2D.

À partir des données LiDAR, plusieurs traitements vont être réalisés. Le livrable principal consiste à effectuer des profils 2D, comme expliqué précédemment. Cependant, mon objectif est de développer l'activité bathymétrique du cabinet. Je vais donc procéder à d'autres tests comme la modélisation 3D d'un pont, dans le but d'une inspection d'ouvrage. En effet, lors d'une inspection d'un pont par un drone aérien ou par une autre méthode topographique, il est difficile d'obtenir la partie inférieure du tablier. Je vais donc mettre en avant cet avantage du drone aquatique qui, couplé à un drone aérien, permet de modéliser un pont en entier.

4. Conclusion & Perspectives

Les travaux menés ont été orientés selon deux parties, une partie sur l'étude des drones marins de surface existants et des systèmes de mesure adaptables sur drone, et une seconde partie sur les tests et la production de données.

La première partie de ce projet s'appuie sur une étude comparative et une étude financière, dans le but d'acquérir le meilleur outil possible pour le cabinet. La société GE Infra souhaite proposer à ses clients une solution innovante tout en maintenant ses prix, afin de pouvoir vendre cette technologie. Cette étude financière a donc permis d'avoir du recul sur les prix du marché, pour à terme prendre la décision d'acheter ou non un drone aquatique.

Cette décision est également influencée par le potentiel du drone marin de surface pour réaliser les prestations actuelles de l'entreprise. Pour cela, les futurs tests permettront d'évaluer la qualité des données produites. Pour répondre aux objectifs de départ, une procédure de traitement sera mise en place pour fournir les différents livrables aux clients, principalement pour les rendus 2D de profils en travers. D'autres propositions de rendus seront mises à la disposition du cabinet, afin d'élargir les applications du pôle bathymétrie.

Au-delà du cabinet GE Infra, ce projet aura permis de conclure sur le marché actuel des drones marins de surface dans le domaine de la bathymétrie pour un cabinet de géomètre expert. Une grande majorité des systèmes existants n'est pas aboutie, puisqu'il existe encore des problèmes de synchronisation des capteurs. Cependant, les avancées dans ce secteur sont prometteuses du fait de la diversité des capteurs que l'on peut installer sur cette plateforme. Un cabinet de géomètre expert peut alors adapter un drone en fonction de son activité bathymétrique. L'investissement dans un drone aquatique engendre deux avantages majeurs : la sécurité du personnel et la productivité avec un gain de temps pour la mise à l'eau du véhicule, ce qui permet d'effectuer plus de missions dans une journée.

5. Référence

LIU, Z., ZHANG, Y., YU, X. & YUAN, C., (2016) 'Unmanned surface vehicles : An overview of developments and challenges', In Annual Review in Control, Volume 41, pp. 71–93.

PFE 2018

Lilian MANGIN 4/4

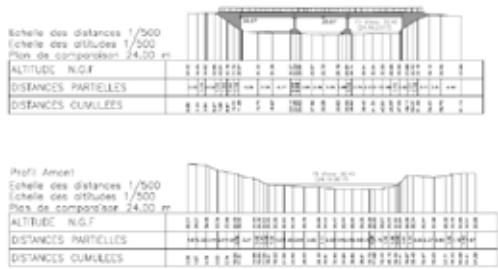


Figure 3 : (a) Profil de la face amont d'un pont (en haut), (b) Profil bathymétrique simple (en bas).

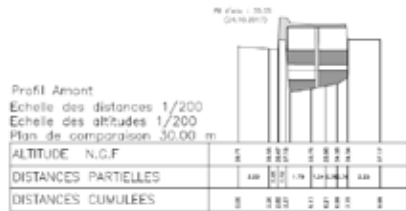


Figure 4 : Profil de la face amont d'un ouvrage.

Pointé automatique sur cible passive, par analyse d'images provenant de la caméra coaxiale d'un tachéomètre

PFE présenté par : **Juliette Bouche**
Société d'accueil : **HYP-ARC SAS**
Directeur de PFE : **Loïc SABAU**
Correcteur : **M.GRUSSENMEYER**



1. Introduction

La reconnaissance automatique de cibles (ATR, ou Automatic Target Recognition) est un procédé existant depuis les années 90 qui permet à un tachéomètre de détecter automatiquement le centre des prismes. La présente étude consiste à développer un système similaire à l'ATR permettant de pointer automatiquement le centre de cibles passives ne possédant pas de propriétés réfléchissantes particulières. Ce système permettrait d'utiliser des cibles moins coûteuses et plus pérennes que les prismes. Pour mener à bien ce projet, nous avons défini un ensemble d'objectifs qui ont conduit à développer un algorithme capable de détecter différents types de cibles à partir d'une image ou d'un flux vidéo, de garantir la qualité des données et de répondre au besoin attendu pour les travaux d'auscultation topométrique.

2. Contexte de l'étude

Le besoin d'un logiciel capable de pointer automatiquement des cibles passives est omniprésent.

Premièrement, le changement de canevas d'auscultation d'un ouvrage d'art (barrages EDF, tours aéroréfrigérantes) est une opération particulièrement complexe à réaliser. Ces ouvrages font l'objet de campagnes de mesures régulières et de grande ampleur. Pour limiter les effets de la dilatation et des mouvements sur l'ouvrage, les mesures de haute précision doivent être effectuées dans un laps de temps le plus court possible, ce qui est souvent difficile pour ces campagnes pouvant s'étaler sur plusieurs jours. De plus, la fatigue visuelle des techniciens regardant à travers la lunette à longueur de journée entre en compte dans l'altération de la précision des mesures et ne peut ni être estimée ni corrigée. L'automatisation des mesures sur de tels ouvrages permettrait d'éliminer les erreurs de pointé dues à la fatigue visuelle des opérateurs, et de diminuer l'influence sur les résultats des dilatations et des mouvements pendant les mesures, tout en conservant l'historique.

Deuxièmement, un système de pointé automatique permettrait d'utiliser des cibles passives dans les cas où les points à matérialiser sont dans des zones difficiles d'accès ne permettant pas l'utilisation de cibles orientables, ou soumis à des contraintes rendant l'utilisation de prismes peu adaptée voire impossible. Actuellement, plusieurs types de cibles peuvent être utilisés dans cette situation :

- Les prismes 360°, très avantageux en termes de largeur du champ de visée, mais peu précis (± 2 mm de précision de centrage), peu résistants et particulièrement coûteux.
- Les doubles prismes orientables, plus précis (± 0.2 mm de précision de centrage), plus résistants et utilisables avec l'ATR, plus abordables que les prismes 360° mais disposant d'un champ de visée plus étroit (deux fois ± 20 gon).

Ces systèmes pourraient être remplacés par des cibles passives de type bille, cocarde ou autre, divisant ainsi le coût de la matérialisation d'un point inaccessible par 20 au moins en plus d'étendre le champ des visées à 360° dans certains cas. Cependant, afin d'intégrer ces cibles dans des protocoles d'auscultation automatisée, il faut qu'elles puissent être détectées automatiquement.

Troisièmement, l'intégration d'une fonctionnalité de pointé automatique sur cibles passives aux logiciels de télésurveillance permettrait d'utiliser ces systèmes pour mesurer les cibles déjà présentes sur les ouvrages, et d'obtenir des mesures cohérentes avec l'historique.

3. Moyens techniques

L'étude a nécessité l'utilisation d'une station totale dotée d'une caméra coaxiale, c'est-à-dire centrée et alignée sur l'axe de visée de la lunette.

Deux modèles différents de stations totales de la marque Leica ont été utilisés: une Nova MS50, et une Nova MS60. Les caractéristiques techniques principales de ces deux instruments sont identiques et sont détaillées en **Tableau 1**.

Les licences GeoCOM robotique, image et vidéo ont été nécessaires à la réalisation de ce projet. Il s'agit de fonctions internes à l'appareil, permettant de réaliser diverses tâches sur commande.

Précision de la mesure d'angles Hz et V	
3 dmgon	
Précision de la mesure de distance	
Sur prisme	1mm + 1,5 ppm
Sans prisme / toute surface	2mm + 2 ppm
Caractéristiques de la caméra coaxiale	
Capteur	CMOS 5 Mpixel
Champ de vision (hz,v)	1,3° x 1,0°, diag. 1,5°
Grossissement	Grossissement optique x30
Zoom	digital : x1,x2,x4,x8
Fréquence	20 image/s
Mise au point	1,7m à l'infini, autofocus
Rapport angle/pixel du capteur	1 pixel = 5dmgon, soit 1mm à 100m

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des stations totales Leica Nova MS50 et MS60

Après examen des besoins et des possibilités existantes en analyse d'images, l'étude a été recentrée sur les trois types de cibles présentés en **Figure 1**.



Figure 1 : Cibles passives étudiées : (a) Cocarde en lave émaillée, (b) Bille en aluminium, (c) Damier arrondi

Le programme a été codé en C++ dans l'environnement de développement intégré « QtCreator », choisi pour son caractère multiplateforme et la simplicité qu'il offre pour la création d'interfaces graphiques, permettant de développer des programmes interactifs.

Nous y avons intégré la bibliothèque graphique OpenCV (pour Open Computer Vision) spécialisée dans le traitement d'image et librement accessible.

4. Traitement d'images

Le flux vidéo transmis par l'appareil au programme est composé d'images RGB, dont chaque pixel est défini par trois composantes, rouge, vert et bleu. Chacune de ces composantes dispose généralement de 256 nuances (de 0 à 255). Dans le but de détecter des formes géométriques précises, ces images subissent les traitements suivants :

Réduction en niveaux de gris :

Pour chaque pixel de l'image, les trois valeurs de rouge, de vert et de bleu sont remplacées par une valeur de gris. L'image obtenue ne comporte plus qu'un canal au lieu de trois. Le niveau de gris d'un pixel correspond alors à sa luminosité dans un intervalle de 0 à 255, pour lequel la valeur 0 représente l'absence de luminosité et donc le noir, et la valeur 255, la luminosité maximale, à savoir le blanc.

Lissage :

Il consiste à modifier les valeurs des pixels en tenant compte des pixels voisins afin d'atténuer les effets du bruit numérique. Les filtres Gaussien et médian sont employés successivement.

Extraction des contours :

La méthode utilisée est celle du filtre optimal de Canny, qui effectue un seuillage par hysteresis lors duquel l'intensité du gradient de chaque point est comparée à deux seuils, un haut et un bas. Pour chaque point, si l'intensité de son gradient est :

- Inférieure au seuil bas, le point est rejeté ;
- Supérieure au seuil haut, le point est accepté comme formant un contour ;
- Entre le seuil bas et le seuil haut, le point est accepté s'il est connecté à un point déjà accepté.

L'application du filtre de Canny permet d'obtenir directement une image binaire séparant les pixels de contours et les autres. Le temps de calcul de cet algorithme et son efficacité sont faciles à optimiser en définissant correctement les seuils.

5. Détection de formes

Dans le but de détecter les cibles, nous avons recherché des ellipses pour les cocardes, des cercles pour les billes, et des droites pour les damiers.

Détection d'ellipses :

Elle nécessite dans un premier temps d'extraire chacun des contours obtenus dans l'étape précédente sous forme de liste de points. Une fonction de régression elliptique basée sur le principe des moindres carrés est ensuite utilisée pour ajuster une ellipse à chaque contour. Plusieurs étapes de filtrage des ellipses détectées sont ensuite mises en place pour ne conserver dans un premier temps que les ellipses correspondant à un contour elliptique, puis dans un second temps que les ellipses concentriques. Cette méthode permet une détection presque exempte de faux positifs, mais n'est pas assez robuste pour détecter des cocardes endommagées dont les contours ne sont pas parfaitement elliptiques.

Détection de cercles :

La recherche de cercles se base sur la transformée de Hough. Cette méthode projette les points de l'image binaire dans un espace de paramètres dont la dimension est égale au nombre de paramètres nécessaires pour décrire la forme recherchée. Cet espace de paramètres continu et multidimensionnel est discrétisé par une matrice d'accumulation de même dimension qui représente l'ensemble des valeurs et des combinaisons possibles pour les paramètres.

En spécifiant la taille image de la cible recherchée, il est possible de limiter fortement le nombre de détections. Le cercle le plus au centre est ensuite conservé.

Détection de lignes :

Elle utilise une transformée de Hough, dans laquelle les lignes sont représentées à partir de leurs coordonnées polaires (ρ, θ) . La méthode de détection consiste à représenter dans l'espace paramétrique toutes les droites passant théoriquement par chaque point (x, y) du contour. Si plusieurs points de l'image appartiennent à une même droite, le point de coordonnées (ρ, θ) sera représenté plusieurs fois dans l'espace paramétrique, ce qui formera une accumulation. Les coordonnées de ces points accumulés correspondent aux paramètres d'une droite existante dans l'image. Les intersections de toutes les droites détectées sont ensuite calculées et moyennées pour ne livrer qu'un seul point.

6. Structure du programme

Le programme a une structure multiprocessus : il est divisé en plusieurs fils d'exécution possédant chacun leurs fonctions et leurs objets et pouvant s'exécuter en parallèle sans bloquer le programme :

- « captureThread » : il récupère les images issues du flux vidéo et stocke l'image courante.
- « imageProcessor » : il traite l'image courante pour extraire le point correspondant au centre de la cible, en utilisant les méthodes citées précédemment.
- « videoProcessor » : il gère l'exécution des processus « ImageProcessor » et « CaptureThread », conserve les résultats qu'ils retournent, les évalue, et de les transforme en un résultat final s'ils sont concluants.
- « mainWindow » : c'est une interface graphique qui fait le lien entre l'utilisateur et l'ensemble des fonctions du programme, y compris la communication avec l'appareil.

Le déroulement du programme pendant une seconde est schématisé en Figure 2.

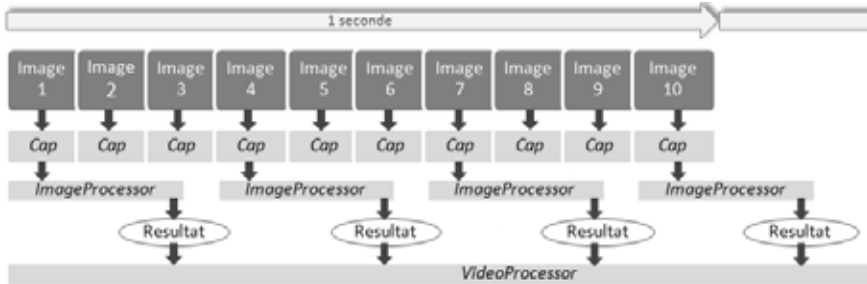


Figure 2 : Schéma de la gestion des processus par le programme

7. Résultats

Le système développé pour ce projet a été testé en conditions réelles sur un réseau de points situés sur la façade d'un bâtiment. Trois séries de mesures ont été menées indépendamment les unes des autres afin de vérifier la reproductibilité des résultats.

Les précisions des mesures sur cibles passives sont généralement comparables aux précisions des mesures sur prismes (environ 4 dmgon). Il est par ailleurs impossible de constater un systématisme entre les précisions des pointés manuels et automatiques (Figure 3).

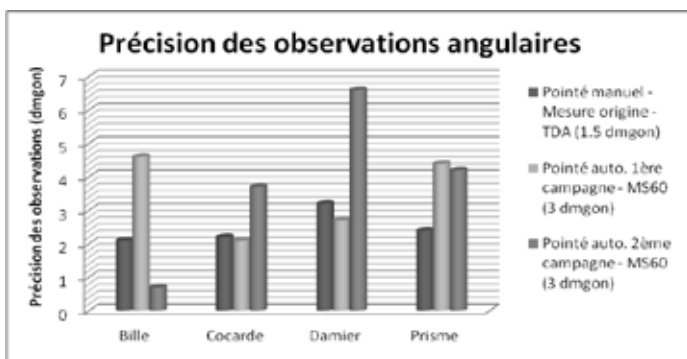


Figure 3 : Précision des observations sur trois campagnes de mesures

La répétabilité du pointé automatique sur les cocardes a été mise en évidence par les accroissements faibles entre les campagnes. La concordance des points mesurés manuellement et automatiquement permet d'espérer que le pointé automatique puisse être employé sur des distances plus grandes.

Bien que les mesures sur billes et damiers se fassent avec des précisions convenables, leur répétabilité et leur fiabilité sont incertaines au vu des résultats obtenus à la deuxième campagne de mesures. L'algorithme de détermination des droites (trop de faux positifs), et la qualité de l'état de surface des billes reste à peaufiner. Cependant, la précision minimale de 7 dmgon obtenue lors de ces mesures représente une incertitude de seulement 0.3mm à 30m, ce qui respecte les tolérances.

8. Conclusion

Cette étude a livré des résultats encourageants concernant la précision et le temps de réalisation du pointé. Il sera cependant indispensable de multiplier les tests pour vérifier la fiabilité du système. Certaines améliorations pourront encore être apportées au programme, et plus particulièrement la mise en place d'une méthode robuste pour détecter des cibles sales ou endommagées. Une piste à étudier est l'utilisation d'un système de corrélation d'images, qui permettrait d'éviter l'étude des contours.

Plus d'infos : <http://topographie.insa-strasbourg.fr>

Contact

jdt2018@insa-strasbourg.fr

Avec l'aide de Tania Landes

Maître de conférences INSA Strasbourg
tania.landes@insa-strasbourg.fr
tél. 03 88 14 47 34

INSA Strasbourg

Spécialité topographie
24 boulevard de la Victoire
67084 Strasbourg Cedex
tél. 03 88 14 47 00
www.insa-strasbourg.fr

INSA

GE
GÉOMÈTRE-EXPERT
CONSEILLER VALORISER GARANTIR

aft